

# Entwicklung selbstoptimierender Prozesse in der NC-Verfahrenskette

Vom Fachbereich Produktionstechnik der  
UNIVERSITÄT BREMEN  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von  
Dipl.-Ing. Christian Heßling  
aus Münster

Datum der Einreichung: 29/11/2012

Referent: Prof. Dr.-Ing. Dieter H. Müller

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Sándor Vajna

Tag der mündlichen Prüfung: 25/04/2013



## Danksagung des Autors

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen einer Industriepromotion bei der Daimler AG entstanden. Es ist mir ein wichtiges Anliegen, allen Personen zu danken, die mich bei der Erstellung der Dissertation begleitet haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter H. Müller, der Doktorvater dieser Arbeit. Seine fachliche Unterstützung, seine konstruktiv kritischen Rückfragen und schließlich seine enorme Geduld haben wesentlich zum Gelingen beigetragen.

Danke sage ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Sándor Vajna für die Beachtung, die er der Arbeit als Zweitgutachter geschenkt hat und Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus-Dieter Thoben für seine inhaltlichen Impulse sowie der Übernahme des Vorsitzes des Prüfungsausschusses.

In meiner Abteilung bei der Daimler AG habe ich über die Jahre hinweg sehr große Unterstützung erfahren. Hier gilt mein besonderer Dank Herrn Dr. Frank Boinski für sein großes Engagement und Herrn Christian Wolters für den mir gegebenen Rückhalt und die hilfreichen Einschätzungen.

Des Weiteren möchte ich mich sehr bei Sabine Kurz dafür bedanken, dass sie mir während meiner Promotion kompetent und motivierend zur Seite stand.

Einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen meiner Promotion haben meine Eltern Anni und Alfons Heßling geleistet. Ich bin sehr dankbar für die großartige Hilfe und ihre emotionale Stütze. Ich danke auch meinen Geschwistern Claudia und Thomas für ihre Unterstützung im wissenschaftlichen Diskurs.

Als letztes will ich mich ganz besonders bei meiner Frau Katie für die zuweilen bewundernswerte Geduld bedanken. Ohne Ihr großes Verständnis hätte ich meine Promotion sicherlich nicht zu einem erfolgreichen Abschluss gebracht. Ich danke Dir!



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Forschungsfrage . . . . .	1
1.2	Aufbau der Arbeit . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Arbeit</b>	<b>7</b>
2.1	Die NC-Programmierung im Kontext der Arbeitsvorbereitung . . . . .	8
2.2	Die NC-Programmierung im Kontext der CAx-Prozesskette . . . . .	11
2.3	Die technische und organisatorische Dimension von Wissen . . . . .	13
2.3.1	Integration von Wissen in CAx-Systeme . . . . .	13
2.3.1.1	Parametrik und Templates . . . . .	16
2.3.1.2	Feature-Technologie . . . . .	17
2.3.2	Wissensmanagement . . . . .	17
2.3.2.1	Wissen versus Informationen . . . . .	18
2.3.2.2	Wissensspirale nach Nonaka et al. . . . .	21
2.3.2.3	Wissensbausteine nach Probst et al. . . . .	24
2.4	Die Standardisierung und das Potential der Ressource Mensch . . . . .	28
2.4.1	Der Mensch in der Organisation . . . . .	28
2.4.2	Scientific Management . . . . .	30
2.4.3	Deming Zyklus - KVP . . . . .	32
2.4.4	Communities of Practice . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Stand der relevanten Forschung</b>	<b>37</b>
3.1	Stand der relevanten Forschung . . . . .	37
3.2	Ableitung des Forschungsbedarfs . . . . .	42
3.3	Aufstellen der Arbeitshypothese . . . . .	46

<b>4</b>	<b>Entwicklung selbstoptimierender Prozesse</b>	<b>51</b>
4.1	Bezugsrahmen der Hypothese . . . . .	51
4.1.1	Die Rolle der NC-Programmierung . . . . .	51
4.1.2	Einzelanfertigung mit Ähnlichkeitscharakter . . . . .	52
4.2	Ausarbeitung selbstoptimierender Prozesse . . . . .	53
4.2.1	Konzeptentwicklung . . . . .	53
4.2.1.1	Änderungsgerechte Automatisierung . . . . .	53
4.2.1.2	Diversitäre Fertigungsstrategien . . . . .	54
4.2.1.3	Selektion anhand von Gütekriterien . . . . .	55
4.2.2	Ausarbeitung des NC-Managers . . . . .	58
4.2.2.1	Rückführung der Gütekriterien . . . . .	59
4.2.2.2	Funktionsweise des NC-Managers . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Technische Validierung des NC-Managers</b>	<b>67</b>
5.1	Versuchsreihe zum Einfluss der Maschinendynamik . . . . .	68
5.1.1	Aussagekraft berechneter Bearbeitungszeiten . . . . .	69
5.1.2	Aussagekraft der quantitativen Gütekriterien . . . . .	72
5.2	Validierung des NC-Managers im Anwendungsprozess . . . . .	78
5.2.1	Modifikation der Fertigungsstrategien . . . . .	79
5.2.2	Bewertung in der Segmentfertigung . . . . .	80
5.2.3	Auswertung der Fertigungsstrategien . . . . .	83
5.3	Statistische Untersuchung der realen Fertigungsstrategien . . . . .	85
5.4	Zusammenfassung und Bewertung der Validierung . . . . .	89
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>91</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	91
6.2	Ausblick . . . . .	93
<b>A</b>	<b>Die Arbeitsinhalte des Werkzeugbaus</b>	<b>95</b>
<b>B</b>	<b>Das Konzept der Standard-Modulsegmente</b>	<b>99</b>
<b>C</b>	<b>Konstruktion/Anfertigung von Standard-Modulsegmenten</b>	<b>103</b>
C.1	Anforderungen an das Segment-Modul . . . . .	104
C.2	Ausarbeitung des Segment-Moduls . . . . .	105
C.3	Ablauf der Vor- und Anfertigung . . . . .	111

<b>D</b>	<b>Statistische Auswertungen</b>	<b>115</b>
D.1	Signifikanz berechneter Bearbeitungszeiten . . . . .	116
D.2	Signifikanz der quantitativen Gütekriterien . . . . .	118
D.3	Messreihen zur Bestimmung von Ra . . . . .	123



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Messerkonstruktion aus Standard-Modulesegmenten . . . . .	2
1.2	Stechfräsen vom Umriss und dessen Freigang . . . . .	3
2.1	Die Gliederung der Arbeitsvorbereitung nach Eversheim [16] . . . . .	8
2.2	Begriffshierarchie nach North [43] . . . . .	20
2.3	Bausteine des Wissensmanagements nach Probst et al. [49] . . . . .	27
3.1	Darstellung zum Forschungsbedarf in der NC-Verfahrenskette . . . . .	43
3.2	Zusammenwirken der MPS-Subsysteme [38] . . . . .	47
4.1	Fräsergebnisse aus einem Vorversuch (Angaben in Minuten) . . . . .	56
4.2	Struktur des NC-Managers . . . . .	59
4.3	Komponenten zur Erfassung/Rückführung der Gütekriterien . . . . .	60
4.4	Hauptmenü des NC-Managers . . . . .	61
4.5	Parameter der einzelnen Bearbeitungsoperationen . . . . .	62
4.6	Analyse vor dem Anlegen eines neuen Grundprozesses . . . . .	63
4.7	Menü zum Einlesen der Fertigungsinformationen . . . . .	64
4.8	Darstellung der Vorschubanalyse im NC-Manager . . . . .	65
5.1	Statistische Untersuchungsreihe mit dem NC-Manager . . . . .	69
5.2	Vergleich der Fertigungsstrategien im NC-Manager . . . . .	70
5.3	Auswertungen zur Genauigkeit berechneter Bearbeitungszeiten . . . . .	71
5.4	Untersuchungsreihe zu den quantitativen Gütekriterien . . . . .	73
5.5	Statistische Auswertung der Untersuchungsergebnisse . . . . .	74
5.6	Segmente nach dem Zeitspanvolumen sortiert . . . . .	75
5.7	Statistische Auswertung nach der Segmentform getrennt . . . . .	76
5.8	Notwendige Differenzen der Mittelwerte zur Unterscheidung . . . . .	77
5.9	Werkzeugkonstruktion für die zweite Validierungsphase . . . . .	80

5.10	Anwendung des NC-Managers zur Segmentfertigung . . . . .	81
5.11	Fräsergebnisse der 10 Iterationsschleifen . . . . .	82
5.12	Messung der mittleren Rauheit $R_a$ von den Formflächen . . . . .	83
5.13	Vergleich von der gemessenen Oberflächengüte zur Bewertung . . . . .	84
5.14	Auswertung der Vorschubanalyse im NC-Manager . . . . .	85
5.15	Zeitspanfläche und -volumen der realen Fertigungsstrategien . . . . .	86
5.16	Differenzierung nach Schrupp- und Umrissbearbeitung . . . . .	87
5.17	Umsetzung des NC-Managers mit drei Kennzahlen . . . . .	88
A.1	Von der Pressenstrasse zum Beschnittmesser . . . . .	96
B.1	Norm-Entwurf der Standard-Modulsegmente . . . . .	100
C.1	Das Ursegment als Ergebnis der Ausarbeitung . . . . .	105
C.2	Darstellung zur Vorschauerstellung . . . . .	106
C.3	Ergebnis der zweiten PowerCopy . . . . .	109
C.4	Kenngrößen der Segmente . . . . .	110
C.5	Bilder zum vierstufigen Fertigungsablauf . . . . .	112
C.6	Bohrbild zum Spannkonzep . . . . .	114
D.1	Genauigkeit berechneter Bearbeitungszeiten beim Schruppen . . . . .	116
D.2	Genauigkeit berechneter Bearbeitungszeiten beim Schlichten . . . . .	117
D.3	Auswertung - Schruppen I und II aller Segmente . . . . .	118
D.4	Auswertung - Schlichten I und II aller Segmente . . . . .	119
D.5	Auswertung - Schruppen I nach Segmentform differenziert . . . . .	120
D.6	Auswertung - Schlichten I nach Segmentform differenziert . . . . .	121
D.7	Trennschärfe - Schrupp- und Schlichtbearbeitung I / Form A . . . . .	122
D.8	Messerreihe zur Bestimmung von $R_a$ der Segmente 1 und 2 . . . . .	123
D.9	Messerreihe zur Bestimmung von $R_a$ der Segmente 3 und 4 . . . . .	124
D.10	Messerreihe zur Bestimmung von $R_a$ der Segmente 5 und 7 . . . . .	125
D.11	Messerreihe zur Bestimmung von $R_a$ der Segmente 8 und 9 . . . . .	126
D.12	Messerreihe zur Bestimmung von $R_a$ des Segmentes 10 . . . . .	127

# Tabellenverzeichnis

4.1	Gütekriterien zur Bewertung der Fertigungsstrategien . . . . .	58
5.1	Resultate (t-Test) zur Unterscheidung zweier Fertigungsstrategien . .	78

# Kapitel 1

## Einleitung und Motivation

Der intensive Wettbewerb im Automobilssektor zwingt auch den Betriebsmittelbau zu einer steten Reduktion der Entwicklungs- und Anfertigungsdauer von Presswerkzeugen. Dies geht einher mit der Tendenz zu immer komplexeren Bauteilen am Fahrzeug bei gleichzeitig steigendem Kostendruck [35]. Aus diesen Anforderungen resultieren im Anfertigungsprozess von Presswerkzeugen sowohl die Bestrebung zur Automatisierung der NC-Programmierung als auch die Optimierung der zugrunde liegenden Fertigungsstrategien. Wie im Weiteren aufgezeigt wird, widersprechen sich beide Ansätze in ihrer Umsetzung nach aktuellem Stand. Ziel dieser Arbeit ist die Schaffung einer Synergie von beidem.

### 1.1 Motivation und Forschungsfrage

Das Spektrum der anzufertigenden Teile für Zieh- und Beschneidewerkzeuge reicht von sich wiederholenden Komponenten bis zu individuell ausgestalteten Bauteilen. In dieser weiten Spanne ist eine Gruppe von Bauteilen zu definieren, die zwar unterschiedlich sind, deren geometrischer Aufbau sich aber stark ähnelt. Ein wesentlicher Vertreter dieser Bauteilkategorie sind Messer und Backen, die als Funktionsbauteile im Presswerkzeug den Ziehrand entfernen oder aber das Blechteil im Kantenbereich umstellen. Bisher werden diese Bauteile zumeist als Gusskonstruktion mit sehr freien Vorgaben ausgestaltet und im Anfertigungsprozess individuell behandelt.

Um das Potential einer Standardisierung für Vertreter dieser im Weiteren als „Einzelfertigung mit Ähnlichkeitscharakter“ bezeichneten Bauteilkategorie nutzen zu können, beschäftigt sich diese Promotion mit dem Konzept der Standard-Modulsegmente.

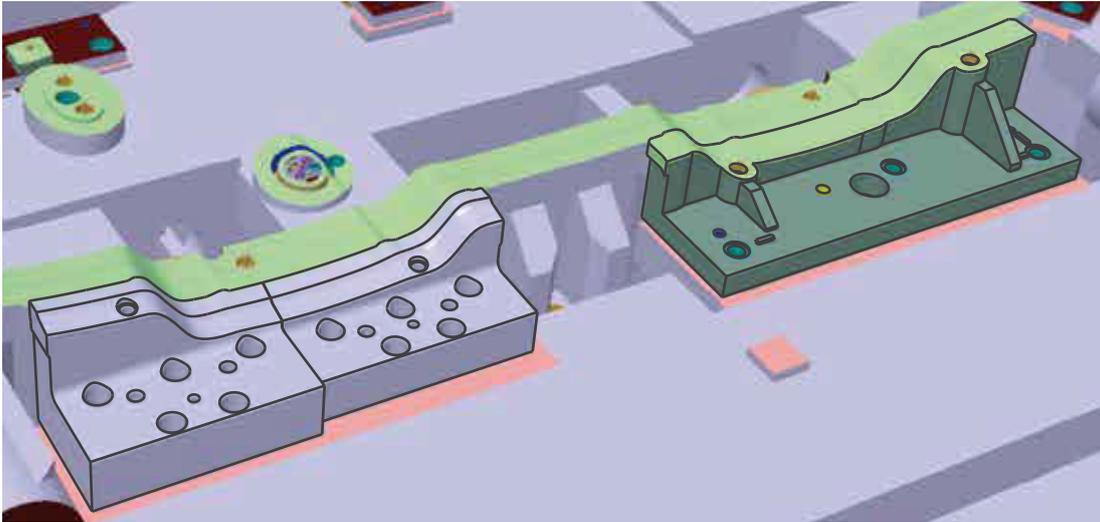


Abbildung 1.1: Messerkonstruktion aus Standard-Modulsegmenten

In der Abbildung 1.1 ist der Unterschied zwischen den zwei Konstruktionsarten dargestellt. Mit dem links dargestellten Konzept der Standard-Modulsegmente soll die Konstruktion von Messern und Backen soweit vereinheitlicht werden, dass im Anfertigungsprozess Potentiale zur Prozessoptimierung genutzt werden können. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei die weitgehende Automatisierung der Arbeitsvorbereitung. Mit den hierbei erstellten NC-Programmen soll im Folgeprozess mit möglichst geringem personellen Aufwand aus vorgefertigten Rohsegmenten die Messer und Backen gefertigt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, soll ein neues Fräserkonzept mit wesentlich erhöhten Standzeiten in Kombination mit einer „Best Practice“ auf Basis der vorhandenen Erfahrungswerte zum Einsatz kommen. Nach dem Duden definiert sich eine solche „Best Practice“ als „bestmögliche Methode“ oder als „höchster Standard“ [2]. Um den neuen Fräser zielführend in die definierte Fertigungsstrategie zu integrieren, sollten bei einem Workshop in der Versuchsabteilung des Fräswerkzeugherstellers die optimalen Technologieparameter für die Bearbeitung von Standard-Modulsegmente ermittelt werden.

Die Erkenntnisse aus dem Versuchsverlauf bilden die Motivation für dieses Promotionsvorhaben. Anstatt „nur“ die Zahlenwerte zur Festlegung der Fräsparameter zu liefern, wurde eine neue, wesentlich leistungsfähigere Strategie für das Umrissfräsen entwickelt. Der Umriss des Messers sowie dessen Freigang nach unten wird dabei, wie in der Abbildung 1.2 dargestellt, durch ein Stechfräsen auf einmal gefertigt und nicht mehr in zwei separaten Bearbeitungen auf horizontalen Ebenen zerspant.



Abbildung 1.2: Stechfräsen vom Umriss und dessen Freigang

Anstatt eine parametrische Änderung an der „Best Practice“ vorzunehmen, ist die Fertigungsstrategie konzeptionell weiterentwickelt worden. Dieses Ergebnis wirft die Frage auf, welche Berechtigung die vorab postulierte Existenz einer bestmöglichen Methode überhaupt haben kann. Wie bringt man die Definition eines Standards mit der zukünftigen Möglichkeit zur parametrischen und konzeptionellen Optimierung der festgelegten Fertigungsstrategie in Einklang? Die in dem Projekt geplante Standardisierung und eine darauf aufbauende Automatisierung der NC-Programmierung würde keinen Freiraum zu einer solchen Prozessoptimierung im Anwendungsprozess lassen.

Welches Potential die Anwender für eine eigenverantwortliche Weiterentwicklung der Wissensbasis im Unternehmen haben, zeigt sich unter anderem im Phänomen der Communities of Practice (CoP). Als „themenspezifische soziale Netzwerke“ innerhalb einer Organisation steht bei einer CoP der Mensch als Wissensträger im Mittelpunkt des Interesses [85]. In den Forschungsbeiträgen zu den CoP wird betont, dass eine Weiterentwicklung des Wissens eng mit dem Handeln im Arbeitsprozess verbunden ist [25] [34] [62]. Dem folgend würde die inhaltliche Ausgrenzung der Anwender nach der Einführung einer Automatisierung der NC-Programmierung auf Basis definierter Standards das im Phänomen der CoP identifizierte Potential zur

Lösungsoptimierung ungenutzt lassen. Eine stete Lösungsoptimierung ist jedoch besonders vor dem Hintergrund der Dynamik des technologischen Fortschritts bei der spanenden Bearbeitung entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit im Anfertigungsprozess. Dem entsprechend kann eine standardisierte Fertigungsstrategie auf Dauer nicht optimal sein. Wer seine Arbeitsweise nicht verändert, riskiert, im Wettbewerb zurück zu fallen.

Gestartet ist diese Dissertation mit der Zielsetzung, bei einer Einzelanfertigung mit Ähnlichkeitscharakter die NC-Programmierung zu automatisieren. Die vorab dargelegte Erkenntnis, dass eine Fertigungsstrategie kontinuierlich unter Mitwirkung der Anwender zu verbessern ist, komplettiert das Vorhaben zur zentralen Forschungsfrage dieser Ausarbeitung:

Wie ist ein Prozess der Arbeitsvorbereitung für eine Einzelfertigung mit Ähnlichkeitscharakter im Werkzeugbau zu gestalten, dass sowohl das Potential einer weitgehend automatisierten NC-Programmierung als auch die Möglichkeit zur Optimierung der Fertigungsstrategien unter Mitwirkung der Anwender gemeinsam genutzt werden können?

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit zur NC-Verfahrenskette besteht aus sechs Kapiteln. Es ist anzumerken, dass in der vorliegenden Dissertation wegen der besseren Lesart die männliche Wortform verwendet wird. Das weibliche Pendant ist dabei mit umfasst. Im Folgenden werden die Inhalte der einzelnen Kapitel vorgestellt.

Zunächst werden im zweiten Kapitel die zentralen Themen der Forschungsfrage aus verschiedenen Perspektiven beleuchtet. Der erste Teil beschäftigt sich mit der NC-Programmierung im Kontext der Arbeitsvorbereitung und der CAx-Prozesskette. Folgend werden unter dem Fokus einer Automatisierung der NC-Programmierung die Grundlagen des Knowledge-Based-Engineering dargestellt, um dann die Möglichkeiten einer Integration von Wissen an Systemen des Computer Aided Manufacturing zu konkretisieren. Die Ressource Wissen und Mechanismen zur Weiterentwicklung der Wissensbasis stehen im Mittelpunkt der weiteren Ausführungen. Nach einer Definition des Begriffs „Wissen“ und seiner Abgrenzung werden mit der Wissensspirale von Nonaka et al. und den Wissensbausteinen nach Probst et al. zwei Modelle des Wissensmanagements vorgestellt. Der letzte Teil im zweiten Kapitel geht auf das Spannungsfeld zwischen der Standardisierung und dem Potential der Ressource Mensch ein. Zur Verdeutlichung werden mit dem Scientific Management und dem Kontinuierlichen Verbesserungsprozess auf Basis des Deming-Zyklus zwei Managementstrategien vorgestellt, die sich in dem jeweils zugrunde liegenden Menschenbild diametral unterscheiden. Ergänzend wird das Potential der Ressource Mensch in dem Phänomen der Communities of Practice aufgezeigt.

Im dritten Kapitel wird der Stand der Forschung zur Automatisierung der NC-Programmierung dargelegt und an aktuellen Dissertationen aus der Domäne Werkzeugbau mit vergleichbaren Fragestellungen vertiefend behandelt und im Kontext der Forschungsfrage diskutiert. Darauf aufbauend werden der Forschungsbedarf abgeleitet und Parallelen zu Lösungsansätzen aus der Open-Source-Entwicklung und dem Web 2.0 aufgezeigt. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden im Anschluss drei zentrale Forderungen an einen Prozess hergeleitet, der dem Anspruch der Forschungsfrage gerecht wird. Auf Grundlage dieser Anforderungen wird anschließend die Hypothese zu selbstoptimierenden Prozessen formuliert. Der Begriff „selbstoptimierend“ betont dabei die Möglichkeit zur prozessinternen Verbesserung von Arbeitsweisen.

Im vierten Kapitel wird das Konzept der selbstoptimierenden Prozesse anhand der vorab aufgestellten Anforderungen ausgearbeitet und für die NC-Programmierung von Standard-Modulesegmenten konkretisiert. Dazu wird mit dem NC-Manager eine im Rahmen dieser Promotion entwickelte Software vorgestellt, die als Werkzeug in der NC-Verfahrenskette eine kontinuierliche Verbesserung der Fertigungsstrategien trotz eines hohen Automatisierungsgrades ermöglicht.

Im fünften Kapitel folgt die technische Validierung des NC-Managers. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Aussagekraft und Übertragbarkeit der erfassten Güten der Fertigungsstrategien. Anhand von Versuchsreihen werden die Auswirkungen unterschiedlicher Einflussgrößen statistisch analysiert. Auch werden die Standard-Modulesegmente einer realen Werkzeugkonstruktion von NC-Programmierern am Standort der Promotion unter Verwendung des NC-Managers programmiert. Dabei bietet sich ihnen die Möglichkeit, die hinterlegten Fertigungsstrategien zu modifizieren. Impulse hierzu werden bei der sich jeweils anschließenden Fertigung und einer Auswertung im NC-Manager generiert. In der realen Umsetzung kann sowohl die Handhabung als auch die generelle Funktionsfähigkeit des NC-Managers überprüft und belegt werden.

Abschliessend werden im sechsten Kapitel die Inhalte dieser Dissertation zusammengefasst, mögliche Perspektiven für das Konzept der selbstoptimierenden Prozesse thematisiert und ein Forschungsdesiderat aufgezeigt.

# Kapitel 2

## Grundlagen der Arbeit

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen für die weitere Ausarbeitung zur Forschungsfrage aufgezeigt. Dazu werden sowohl technische wie auch menschenbezogene Themen beleuchtet.

In den ersten zwei Unterkapiteln steht die NC-Programmierung selbst im Fokus der Betrachtung. Zuerst wird der Bezug zur Arbeitsvorbereitung im Kontext der Produktentstehung hergestellt und die NC-Verfahrenskette detailliert beschrieben. Danach wird systemseitig das Computer Aided Manufacturing (CAM) im Kontext einer durchgehenden CAx-Prozesskette erläutert.

Der sich anschließende Themenblock widmet sich der Ressource Wissen im Unternehmen und zeigt Wege zur systemseitigen und organisatorischen Einbindung von Wissen in die Geschäftsprozesse auf. Dazu werden mit dem Knowledge-Based Engineering (KBE) Möglichkeiten zur Wieder- und Weiterverwendung des vorhandenen Wissens in Softwaresystemen aufgezeigt. Der zweite Teil behandelt Strategien und Erklärungsmodelle zur Weiterentwicklung der Wissensbasis in Unternehmen. Neben einer Definition und Abgrenzung des Begriffs Wissen werden die Modelle von Nonaka et al. und Probst et al. vorgestellt.

Im dritten Unterkapitel wird auf das Menschenbild im Kontext der Standardisierung eingegangen. Mit dem Scientific Management von Taylor und des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses von Deming werden sehr gegensätzliche Managementkonzepte erläutert und einander gegenüber gestellt. Abschließend wird das bereits in der Einleitung angeführte Phänomen der Communities of Practice thematisiert.

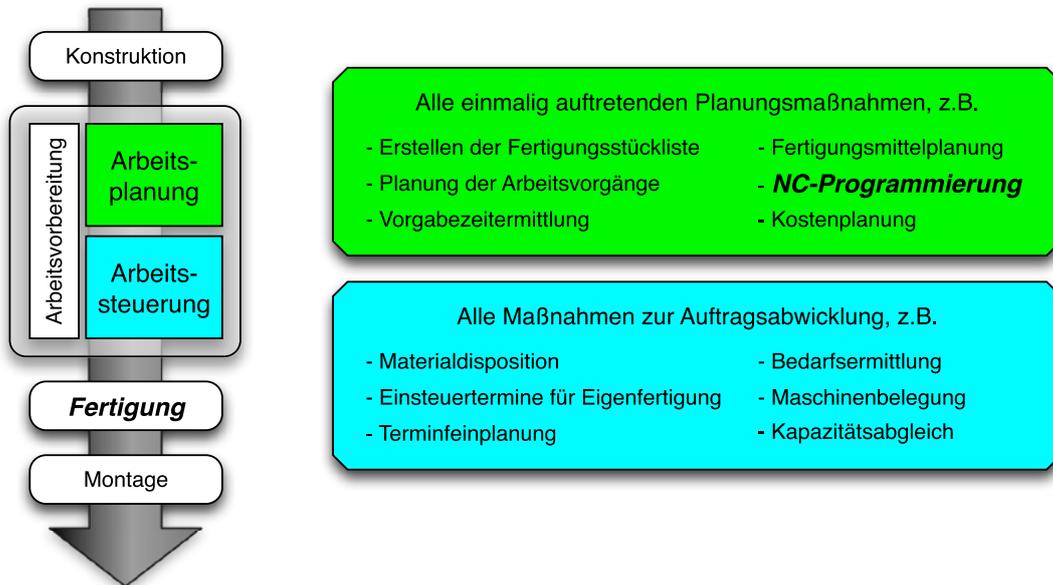


Abbildung 2.1: Die Gliederung der Arbeitsvorbereitung nach Eversheim [16]

## 2.1 Die NC-Programmierung im Kontext der Arbeitsvorbereitung

Die NC-Programmierung übernimmt als Teil der Arbeitsvorbereitung eine Brückenfunktion zwischen der Konstruktion und der Fertigung. In der Abbildung 2.1 ist die Einordnung der NC-Programmierung in den Prozess der Produktentstehung dargestellt. In der Konstruktion werden die geometrischen und physikalischen Produktmerkmale festgelegt. Darauf aufbauend erstellt die Arbeitsvorbereitung alles Notwendige, damit das Produkt gefertigt und montiert werden kann. Der Definition des Ausschusses für Wirtschaftliche Fertigung (AWF) folgend, unterteilt sich die Arbeitsvorbereitung in Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung. Die Arbeitsplanung beantwortet die Fragen: „was, wie und womit“, während die Arbeitssteuerung auf die Fragen „wieviel, wann, wo und durch wen“ eingeht [16].

Die Tätigkeiten der Arbeitsvorbereitung werden maßgeblich von dem Neuigkeitsgrad des Konstruktionsinhaltes beeinflusst. Abhängig von der fertigungstechnischen Ähnlichkeit und dem daraus resultierenden Erstellungsaufwand können die Umfänge der Arbeitsplanung in vier Kategorien unterteilt werden. Nach Eversheim [16] gibt es die Neuplanung, die Anpassungsplanung, die Variantenplanung und die Wiederholplanung. Es folgt eine kurze Beschreibung dieser vier Kategorien:

1. **Neuplanung** Eine Neuplanung zeichnet sich dadurch aus, dass keine fertigungstechnische Ähnlichkeit zu bereits geplanten Werkstücken besteht. Damit ist der gesamte Arbeitsplan neu zu erstellen.
2. **Anpassungsplanung** Bei der Anpassungsplanung unterscheidet sich der neue Planungsinhalt nur in Bezug auf Randbedingungen von einem bereits vorliegendem Arbeitsplan. Damit können einige Inhalte übernommen werden, während andere neu zu erstellen sind.
3. **Variantenplanung** Der Variantenplanung liegt ein Komplettteil zugrunde, das alle Merkmale der Teilefamilie beinhaltet. Der Planungsaufwand für die Variantenplanung übersteigt üblicherweise einmalig den der herkömmlichen Neuplanung. Dann lassen sich aber für alle Varianten der Teilefamilie entsprechende Arbeitspläne ableiten. Damit lohnt sich die Variantenplanung in der Regel erst ab einer hohen Zahl von Varianten.
4. **Wiederholplanung** Bei der Wiederholplanung kann ein gleiches Bauteil auf dieselbe Art und Weise wie sein Vorgänger hergestellt werden. Damit entfällt ein großer Teil der Arbeitsplanung. Der einzige Aufwand für den Arbeitsplaner entsteht durch organisatorische Tätigkeiten, wie das Finden und Bereitstellen der bestehenden Unterlagen oder die Ergänzung auftragspezifischer Daten.

Der kurz- und mittelfristige Anteil der Arbeitsplanung wird nach einer Definition der REFA als Arbeitsablaufplanung bezeichnet [51]. Nach Eversheim [16] ist die Arbeitsablaufplanung für die Fertigung und Montage wiederum in sechs Schritte zu untergliedern. Beginnend mit der Planungsvorbereitung folgt die Stücklistenverarbeitung, um danach parallel die Montageplanung und die Schritte der NC-Verfahrenskette zu bearbeiten. Die NC-Verfahrenskette beinhaltet die Prozessplanung, die Operationsplanung und die NC-Programmierung. Aufgrund ihrer Relevanz für die weitere Ausarbeitung werden diese drei Prozessschritte der Arbeitsplanung im Folgenden näher erläutert:

1. **Prozessplanung** In der Prozessplanung wird zuerst das Rohteil definiert, um dieses dann in der Prozessfolgeermittlung durch die Bestimmung von Arbeitsvorgängen auf planerischer Ebene schrittweise in das Fertigteil zu überführen. Der Detaillierungsgrad der Prozessfolgeermittlung beinhaltet die Definition der einzusetzenden Fertigungsverfahren unter Angabe der dafür notwendigen

Maschinen und Vorrichtungen. Häufig werden in der Prozessplanung auch Vorgabezeiten für die einzelnen Bearbeitungsschritte ermittelt. Die Ergebnisse der Prozessplanung werden in einem Arbeitsplan festgehalten.

2. **Operationsplanung** Ziel der Operationsplanung ist die weitere Ausgestaltung der Prozessfolgen in eine Abfolge von Bearbeitungsoperationen. Unter einer Bearbeitungsoperation ist dabei die „Bearbeitung einer zusammenhängenden Bearbeitungsstelle am Werkstück mit einem Werkzeug auf einer Maschine“ zu verstehen [4]. In der Operationsfolge werden die Bearbeitungsoperationen an sich und ihre Abfolge definiert. Dabei sind sowohl die Bearbeitungsbereiche mit den zur Bearbeitung notwendigen Spannlagen zu bestimmen, als auch die Bearbeitungsstrategien mit Werkzeug und Schnittwerten festzulegen.
3. **NC-Programmierung** Zur Fertigung des Werkstücks auf einer CNC-Fräsmaschine (Computerized Numerical Control) wird die Operationsfolge von der NC-Programmierung in ein Steuerprogramm überführt. Die NC-Programmierung beinhaltet die „Ermittlung aller geometrischen, technologischen und ablauforientierten Informationen“ auf Basis der Operationsplanung.

Die Ausprägung der aufgezeigten Struktur innerhalb der NC-Verfahrenskette hängt von dem Charakter der Anfertigung ab [16]. Im Gegensatz zur Serienplanung sind bei einer kleinen Stückzahl häufig die Grenzen zwischen der Operationsplanung und der NC-Programmierung fließend. Teilweise findet die dargestellte Aufgabenteilung auch keine organisatorische Berücksichtigung. Eine Organisationsform der NC-Programmierung, bei der Operationsplanung und NC-Programmierung zusammen durchgeführt werden, ist die Werkstattorientierte Programmierung (WoP). Besonders bei einfacheren Programmieraufgaben ist diese Form wirtschaftlicher und flexibler, da die Programmierung hauptzeitparallel vom Maschinenbediener vor Ort in der Werkstatt erfolgen kann. Nach Eversheim [16] ist auch „die Einbeziehung der Kompetenz des Facharbeiters bei der Programmerstellung (ein) wesentliches Ziel beim Einsatz von WOP-Systemen“. Eine wesentliche Grundlage für die WoP sind die Fortschritte bei den maschinengebundenen Programmiersystemen, die eine schnelle und komfortable Programmierung an der Fräsmaschine ermöglichen. Allerdings haben die WoP-Programmiersysteme den immer stärker wiegenden Nachteil, dass sie Insellösungen in der an Bedeutung gewinnenden durchgehenden CAx-Prozesskette darstellen.

## 2.2 Die NC-Programmierung im Kontext der CAx-Prozesskette

Unter der Abkürzung CAx werden alle Systeme zur Rechnerunterstützung von Arbeitsinhalten in einem Produktentstehungsprozess zusammengefasst. Dabei steht das CA in der Abkürzung für „Computer Aided“, während das x als Variable die unterschiedlichen Anwendungsfelder symbolisiert. Eine zentrale Rolle nehmen dabei Systeme des Computer Aided Designs (CAD) ein. Aufbauend auf den dort vom Konstrukteur erzeugten Geometriemodellen unterstützen eine Reihe von weiteren Systemen die Prozesse der Produktentstehung. So wird die NC-Programmierung durch Softwarelösungen des Computer Aided Manufacturing (CAM) insbesondere für komplexe Bauteile wesentlich vereinfacht.

Moderne CAM-Systeme bieten in der Anwendung eine Vielzahl von Funktionen zur Generierung und Absicherung der NC-Programme unter anderem für die spanende Fertigung an CNC-Maschinen. Des Weiteren wird die Dokumentation der NC-Programme, beispielsweise in Form von Werkzeuglisten oder Ansichten von den gewählten Aufspannungen unterstützt. In der folgenden Auflistung werden die wesentlichen, bei der NC-Programmierung eingesetzten Funktionsmodule beschrieben:

1. **Zyklenbibliotheken** Dem NC-Programmierer werden über die Zyklenbibliothek eine Auswahl an Strategien für die Erstellung von Bearbeitungsoperationen bereitgestellt. Der Anwender definiert die geometrischen Randbedingungen und hat Einfluss beispielsweise auf die An- und Abfahrbewegungen, die Werkzeugauswahl oder die Schnittwerte. Auf Basis dieser Eingaben werden entsprechend des ausgewählten Zyklus die Werkzeugwege berechnet und angezeigt.
2. **Technologiedatenbanken** In der Technologiedatenbank werden Informationen zu Bearbeitungsabläufen, Werkzeugauswahl inklusive der Aufnahmen, den Schnittwerten in Abhängigkeit vom Fräswerkzeug und dem zu bearbeitenden Material und weitere teilweise betriebsspezifische Angaben bereit gestellt. Über die Technologiedatenbank können bewährte Methoden allen Anwendern bereit gestellt und diese leicht in den Zyklen verwendet werden.
3. **Simulation** Moderne CAM-Systeme bieten die Möglichkeit zur Abtragssimulation sowie zur Kollisionsprüfung auf Basis eines Maschinenmodells. Bei der

Abtragssimulation wird ausgehend vom Rohteil der Abtrag der Fräswerkzeuge aufgrund der im NC-Programm definierten Verfahrenswege in zeitlicher Auflösung dargestellt. Das geometrische Endergebnis der Fräsbearbeitung kann bezüglich des Restmaterials analysiert werden, um eine noch bestehende Abweichung zum Fertigteil darzustellen. Für die Kollisionsprüfung werden die Verfahrbewegungen der Fräsmaschine an einem kinematischen Modell inklusive aller Werkzeugaufnahmen und Spannmittel simuliert und hinsichtlich einer unzulässigen Durchdringung der Körper bewertet. Dies dient zur Absicherung von komplexen Bearbeitungen besonders bei Fräsmaschinen mit mehr als drei Achsen.

4. **Postprozessoren** Mit Hilfe der Postprozessoren wird die im CAM-System erstellte Fertigungsstrategie mit den generierten Geometrie- und Technologieinformationen in ein maschinen- und steuerungsspezifisches NC-Programm überführt.

Die Funktionalitäten zur Automatisierung von Arbeitsabläufen innerhalb von CAM-Systemen werden an späterer Stelle im Abschnitt 2.3.1.2 behandelt. Ein weiterer Aspekt ist die Einbindung des CAM-Systems innerhalb der CAx-Prozesskette. Während bei konventionellen CAM-Systemen die notwendigen Geometrieinformationen des Bauteils über eine Schnittstelle zwischen dem CAD- und dem CAM-System ausgetauscht werden, sind in modernen CAx-Systemen beide Funktionsumfänge integriert. Dies hat den entscheidenden Vorteil, dass von den beteiligten Anwendern auf der gleichen Datenbasis gearbeitet werden kann und die Schnittstellenproblematik beim Datenaustausch zwischen getrennten Systemen entfällt. So wird beispielsweise bei nachgelagerten CAx-Anwendungen der Aktualisierungsaufwand aufgrund von Konstruktionsänderungen durch eine Assoziativität zwischen der CAD-Geometrie und den darauf aufbauenden Modellen zum Teil erheblich reduziert. Aufgrund der gemeinsamen Datenbasis können im CAM-System Referenzen auf Geometrien bereits erstellter NC-Programme aktualisiert und damit die Fräsbahnen der neuen Produktgestalt entsprechend berechnet werden. Dies ist allerdings nur in den Grenzen der vorab gewählten Fertigungsstrategie möglich. Bei der Integration des CAM-Systems in eine durchgehende CAx-Prozesskette ist des Weiteren kein separater CAD-Kern zur Aufbereitung des Bauteils oder der Baugruppe notwendig. So können erforderliche geometrische Elemente, wie zum Beispiel das Rohteil,

das NC-Achsensystem oder auch Stopflächen mit den nativen Funktionalitäten des CAD-Systems änderungsgerecht erzeugt werden.

## 2.3 Die technische und organisatorische Dimension von Wissen

Im folgenden Unterkapitel wird auf die Ressource Wissen unter zwei Blickwinkeln eingegangen: Zum einen werden Möglichkeiten und Vorgehensweisen aufgezeigt, wie vorhandenes Wissen in Softwaresysteme integriert werden kann. Nach einer allgemeinen Betrachtung des Knowledge-Based Engineering werden Methoden zur Wieder- und Weiterverwendung von Wissen in CAx-Systeme dargestellt. Der zweite Teil dieses Unterkapitels widmet sich der Frage, wie Schaffung neuen Wissens zu verstehen und zu steuern ist. Nach einer kurzen Einführung in die Grundlagen des Wissensmanagements wird der Begriff „Wissen“ in Abgrenzung zu den „Informationen“ definiert. Aufbauend werden mit der Wissensspirale von Nonaka et al. [41] und den Wissensbausteinen von Probst et al. [49] zwei Theorien des Wissensmanagements erläutert.

### 2.3.1 Integration von Wissen in CAx-Systeme

Die Integration von Wissen in Softwaresysteme ist in dem Themenfeld der Knowledge-Based Systems (KBS) zusammengefasst. Dabei ist festzustellen, dass der Übergang von „normaler“ Software zu KBS fließend ist. Es ist davon auszugehen, dass jedes sinnvolle Softwarekonzept auf Basis des Wissens um den bearbeiteten Sachverhalt erstellt wurde. Für Schreiber et al. ist die Art der Wissensrepräsentation in der Software entscheidend für die Abgrenzung von KBS zu „normaler“ Software. KBS zeichnet sich dadurch aus, dass hier das relevante Wissen in expliziter Form hinterlegt wird [56]. Auch Jackson betont dieses Merkmal in seiner Definition von KBS und sieht hier den Unterschied zu „normalen“ Systemen auf Basis algorithmischer oder statistischer Methoden:

„A knowledge-based system is any system which performs a task by applying rules of thumb to a symbolic representation of knowledge, instead of employing mostly algorithmic or statistical methods [29].“

Während KBS sich auf das ganze Spektrum der Informationstechnologie bezieht, grenzt der Begriff des Knowledge-Based Engineering (KBE) die Anwendung von KBS auf Fragestellungen des Ingenieurwesens ein [48]. Bei Penoyer et al. ist eine Gliederung der Anwendungsfelder von KBE-Systemen bei Problemstellungen im Konstruktionsprozess zu finden [45]:

### 1. **Generative Systeme**

Generative Systeme erzeugen detaillierte Geometrien auf der Basis integrierter Regeln, Bedingungen sowie Eingaben der Anwender. Anforderungen aus der Fertigung oder auch bezüglich der Kosten können derart in den generativen Systemen hinterlegt werden, dass diese Aspekte bei den generierten Lösungen abgesichert sind.

### 2. **Beratungssysteme**

Beratende Systeme beurteilen die aktuelle Lösung der Anwender direkt im Konstruktionsprozess und helfen so, Eigenschaften, wie beispielsweise die Fertigungsgerechtigkeit, die Stabilität oder auch die Herstellkosten geeignet zu berücksichtigen.

### 3. **Systeme zur Auswahlunterstützung**

Systeme zur Auswahlunterstützung helfen den Anwendern, wenn diese sich zwischen ähnlichen Lösungen entscheiden müssen. Dabei kann es sich zum Beispiel um die Festlegung des Materials für ein Bauteil oder um die Auswahl eines geeigneten Zukaufteiles aus einem umfangreichen Angebot handeln. Bei der Entscheidungsfindung können beispielsweise Einflussfaktoren, wie Kosten oder Lieferzeit entsprechend der situativen Anforderungen berücksichtigt werden.

Im Mittelpunkt der KBE-Systeme steht eine Wissensbasis in expliziter Form. Die Modellierung einer solchen Wissensbasis erfordert zumeist eine eingehende Wissensakquise im Fachbereich. Diese Arbeit wird von den Anwendern im Fachgebiet bisweilen einem Raub ihres Wissens gleichgesetzt. Die Aufgabe wird darin gesehen, möglichst viel Wissen aus den Köpfen der Menschen in einen Computer zu transferieren.

Dagegen steht aus Sicht von Schreiber et al. [56] bei der Wissensakquise die Modellierung der Wissensbasis klar im Vordergrund. Das Modell stellt eine zielgerichtete

Abstrahierung der Realität dar. Die Herausforderung bei der Wissensakquise ist es demnach, sich auf die wesentlichen Aspekte des Expertenwissens zu konzentrieren und die unwichtigen Anteile auszufiltern. Für ein Verständnis der Zusammenhänge bei einem KBE-Projekt ist eine Beschreibung der involvierten Rollen hilfreich. Dabei können verschiedene Rollen von einer Person übernommen werden. Im Folgenden werden diese Rollen kurz vorgestellt:

### 1. **Wissenslieferant**

Eine wichtige Rolle kommt den Spezialisten aus dem Fachgebiet zu. Bei ihnen liegt das Wissen um die Lösungsmethode für die zu bearbeitende Aufgabe. Dabei ist es entscheidend, die „richtigen“ Ansprechpartner zu finden. Diese sind im Fachgebiet nicht immer als Experten ausgewiesen. Inkompetente Informationsquellen können das Vorhaben gefährden.

### 2. **Wissens-Analyst**

Der Wissens-Analyst begleitet sämtliche Phasen des KBS-Projektes und ist für die Analyse und Aufbereitung des relevanten Wissens in einem Wissensmodell zuständig. Die Qualität der Ergebnisse sind entscheidend für den Erfolg des Vorhabens.

### 3. **KBS-Entwickler**

Das zuvor erarbeitete Wissensmodell wird von dem KBS-Entwickler umgesetzt. Der KBS-Entwickler ist dabei sowohl für das Softwarekonzept als auch für die Implementierung verantwortlich. Besonders in kleinen Projekten wird diese Rolle in Personalunion von dem Wissens-Analysten übernommen. Je stärker die Bearbeitung von KBS-Projekten zur Routine wird, desto ausgeprägter ist die personelle Trennung der beiden Rollen. Eine solche Aufgabenteilung erfordert allerdings von dem KBS-Entwickler ein Grundverständnis über die Vorgehensweise des Wissens-Analysten, um den Kern der Anforderungen zu verstehen.

### 4. **Anwender**

Der Wissensnutzer ist als Anwender direkt oder indirekt im nachfolgenden Prozess von dem KBS betroffen. Gerade bei der Automatisierung von wissensintensiven Tätigkeiten ist es sehr wichtig, diesen Personenkreis in den

Entwicklungsprozess zu integrieren. Sowohl bei der Gestaltung der Benutzerschnittstelle als auch zur Absicherung der Wissensanalyse gilt es, die Anwender frühzeitig mit einzubeziehen.

Es gibt ein breites Spektrum von KBE-Systemen. Während die ersten Systeme als eigenständige Software-Lösungen umgesetzt wurden, ist klar eine Entwicklung hin zur Integration in die CAx-Systemwelt zu erkennen. In den folgenden Abschnitten werden Methoden zur Wissensintegration beschrieben und im Kontext der CAM-Systeme konkretisiert.

### **2.3.1.1 Parametrik und Templates**

Die Einführung einer parametrischen Modellierungsstrategie im CAD ermöglicht es, sowohl Eigenschaften als auch interne und externe Abhängigkeiten des Produktmodells variabel zu definieren. Verschiedene Elemente werden dabei in Beziehung zueinander gesetzt. Es können beispielsweise geometrische Elemente mit entsprechenden Maßzahlen derart verknüpft werden, dass sich Änderungen auch auf die jeweils in Beziehung stehenden Elemente auswirken. Diese doppelt gerichtete Beziehung wird als bidirektionale Assoziativität bezeichnet und bildet die technische Grundlage parametrischer Beschreibungsverfahren [5].

Die Parametrik eröffnet die Möglichkeit einer änderungsgerechten Konstruktionsmethodik und damit das Potenzial zur Weiter- und Wiederverwendung bereits erbrachter Modellierungsarbeit. So kann eine Konstruktionsmethodik aus dem Kontext des konkreten Bauteils heraus gelöst und als Template in einem Vorlagenkatalog abgelegt werden. Zur Wiederverwendung kann das Template in einen neuen Kontext eingefügt und so der hinterlegte Modellierungsumfang automatisiert erstellt werden.

Des Weiteren können über Abhängigkeiten zwischen den Parametern Konstruktionsregeln im CAD-Modell hinterlegt werden. So kann der Konstrukteur beispielsweise bei einer Hohlwelle das Verhältnis von Durchmesser und Wandstärke über eine Formel definieren. Da Parameter auch nichtgeometrische Attribute beinhalten können, ist es in dem Beispiel möglich, das maximale zu erwartende Drehmoment an der Hohlwelle als Parameter abzulegen und in der Formel zu berücksichtigen.

### 2.3.1.2 Feature-Technologie

Unter Features versteht man nach der VDI-Richtlinie 2218 „informationstechnische Elemente, die Bereiche von besonderem (technischen) Interesse von einzelnen oder mehreren Produkten darstellen“ [73]. Die Feature-Technologie hat ihren Ursprung in der NC-Programmierung und fasst dort Geometrien zusammen, die mit einer Maschinenoperation zu bearbeiten sind [36].

In der Konstruktion dienen Features zur Definition von geometrischen Elementen in ihrem strukturellen Zusammenhang. So muss beispielsweise eine Bohrung mit Planeinsenkung nicht mit Hilfe einzelner geometrischer Elemente konstruiert werden, sondern kann aus einem Form-Feature instanziiert werden. Der Konstrukteur definiert die Position und Ausrichtung der Bohrung und bestimmt deren Abmessungen mithilfe von Parametern. Neben den geometrischen Informationen können in heutigen parametrisch-featurebasierten 3D-CAD-Systemen auch verstärkt technologische Angaben hinterlegt werden. Beim Beispiel der Bohrung können dies Informationen zur Passung oder zum Gewinde sein.

Feature bieten im CAM die Möglichkeit zur automatisierten Erstellung von NC-Programmen. Wenn die relevanten Gestaltungszonen in der Konstruktion nicht schon über Feature zusammengefasst und mit Fertigungsinformationen angereichert sind, besteht die Möglichkeit einer nachträglichen Feature-Erkennung. Dabei wird das Bauteil im CAM-System automatisch nach Bohrungen, Taschen, Nuten oder ähnlichen charakteristischen Geometriemerkmale überprüft und diese werden als Feature im Datenmodell abgelegt. Den identifizierten Features können dann automatisiert über die Technologiedatenbank auch komplexe Fertigungsabläufe zugeordnet werden [22].

### 2.3.2 Wissensmanagement

Der Begriff des „Knowledge Managements“ findet sich seit den 1970er Jahren in amerikanischen Publikationen und ist seit den 1990er Jahre auch Gegenstand deutschsprachiger Veröffentlichungen. In der Literatur gibt es allerdings weder ein einheitliches Verständnis zur Definition von Wissensmanagement [3] [28], noch gibt es allgemein anerkannte Standardwerke zu dem Thema [15]. Als Ursache kann angenommen werden, dass Wissensmanagement häufig in trivialer Form dem Managen von Wissen gleich gesetzt wird [28] und jede Disziplin die Thematik in ihrem Kontext betrachtet,

ohne dass ein gemeinsamer Kern oder eine geteilte Problemsicht erarbeitet wird [63]. Dementsprechend stehen im Bereich Wissensmanagement eine Vielzahl von Modellen nebeneinander. Eine Strukturierung der wesentlichen Modelle des Wissensmanagements findet sich bei Schmidt [53]: Er gliedert die unterschiedlichen Ansätze in vier Perspektiven und verdeutlicht damit auch die Bandbreite von Wissensmanagement.

**1. Informations- und kommunikationstechnologische Perspektive**

(das Lebenszyklusmodell von Rehäuser et al. [52])

**2. Managementperspektive**

(Bausteine des Wissensmanagements von Probst et al. [49])

**3. Innovationsperspektive**

(Wissensspirale von Nonaka et al. [41])

**4. Lern- und Entwicklungsperspektive**

(Systemisches Wissensmanagement von Willke et al. [81])

Aufgrund ihrer Relevanz im Kontext dieser Arbeit werden in den folgenden Abschnitten die Wissensspirale von Nonaka et al. und die Bausteine des Wissensmanagements von Probst et al. vorgestellt. Zuvor wird der Begriff des Wissens im Kontext der Forschungsfrage beleuchtet. Von besonderem Interesse ist dabei die Unterscheidung von Wissen und Informationen.

### **2.3.2.1 Wissen versus Informationen**

Aus Sicht der Forschungsfrage ist der Begriff Wissen unter dem Aspekt des Potenzials einer kontinuierlichen Verbesserung der Lösungsmethode durch die Anwender zu betrachten. Diese Arbeit folgt dabei der Definition von Nonaka et al. [41], in der Wissen als dynamischer menschlicher Prozess der Erklärung persönlicher Vorstellung über die Wahrheit verstanden wird und nach Vajna „einzelnen Individuen zu gehören“ scheint [72]. Auch für Probst et al. ist Wissen immer an den Menschen gebunden und lässt sich lediglich in Form von Informationen externalisieren [49]. Für Rehäuser et al. ist gerade im Zusammenhang mit den Möglichkeiten der heutigen Datenverarbeitung und Informationstechnologie wichtig, diese Begriffe zum Begriff Wissen abzugrenzen [52]. In der Praxis wird häufig zwischen Informationen und Wissen nicht trennscharf unterschieden. Nach Björkstrand/Lallimo ist hierfür

ursächlich, dass Informationen vom Menschen in der Regel unbewusst auf Basis von eigenen Erfahrungen in einen bestimmten Kontext gebracht und damit als Wissen interpretiert werden [9]. Zum Verhältnis von Wissen und Informationen führt Schüppel weitergehend aus, dass es sich:

„bei den Begriffen Wissen und Informationen [ ... ] um ein zusammenhängendes Begriffspaar mit beidseitigen Überlappungen, aber auch deutlichen Differenzen [handelt]. Information ist ein Strom von Daten, Botschaften und Bedeutungen, der das ‘objektive Rohmaterial’ des Wissens bildet. Informationen erweitern, verändern und restrukturieren somit permanent das individuelle Wissen, das aber [ ... ] immer von der interpretativen Rückbindung an vorhandenes Wissen [ ... ] abhängig bleibt. Wissen weist damit eine eindeutige subjektabhängige Prägung auf, was letztlich dazu führt, dass eine identische Ausgangsinformation nach individueller Perzeption zu vollkommen unterschiedlichen Wissensbausteinen transformiert werden kann [58].“

Die Beziehungen zwischen Daten, Informationen und Wissen werden von Probst et al. anschaulich in eine Begriffshierarchie gebracht. Demnach werden Zeichen durch Syntaxregeln zu Daten, welche sich über eine Semantik als Informationen erschließen lassen. Schließlich kann durch eine Verknüpfung der Informationen innerhalb eines Kontextes Wissen gewonnen werden [49]. Die Wissenstreppe von North erweitert dieses Zusammenwirken, wie in der Abbildung 2.2 dargestellt, um den Aspekt der Wissensanwendung[42]. Erst angewandtes Wissen auf Basis hinreichender Motivation kann sich seiner Meinung nach im Handeln manifestieren. Wenn dieses Handeln richtig bzw. erfolgreich ist, kann von Kompetenz gesprochen werden. Und wenn dann eine Organisation mit diesen Kompetenzen besser ist als andere, führt dies zu Wettbewerbsfähigkeit.

Neben der Definition spielt auch die Differenzierung des Begriffs Wissen bezogen auf verschiedene Wissensarten eine wesentliche Rolle für das vertiefende Verständnis. So unterscheidet Polanyi bereits seit 1962 zwischen explizitem und implizitem Wissen. Unter implizitem Wissen versteht er dabei nicht artikulierbares Wissen auf Basis von Beobachtungen, Erfahrungen oder Annahmen [46]. Nach Nonaka et al. enthält implizites Wissen sowohl technische als auch kognitive Elemente, wie zum Beispiel Paradigmen, Perspektiven und Überzeugungen [41]. Im Gegensatz dazu ist

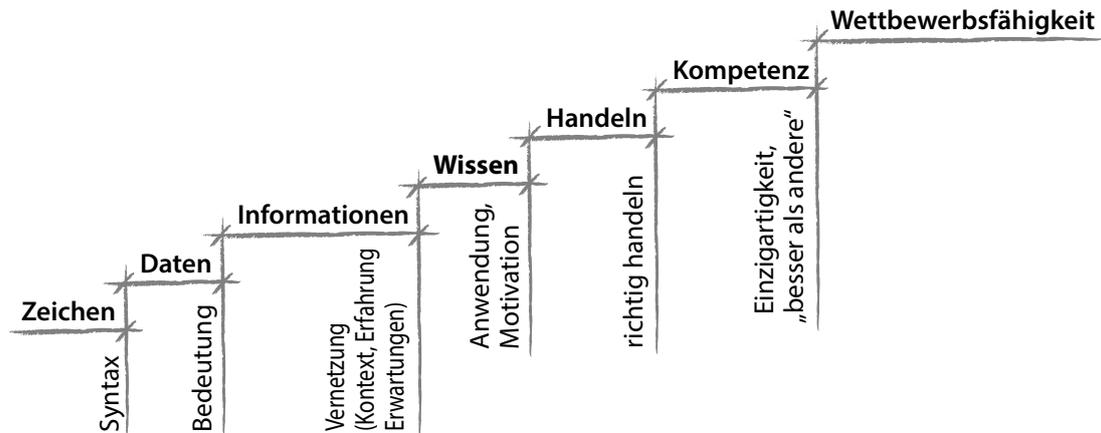


Abbildung 2.2: Begriffshierarchie nach North [43]

explizites Wissen formell artikulierbar und damit gemeinsam nutzbar [46]. Nach North ist explizites Wissen „außerhalb der Köpfe einzelner Personen in Medien gespeichert und kann unter anderem mit Mitteln der Informations- und Kommunikationstechnologie aufgenommen, übertragen und gespeichert werden“ [42]. Im Sinne einer Konsistenz der Aussagen ist dabei das Wissen, das außerhalb des Menschen gespeichert ist, als Information anzusehen. Die Unterscheidung von implizitem und explizitem Wissen wurde in später entwickelten Modellen differenziert [61]. Da eine vertiefende Betrachtung für die Arbeit nicht relevant ist, wird auf diese Darstellung verzichtet.

Das „Know-X“ Modell von Zahn et al. löst sich von den Kriterien explizit und implizit. Sie gliedern Wissen in die drei Wissensarten Know-how, Know-why und Know-what. Unter Know-how ist das Wissen über die Verknüpfung und dem Kontext von einzelnen Teilen eines bekannten Systems und deren Funktionsweise zu verstehen. Dabei handelt es sich zumeist um praktisches Wissen. Know-why erklärt die ursächlichen Wirkmechanismen, die dem Betrachtungsgegenstand zu Grunde liegen und ist damit grundsätzlicher als Know-how. Know-what beinhaltet schließlich das Gestaltungswissen zum Einsatz des Know-how und des Know-why. Zahn et al. heben insbesondere auf die Dynamik und die Veränderbarkeit bei den von ihnen genannten Wissensarten ab [84]. Bereits Nonaka et al. erklären Wissen als dynamische Größe und Stewart folgt ihnen, wenn er unterstreicht:

„Knowledge is appropriately dynamic because it is constantly changing through experience and learning. It is a powerful force that can be used

to overcome barriers, influence decision making, and generally 'enable' and refresh individuals and organizations so that they can accomplish goals and complete work successfully“ [65]

Bezogen auf diese Erkenntnisse zum Begriff Wissen folgt diese Arbeit der Einschätzung von McInerney, dass Wissensmanagement die dynamische Natur des Wissens berücksichtigen muss, wenn es erfolgreich sein soll [39].

### **2.3.2.2 Wissensspirale nach Nonaka et al.**

Nonaka et al. erklären mit ihrem Modell der Wissensspirale, wie in einer Organisation neues Wissen entsteht. Aus ihrer Sicht ist der Übergang zwischen explizitem und implizitem Wissen im Wechselspiel von Einzelpersonen und dem Kollektiv entscheidend. Sie gliedern den Prozess zur Schaffung neuen Wissens in „Sozialisation“, „Externalisierung“, „Kombination“ sowie „Internalisierung“ und sehen in der zyklischen Abfolge dieser vier Phasen die Grundlage für einen Wissenszuwachs. Die vier Formen der Wissensumwandlung werden nachfolgend näher erläutert [41]:

#### **1. Sozialisation**

Die Sozialisierung bezieht sich auf den Austausch von implizitem Wissen. Sie beruht auf den Prozessen Beobachtung, Nachahmung und Erfahrungsaustausch. Wichtig ist dabei ein gemeinsamer Erfahrungskontext. Ein Beispiel für die Sozialisierung ist die Meister-Lehrling Beziehung. Der Meister vermittelt seine Fertigkeiten in der Regel durch Vormachen, ohne sich aller Hintergründe seines Handelns bewusst zu sein. Der Lehrling ahmt ihm nach und sammelt dabei unter Anleitung eigene Praxiserfahrungen. Durch den Aufbau eines solchen Interaktionsfeldes entsteht - in Form von gemeinsamen mentalen Modellen und technischen Fertigkeiten - implizites Wissen.

#### **2. Externalisierung**

Bei der Externalisierung wird implizites Wissen in expliziten Konzepten bewusst gemacht. Es wird in Analogien, über Metaphern, durch Hypothesen und in Modellen artikuliert. Diese Ausdrucksformen sind zu Anfang häufig unausgereift und fördern gerade dadurch einen kreativen Prozess der Interaktion und Reflektion. Diese Phase ist für Nonaka et al. der „Schlüssel zur Wissensschaffung“ und führt zu konzeptuellen Wissen.

### 3. **Kombination**

In der Kombination wird explizites Wissen aus verschiedenen Bereichen innerhalb eines Wissenskomplexes miteinander verbunden. Der Wissensaustausch erfolgt dabei mittelbar über Medien oder unmittelbar zum Beispiel in Besprechungen oder Telefonaten. Durch „Sortieren, Hinzufügen, Kombinieren oder Klassifizieren“ von vorhandenem Wissen kann neues Wissen geschaffen werden. Dieser Prozess lässt sich durch digitale Informationsverarbeitung maßgeblich unterstützen.

### 4. **Internalisierung**

Internalisierung überführt explizites Wissen durch das Sammeln von eigenen Erfahrungen (bei seiner Anwendung) in implizites Wissen und steht damit dem Prinzip des „learnig by doing“ sehr nahe. Internalisierung führt zu operativem Wissen und schafft damit die Voraussetzung dafür, dass neues Wissen erzeugt wird. Damit wird auf der Unternehmensebene der nächste Zyklus der Wissensspirale initiiert.

Um die Wissensspirale zu aktivieren, sind einige Bedingungen im Unternehmen zu gewährleisten. Es muss ein „geeigneter Kontext zur Förderung von Gruppenaktivitäten und von Wissensschaffung auf individueller Ebene“ hergestellt werden. Als Voraussetzungen hierfür benennen Nonaka et al. „Intention“, „Autonomie“, „Fluktuation und kreatives Chaos“, „Redundanz“ und „Notwendige Vielfalt“. Diese Faktoren sind auch maßgeblich für eine Optimierung der Fertigungsstrategie durch die NC-Programmierer im Anwendungsprozess und werden demzufolge näher beschrieben:

#### 1. **Intention**

Intention meint das Streben eines Unternehmens nach dem Erreichen seiner Ziele, die in der Regel mit Strategien verbunden sind. Bezogen auf den Wissenserwerb schafft eine Unternehmensstrategie dabei eine Vision zu dem anzustrebenden Wissen und bietet die Möglichkeit, Wissen zu bewerten. So gesehen ist an die Intention die Steuerungsfunktion der Wissensspirale geknüpft.

#### 2. **Autonomie**

Mitarbeiter sollten unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen so autonom wie möglich handeln können. „Dies führt nicht nur zu unerwarteten Chancen, sondern fördert auch die Motivation zur Schaffung neuen Wissens.“

„Ein besonders wirksames Instrument zur Erzeugung eines autonomiefreundlichen Umfelds bietet das selbstorganisierende Team.“ Die Voraussetzungen für eine Selbstorganisation sind dabei nach Morgan definiert als „Lernen lernen, notwendige Vielfalt, minimale Vorgaben und fachliche Kompetenz“. [40]

### 3. **Fluktuation und kreatives Chaos**

Fluktuation führt in einem Unternehmen zu einem „Zusammenbruch“ von Routineabläufen. Wechselnde Mitarbeiter sorgen für einen Wissensaustausch innerhalb des Unternehmens sowie mit seinem Umfeld. Sie fördern einen Dialog, in dem Grundsatzfragen überdacht und neue Konzepte gefunden werden können. Den gleichen Effekt hat auch das mit einer Krise des Unternehmens einhergehende Chaos. Durch ehrgeizige Ziele der Unternehmensführung kann auch absichtlich ein kreatives Chaos verursacht werden. Die mit Chaos verbundenen Spannungen erzeugen aber nur dann verstärkt Wissen, wenn die Mitarbeiter die Fähigkeit zur Reflektion ihrer Handlungen besitzen.

### 4. **Redundanz**

Aus dem Austausch von Konzepten auch ohne einen direkten Bedarf des Empfängers resultiert eine Überschneidung von Informationen. Diese Redundanz vermehrt das explizite Wissen im Unternehmen und führt zu einer Internalisierung unter den Mitarbeitern. Redundanz kann zum Beispiel durch einen Wettbewerb zwischen konkurrierenden Teams oder durch strategische Personalrotation gefördert werden. Diese Investition in die Wissensschaffung kann mit einer geringeren Arbeitseffizienz einher gehen und bedeutet eine kurzfristige Kostensteigerung. Auch kann es zu einer Informationsüberlastung kommen. Deshalb ist es wichtig, die Lokalisierung von Informationen verbindlich zu klären und eine adäquate „Balance zwischen der Schaffung und dem Besitz von Informationen“ zu finden.

### 5. **Notwendige Vielfalt**

Wenn die Angehörigen einer Organisation eine ausreichende Vielfalt aufweisen, können viele Eventualitäten bewältigt werden. Nach Ashby muss die interne Vielfalt einer Organisation der Komplexität des Umfeldes entsprechen, um dessen Anforderungen gerecht zu werden [6]. Nach Nonaka et al. lässt sich die Vielfalt durch „flexible und schnelle Kombination von Informationen und

durch den gleichberechtigten Zugang aller zu einer breiten Palette erforderlicher Informationen in der gesamten Organisation“ maßgeblich erhöhen.

### **2.3.2.3 Wissensbausteine nach Probst et al.**

Das Modell der Wissensbausteine nach Probst et al. versteht sich als Leitfaden für Interventionen auf verschiedenen Ebenen eines Unternehmens in Bezug auf „Wissensprobleme“. Auf Basis einer Analyse in mehreren großen Unternehmen sind die vorgefundenen Problemstellungen in Kategorien zusammengefasst und in sechs Kernprozesse des Wissensmanagements überführt worden [49]:

#### **1. Wissensidentifikation**

Die Identifikation von Wissen wird als wesentlicher Bestandteil eines effektiven Wissensmanagements angesehen. Ziel ist es, das innerhalb und außerhalb des Unternehmens vorhandene Wissen transparent zu machen. Probst et al. stellen fest, dass Organisationen häufig zu wenig Kenntnisse über die internen Fähigkeiten, Wissensträger und Netzwerke sowie über das extern vorhandene Wissen verfügen. Aus der fehlenden Transparenz resultieren „Ineffizienzen, uninformierte Entscheidungen und Doppelspurigkeiten“. Eine mögliche Lösung sehen sie in der stärkeren Beachtung von internen und externen Netzwerken. Ihrer Meinung nach ermöglichen diese eine „schnelle und qualitativ hochwertige Identifikation von Informationen und Wissensträgern“. Der effektive Umgang mit der „Informationsflut“ in den Netzwerken wird als eine Schlüsselqualifikation zur Bewältigung von Intransparenz angesehen. Dem Mitarbeiter obliegt bei einem Informationsbedarf durchaus eine Holschuld. Die Organisation muss ihn dabei durch eine geeignete Infrastruktur bei seinen Such- bzw. Holaktivitäten unterstützen. Wissenstransparenz ist grundlegend für eine Identifikation von Wissenslücken und damit Voraussetzung für Entscheidungen zum Wissenserwerb oder einer Wissensentwicklung.

#### **2. Wissenserwerb**

Einen erheblichen Anteil ihres Wissensbedarfs decken Unternehmen aus externen Quellen zum Beispiel in Form von Outsourcing oder dem Einkauf von Beratungsleistung. Nach Probst et al. kann der Kontakt zum Kunden, Lieferanten oder auch Konkurrenten von den Unternehmen noch stärker zum Wissenserwerb genutzt werden. Bei der Rekrutierung von Experten oder der

Übernahme von besonders innovativen Unternehmen ist zwischen dem „Erwerb von direkt verwendbarem Wissen und der Akquisition von Wissenspotenzial zu unterscheiden“. Dabei ist darauf zu achten, dass dieses externe Wissen kompatibel zum internen Wissen ist, da „der Erwerb fremder Fähigkeiten häufig zu Abwehrreaktionen im Unternehmen“ führt.

### 3. Wissensentwicklung

Wissensentwicklung findet in allen Bereichen der Organisation statt und umfasst die „Produktion neuer Fähigkeiten, neuer Produkte, besserer Ideen und leistungsfähigerer Prozesse“. Wesentlich ist dabei die Auseinandersetzung mit der Frage, wie in dem Unternehmen mit neuen Ideen und allgemein mit der Kreativität der Mitarbeiter umgegangen wird. Nach Probst et al. wird Wissen „nicht nur bewusst entwickelt, sondern entsteht quasi auch als Nebenprodukt im täglichen Organisationsgeschehen. Das Bewusstsein über die Grenzen der Steuerbarkeit der Entwicklung von Fähigkeiten ist daher sehr wichtig“. Vorhandenes implizites Wissen mit hoher Relevanz für die Organisation ist in eine explizite Form zu überführen und damit bewusst und für andere nutzbar zu machen. Dies ist nicht in jedem Fall möglich und zum Teil mit hohen Kosten verbunden. Eine kollektive Wissensentwicklung beruht für Probst et al. im Wesentlichen auf Interaktion, Kommunikation sowie Transparenz und Integration.

### 4. Wissens(ver)teilung

Die zentrale Fragestellung der Wissens(ver)teilung lautet nach Probst et al. „Wer soll was in welchem Umfang wissen oder können und wie kann ich die Prozesse der Wissens(ver)teilung erleichtern?“ Der Fokus liegt dabei auf einer organisationsweiten Nutzungsmöglichkeit von zuvor isoliert vorhandenen Informationen oder Erfahrungen. So kann besonders durch eine unternehmensweite Berücksichtigung von Best Practices eine erhebliche Effizienzsteigerung erreicht werden. Dabei stößt Wissens(ver)teilung auf „individuell und kulturell verankerte Barrieren. Diese betreffen vor allem Macht- und Vertrauensfragen“. Für eine erfolgreiche Wissensverteilung bedarf es sowohl eines schlüssigen Verständnisses von Best Practice auf Seiten des Senders als auch der Aufnahmebereitschaft und -fähigkeit des Empfängers. Die Möglichkeiten in der technischen Umsetzung haben aufgrund des Fortschrittes in der Informations- und Kom-

munikationstechnologie stark zugenommen. Dabei sehen Probst et al. aufgrund bisheriger Erfahrungen in der „Kombination von Mensch und Technik in Form hybrider Systeme“ eine viel versprechende Lösung.

## 5. Wissensnutzung

Die Wissensnutzung ist der eigentliche Sinn und Zweck des Wissensmanagements. Erst wenn Wissen zu konkreten Resultaten innerhalb der Organisation führt, ergibt sich ein Mehrwert für das Unternehmen. Die alleinige Identifikation und Verteilung von Wissen garantiert noch nicht dessen Anwendung im Unternehmensalltag. Für ein erfolgreiches Wissensmanagement sind Nutzungsbarrieren zu überwinden. So erschweren zum Beispiel Faktoren wie „Betriebsblindheit“, „Angst vor Bloßstellung eigener Schwächen“ oder auch „prinzipielles Misstrauen gegenüber fremden Wissens“ eine Wissensnutzung. Für Probst et al. ist daher eine Nutzungsorientierung aller Bausteine des Wissensmanagements von zentraler Bedeutung. Es sollte ein unmittelbarer Handlungszusammenhang unter Berücksichtigung der Bedürfnisse des Anwenders gegeben sein.

## 6. Wissensbewahrung

Wissensbewahrung ist ein Prozess der „Selektion, Speicherung und Aktualisierung“ von Erfahrungen und Informationen. Ausgehend von der Erkenntnis, dass bereits erworbene Fähigkeiten der Organisation nicht automatisch auch in der Zukunft zur Verfügung stehen, besteht für Probst et al. der Bedarf von gezielter „Managementanstrengung“ zur Wissensbewahrung. Häufig wird bei Reorganisationen die „Bedeutung der Erfahrung von altgedienten Personen und eingespielten Prozessen“ unterschätzt. Dies führt zum Verlust von wichtigen Erfahrungen als Grundlage für zukünftige Lernprozesse. Im Zuge der Wissensbewahrung sind die Hintergründe für Erfolge aber auch für Misserfolge zu dokumentieren und für zukünftige Unternehmungen verwertbar zu machen. Dabei hängt die „Erinnerungsfähigkeit“ einer Dokumentation maßgeblich von dem „Grad seiner Strukturierung“ ab. Ohne einen definierten Aktualisierungsmechanismus ist allerdings jedes Wissenssystem zum Scheitern verurteilt. Die Möglichkeiten bei der technischen Umsetzung zur Wissensbewahrung sind durch den Fortschritt bei der Digitalisierung und einer nahezu unbegrenzten Speicherkapazität revolutioniert worden.



Wissensziele erreichten Erfolges verfügbar machen. Ein solches Feedback ist wesentlich für „wirksame Kurskorrekturen bei der Durchführung von längerfristigen Wissensmanagementinterventionen“. Bei der Bewertung zeigt sich auch, wie die Qualität der Zielvorstellung selbst beschaffen ist. Bei der Zieldefinition ist es wesentlich, auch die Möglichkeiten einer abschließenden Erfolgsbewertung zu beachten.

## **2.4 Die Standardisierung und das Potential der Ressource Mensch**

Das Instrument der Standardisierung spielt im Kontext der Forschungsfrage eine wichtige Rolle. Mithilfe einer Standardisierung werden Arbeitsinhalte der (Mit)Arbeiter im Produktentstehungsprozess festgelegt. Die Motivation zu dieser Promotion gründet auf der Überzeugung, dass mit einer Festlegung der Fertigungsstrategie ohne eine kontinuierliche Einbindung der Anwender zur Verbesserung derselben das Potenzial der Ressource Mensch nicht optimal genutzt wird. In ersten Abschnitt dieses Unterkapitels werden zwei gegensätzliche Formen der Standardisierung im Kontext der jeweilig zugrunde liegenden Menschenbilder aufgezeigt. Ausgehend von einer Betrachtung des organisierten Menschen in einem arbeitsteiligen Unternehmen wird das Scientific Management von Taylor sowie die Methode des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses auf Basis des Deming-Zyklus vorgestellt. Der Anspruch ist dabei nicht, eine umfassende Abhandlung zu dem Themenfeld zu liefern. Vielmehr soll mit den Hintergründen zum Kontinuierlichen Verbesserungsprozess neben der methodischen Grundlage des etablierten Managementkonzeptes auch die Auswirkungen eines positiven Menschenbildes vermittelt werden. Im Anschluss wird das Potenzial der Ressource Mensch am Phänomen der Communities of Practice aufgezeigt. Dabei wird auch verdeutlicht, welche Schwierigkeiten für das Management bestehen, auf diese themenspezifischen sozialen Netzwerke innerhalb einer Organisation Einfluss zu nehmen.

### **2.4.1 Der Mensch in der Organisation**

Der Begriff „Organisation“ ist im Brockhaus als „arbeitsteiliger Zusammenschluss von Menschen zur Vertretung gemeinsamer Interessen und zur Erreichung gemeinsamer Ziele“ definiert [1]. Organisationsstrukturen zur Umsetzung moderner Pro-

duktentstehungen, wie zum Beispiel in der Automobilindustrie, sind sehr komplex und unterliegen einer Vielzahl von Anforderungen. Die Prozessgestaltung innerhalb einer Organisation liegt in der Regel in der Verantwortung des übergeordneten Managements. Dabei folgt diese Arbeit der Definition von Management nach Steinmann/Schreyögg, die dieses als ein „Komplex von Steuerungsaufgaben, die bei der Leistungserstellung und Sicherung in arbeitsteiligen Systemen erbracht werden müssen“, beschreiben. Unumstritten ist, dass die Einbindung der Ressource Mensch innerhalb von Managementkonzepten eine entscheidende Rolle für die Leistungsfähigkeit einer Organisation spielt.

So hat sich bereits Taylor Anfang des 20. Jahrhunderts in seinem organisations-theoretischen Ansatz des Scientific Managements aus einer rein wirtschaftlichen Perspektive dem Thema „Unternehmensführung zugunsten einer Produktivitätssteigerung der Arbeiter“ genähert [64]. Zur gleichen Zeit erzielte auch Gilbreth mit seinen „Motion Study Principles“ beachtliche Erfolge durch die Analyse und Optimierung manueller Arbeitsabläufe [18]. Und spätestens seit der revolutionären Produktivitätssteigerung von Henry Ford bei der industriellen Automobilfertigung auf Basis des Scientific Managements haben sich eine Vielzahl weiterer Ansätze zur Unternehmensführung entwickelt. Das den verschiedenen Managementrichtungen zugrunde liegende organisatorische Denken ist wiederum gekennzeichnet von unterschiedlichen Zugängen zu dem, was ein „Menschenbild“ ausmacht.

McGregor verdeutlicht sehr prägnant den bestehenden Gegensatz über die Theorien „X und Y“. Beide Theorien können den Human Resource-Ansätzen zugeordnet werden, die sich insbesondere mit der Frage der „Motivation des Menschen“ auseinandersetzen. Dabei wird davon ausgegangen, dass traditionelle Organisationsstrategien den Menschen daran hindern, Initiative und Eigenverantwortung zu zeigen. Das heißt, um die Ressource Mensch wirtschaftlich optimal zu nutzen, müssten solche Organisationsstrukturen aufgebaut werden, die den Mitarbeitern eine Entfaltungsmöglichkeit bieten [57]. McGregor verdeutlicht dies, indem er das Menschenbild im Scientific Management (Theorie X) und - diesem diametral entgegengesetzt - ein idealistisches Verständnis vom Menschen im Sinne der Human Resource-Ansätze (Theorie Y) gegenüber stellt. Seine Ausführungen sind dabei weniger als eigenständige Theorien, sondern vielmehr als Führungsphilosophien zu lesen, um die Verantwortlichen zum Reflektieren über ihr Menschenbild anzuregen [8]. Dabei lassen sich auch neuere Managementstrategien zwischen diesen Extrema einordnen.

## 2.4.2 Scientific Management

Legt man die Theorie X nach McGregor zu Grunde, so besitzt der Mensch eine natürliche Abneigung gegenüber Arbeit und wird dementsprechend jede Form von Anstrengungen, wo immer es geht, vermeiden. Dabei kann seine Grundhaltung folgendermaßen zusammen gefasst werden: Verantwortung ablehnen und stattdessen die Ausführung von Routinetätigkeiten bevorzugen. Sein Handeln ist dabei durch Sicherheitsstreben und von fehlendem Ehrgeiz für übergeordnete Ziele gekennzeichnet. Folgt man dieser Arbeitshaltung, so ist das Management zu einem Führungsstil gezwungen, der die Arbeitsinhalte detailliert vorgibt und deren Erfüllung ebenso genau kontrolliert. Dabei ist zusätzlich davon auszugehen, dass für Menschen mit einer solchen Arbeitshaltung nicht allein die Entlohnung motivationsfördernd für die zuverlässige Verrichtung ihrer Arbeit wirkt. Deshalb werden neben Vorgaben und Kontrollen auch Sanktionen bei Nichterfüllung eingesetzt, um produktives Handeln im Sinne der Unternehmensziele herbeizuführen.

Nun folgert McGregor, dass der organisationstheoretische Ansatz des Scientific Managements insbesondere geprägt sei von diesem - in der Theorie X beschriebenen - Menschenbild. Taylor folgt diesem Menschenbild, wenn er den einfachen Arbeiter durch die systematische Trennung von Hand- und Kopfarbeit zum „Homo Oeconomicus“ [60] degradiert, den es durch genau vorgeschriebene Arbeitsinhalte möglichst effizient einzusetzen und zu kontrollieren gilt. Ganz im Sinne der Theorie X vertritt er die Meinung, eine große Mehrheit der Menschen habe „[a] natural instinct and tendency [...] to take it easy“ [68]. Die Folgen einer solchen Haltung beschreiben z.B. Blanke/Schuhmann, die darlegen, dass die Ausgestaltung der Prozesse nach dem Ansatz des Scientific Managements nicht selten zu einer „seelischen Verkrüppelung, die letztlich Arbeitszurückhaltung und Arbeitsverweigerung provoziert“ führt [10]. Die Unternehmensführung nach dem Scientific Management lässt sich aus folgenden vier Grundprinzipien herleiten [31] [12]:

### 1. **Analyse des Arbeitsprozesses**

Resultierend aus dem Glauben an den „einen besten Weg“ für alle Aufgaben innerhalb der Prozesskette, wird jeder Arbeitsschritt mittels Zeit- und Bewegungsstudien analysiert, die die Grundlage für feste Regeln zur Umsetzung der stark zergliederten Arbeitsabläufe bilden. Jede Bewegung der Arbeiter wird dabei als Ergebnis des Analyse- und Optimierungsprozesses in Form von Standards festgeschrieben.

### 2. **Auswahl des Personals**

Es gilt die physischen und psychischen Anforderungen jeder Aufgabe sowie die Fähigkeiten der Arbeiter genau zu analysieren, um so eine geeignete Zuweisung der Arbeiten zu ermöglichen. Dabei sind die Limits der Mitarbeiter zu ermitteln und durch gezieltes Training positiv zu beeinflussen.

### 3. **Finanzielle Anreize**

Nur finanzielle Anreize und Strafen können die Arbeiter zur Einhaltung der Regeln motivieren [7]. Die Bezahlung erfolgt in Abhängigkeit zur Leistung. So wird für den Arbeitsumfang jedes Mitarbeiters ein Tagessoll festgelegt, für dessen Erreichung ein Bonus gezahlt wird [27].

### 4. **Die Trennung von Hand und Kopfarbeit**

Die Arbeiter führen nur aus, was im Vorfeld von den so genannten Leitenden geplant und vorbereitet wurde. Diese kontrollieren auch die korrekte Umsetzung der Vorgaben.

Aus der Sicht von Taylor kann eine Organisation mithilfe des Scientific Managements genauso konstruiert und optimiert werden wie eine Maschine. Der Arbeiter als Teil der Organisation hat seine ihm zugeteilte Funktion zu erfüllen. Die Ressource Mensch ist dann optimal eingesetzt, wenn sie sich dem System anpasst und die vorgegebenen Abläufe nicht stört.

Aus der Sicht von McGregor trägt Taylors Organisationsverständnis im Allgemeinen und insbesondere seine Auffassung über die Ressource Mensch nicht. Er lehnt das von ihm in der Theorie X skizzierte Menschenbild ab und sieht die Ursache für das passive Verhalten der Arbeiter in dem wenig motivierenden Führungsstil des Scientific Managements. Dies führt seiner Meinung nach zu einem Teufelskreislauf zwischen demotivierten Arbeitern und solchen Führungskräften, die sich in ihrem

Menschenbild bestätigt sehen und mit einer Verschärfung der Regelungen reagieren. Aus heutiger Perspektive übersteigen die negativen Auswirkungen eines Produktionssystems im Sinne des Scientific Managements dessen positive Eigenschaften [77].

### 2.4.3 Deming Zyklus - KVP

Der Mensch ist nach der Theorie Y leistungsbereit und hat von Natur aus eine positive Einstellung zur Arbeit. Die Selbstverwirklichung in der Arbeit ist für den Menschen ein wichtiger Beitrag zur persönlichen Befriedigung. Wenn sich der Mitarbeiter mit den Zielen seines Unternehmens identifiziert, ist sein Handeln geprägt von Eigeninitiative und Selbstkontrolle. Daher ist es die Aufgabe des Managements, die Mitarbeiter - zum Beispiel durch die Vergabe von verantwortungsvollen Aufgaben in selbstbestimmter Gruppen- und Projektarbeit - zu fördern und zudem geeignete Rahmenbedingungen für ein kreatives Arbeiten zu schaffen.

Im Gegensatz zum Teufelskreislauf der Theorie X sieht McGregor bei Managementansätzen nach der Theorie Y einen positiven Effekt zwischen Menschenbild und Motivation der Mitarbeiter. Das Vertrauen in die Fähigkeiten der Menschen veranlasst diese zu einem verstärkten Engagement. Diese Meinung teilt auch Deming, der in seinem System vom „Umfassenden Wissen“ die psychologische Einfühlungs-gabe als wichtigen Faktor für ein erfolgreiches Management aufführt: „Produkte und Dienstleistungen werden vom Menschen geschaffen. Jeder Mensch ist aber ein Unikat und verfügt über unabsehbare Möglichkeiten, denen sich viele - mangels Selbstbewusstseins - gar nicht bewusst sind. Das unermessliche Potenzial an Kenntnissen, Kreativität und Tatkraft kann genutzt werden, wenn der Mensch gefördert statt frustriert wird.“ Für Deming ist nicht nur das Handeln der Menschen, sondern auch ihre Gedanken, Gefühle und Empfindungen elementarer Bestandteil der Prozesse. Für eine effiziente Einbindung der Ressource Mensch in die Organisation ist ein Arbeitsumfeld erforderlich, welches „dem Menschen Stolz auf seine Leistung zu vermitteln vermag“ [11]. Die elementare Aufgabe des Managements liegt „in der Unterstützung und Beratung der Mitarbeiter sowie in der Beseitigung arbeitshemmender Faktoren“ [87].

Ein wesentlicher Aspekt der Managementregeln von Deming besteht in der Erkenntnis, dass es - im Gegensatz zu Taylors Auffassung - kein optimales System gibt. Er folgert daraus die Notwendigkeit, kontinuierlich nach einer Verbesserung der Produktqualität, einer Steigerung der Produktivität und gleichzeitig nach einer

Senkung der Herstellungskosten zu streben [11]. Mit dieser Intention hat Deming den dreistufigen Zyklus aus „specification, production und inspection“ von Shewhart zum PDCA - Zyklus weiterentwickelt. Dessen Schritte „plan, do, check und act“ sind die Grundlage des Kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) und als solcher fester Bestandteil vieler moderner Managementstrategien.

Dieser KVP-Zyklus, ist auch unter dem japanischen Namen Kaizen bekannt und wird von Deming nicht nur als Methode, sondern vielmehr als eine essentielle Grundhaltung aller Organisationsmitglieder verstanden [75]. Im Folgenden sollen die einzelnen Phasen des „Deming-Zyklus“ näher erläutert werden. Eine wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung aller dargestellten Phasen ist die Einbindung der Mitarbeiter vor Ort sowie ihre Befähigung zur Durchführung des KVP. Auch sind die jeweils gültigen Arbeitsinhalte in Standards festzuschreiben.

#### 1. **Plan**

Inhalt der „Plan“-Phase ist die Konkretisierung des Verbesserungspotenzials in Form neuer oder modifizierter Konzepte. Sie beruhen auf Analysen des bisherigen Prozesses und greifen Ideen und Erfahrungswerte der Mitarbeiter auf.

#### 2. **Do**

In der „Do“-Phase wird das erarbeitete Konzept versuchsweise umgesetzt und in der praktischen Anwendung optimiert. Dabei wird versucht, den notwendigen Aufwand zum Beispiel durch die Umsetzung an einem einzelnen Arbeitsplatz mit einfachen Mitteln so gering wie möglich zu halten.

#### 3. **Check**

Die Ergebnisse der testweisen Umsetzung werden in der „Check“-Phase sorgfältig überprüft und bei Eignung als neue Arbeitsweise in den Standards festgeschrieben. Zu beachten ist dabei, dass die ausführenden Mitarbeiter bei der Festlegung ihrer Arbeitsweise beteiligt werden.

#### 4. **Act**

In der „Act“-Phase wird die in den Standards festgelegte Arbeitsweise umfassend eingeführt. Dazu sind sämtliche Voraussetzungen zu erfüllen. Auch wird nach der Umsetzung überprüft, ob sich die Erwartungen an das Verbesserungspotenzial erfüllt haben und es wird, auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse, der nächste Zyklus eingeleitet.

## 2.4.4 Communities of Practice

Communities of Practice sind informelle Gruppen, die sich auf Basis gemeinsamer Interessen bilden [79]. Das Phänomen der CoP selbst ist nicht neu. Während sich vor Jahrhunderten aber vornehmlich Selbstständige zum Beispiel in Zünften oder Ärztezirkeln vernetzten, werden in der aktuellen Forschung zumeist informelle Strukturen zwischen Mitgliedern einer Organisation diskutiert [80]. Entsprechend des breiten Spektrums an Organisationsformen gibt es keine allgemein anerkannte Definition von Communities of Practice [55]. Der Fokus dieser Ausarbeitung liegt auf CoP im Produktentstehungsprozess arbeitsteiliger Unternehmen. Zu diesem Kontext passend findet man bei Snyder folgende Beschreibung:

„Communities of practice consist of people who are informally as well as contextually bound by a shared interest in learning and applying a common practice. Their focus on learning, competence, and performance bridges the gap between organizational learning and strategy topics and generates new insights for theory and practice [62].“

Der Begriff „Communities of Practice“ ist im Jahr 1990 von Lave und Wenger in ihrer „Sozialen Theorie des Lernens“ geprägt worden. Von dem anfänglichen Konzept im Kontext der sozio-kulturellen Lerntheorie entwickelte sich das Thema CoP zu einem etablierten Forschungsgegenstand [34] [85]. Im Zuge der Einführung von Wissensmanagement in die unternehmerische Praxis verbreitete sich auch das Verständnis um die Bedeutung von CoP im Management einiger Unternehmen [17]. Zur Abgrenzung von anderen Gemeinschaftskonzepten definiert Wenger folgende drei Merkmale als notwendige Bedingungen einer CoP [78]:

1. **The domain:** Die Mitgliedschaft zu einer CoP bedingt ein Mindestmaß an Wissen bezüglich des betreffenden Fachgebietes. Eine gemeinsame Kompetenz unterscheidet die Mitglieder von außenstehenden Personen.
2. **The community:** Die Menschen in einer CoP formen auf freiwilliger Basis eine Gemeinschaft auch über die internen Strukturgrenzen der Organisation hinweg. Das geteilte Interesse ist die Basis für gemeinsame Aktivitäten und Diskussionen. Die Mitglieder helfen einander und tauschen Informationen aus.

3. **The practice:** Die Mitglieder entwickeln ein gemeinsames Repertoire an Erfahrungswerten, Werkzeugen und Vorgehensweisen im Umgang mit wiederkehrenden Problemen. Dabei braucht der Aufbau einer solchen Wissensbasis Zeit.

Der Nutzen einer CoP für das Unternehmen ist zweistufig zu bewerten. Zum einen hilft das Netzwerk den Mitgliedern dabei, ihre Aufgaben im Geschäftsprozess besser zu erfüllen [17]. Zum anderen trägt der Austausch und der damit verbundene Erkenntnisgewinn zu einer Vergrößerung der organisationalen Wissensbasis bei [55]. O'Donnell et al. beschreiben den Effekt einer CoP in Abgrenzung zur Aufgabenbearbeitung im Team wie folgt:

„Unlike teams, CoPs are typically driven by the value that they provide to individual members. Members share information and insights and discover ideas - this saves them time, money, energy and effort. Whereas a team delivers value in the result that it produces, a CoP discovers value in the diverse day-to-day processual exchanges of data, information, know-how and fellowship. The heart of a team is the set of interdependent tasks that leads to a predetermined outcome. The heart of a CoP, on the other hand, is the processual know-how that members share, critically evaluate, and develop [44].“

Ogleich der Vorteil für das Unternehmen unumstritten ist, liegt die Kontrolle über dieses Phänomen nur sehr bedingt in den Händen des Managements. So wird in den Veröffentlichungen zu dem Thema häufig in Frage gestellt, ob eine CoP von außen überhaupt initiiert werden kann [37] [85]. Von Krogh führt zum Spannungsfeld zwischen dem Potential einer CoP und dem Einfluss des Management folgendes aus:

„ [ ... ] the intention to manage communities and turn them into high-performing communal resources for the organization might easily fail. Communities are then resources, when they display a certain level of voluntary action and self-organization, and they do not fit well with outside authority, monitoring, and punitive action. However, there should be ways to enable the development of communal resources, of which one is the support of information systems. Information systems enable communities to overcome time and space constraints in knowledge sharing and increase the speed and range of access to information [74].“

Wenger et al. empfehlen dem Management folgenden Erkenntnisprozess in drei Schritten, um die vorab geschilderte Herausforderungen im Umgang mit dem Phänomen der CoP zu meistern:

„ [ ... ] The first step for managers now is to understand what these communities are and how they work. The second step is to realize that they are the hidden fountainhead of knowledge development and therefore the key to the challenge of the knowledge economy. The third step is to appreciate the paradox that these informal structures require specific managerial efforts to develop them and to integrate them into the organization so that their full power can be leveraged [80].“

# Kapitel 3

## Stand der relevanten Forschung

In diesem Kapitel wird der Stand der relevanten Forschung dargestellt, im Kontext der Forschungsfrage diskutiert und anschließend der Forschungsbedarf abgeleitet. Darauf aufbauend wird die Arbeitshypothese formuliert.

### 3.1 Stand der relevanten Forschung

Mittlerweile gehören Funktionen zur weitgehend automatisierten Erstellung von NC-Programmen zum Stand der Technik. Alle wesentlichen CAD/CAM-Systeme auf dem Markt ermöglichen eine Wiederverwendung von Fertigungswissen via Template, Feature-Technologie oder Programmierschnittstelle [26] [86] [59] [69] [30]. Wie aktuelle Forschungsbeiträge aufzeigen, besteht allerdings unter dem Gesichtspunkt einer Integration dieser Funktionalitäten in den Gesamtprozess Handlungsbedarf [54] [33] [13]. Aufbauend auf den systemübergreifenden Standard STEP-NC behandeln eine Vielzahl von Forschungsarbeiten dieses Themenfeld [83] [67] [24] [66].

Im Kontext dieser Arbeit ist der Ansatz von Kretzschmann von besonderem Interesse. Während die meisten Konzepte von einer eindeutigen Zuordnung der Bearbeitungsoperationen zu den Geometrieelementen ausgehen, führt Kretzschmann in seiner Dissertation eine Gesamtkostenfunktion zur Auswahl der optimalen Lösung aus alternativen Fertigungsstrategien ein [33]. Sein Automatisierungskonzept basiert auf einer „stets erweiterbaren Wissensbasis“ mit dem Anspruch einer „Wiederverwendung und damit die Rückführung von Mitarbeiterwissen aus allen Bereichen der NC-Verfahrenskette“. Im Folgenden wird der Forschungsbeitrag von Kretzschmann mit dem Titel „Entwicklung eines automatisierten CNC-Prozessketten-Generators

für spanende Werkzeugmaschinen“ vorgestellt und anschließend in Bezug auf die Forschungsfrage dieser Dissertation diskutiert.

Das grundlegende Ziel der Dissertation von Kretzschmann ist eine Aufwandsreduktion durch die Automatisierung der CNC-Prozesskettengenerierung sowie „die Verringerung von Fertigungskosten, die Verkürzung der Durchlaufzeit sowie die Erhöhung von Produktivität und der Effizienz der genutzten Fertigungsanlagen“. Unter einer CNC-Prozesskettengenerierung versteht Kretzschmann die Erstellung eines NC-Programms auf Basis der NC-Verfahrenskette. Die Arbeit bezieht sich auf ein Teilespektrum aus der Luft- und Raumfahrt, sowie dem Werkzeug- und Formenbau, welches durch zerspanende Fertigungsverfahren nach DIN 8589 bearbeitet wird.

Aufbauend auf einer ausführlichen Untersuchung des Forschungsstands leitet Kretzschmann die für ihn entscheidenden Handlungsfelder ab. Ausgehend von der Erkenntnis, dass es entlang der NC-Prozesskette einschließlich der Fertigung aufgrund von ungünstigen Schnittstellen zu Defiziten im Informationsfluss kommt, ist für ihn eine „höherwertige Informationsversorgung in der NC-Verfahrenskette“ wesentlich: „Es ist ersichtlich, dass die Nutzung der Erfahrungswerte der Mitarbeiter einen wesentlichen Erfolgsfaktor in der NC-Verfahrenskette darstellt.“ Weiter besteht für ihn Handlungsbedarf zugunsten einer „transparente[n] und vollständige[n] Vorgehensweise zur CNC-Prozessketten-Generierung unter Nutzung aller Fertigungsressourcen“ auf Basis einer „Automatisierung von Entscheidungsfunktionen zur Handhabung von Alternativen“.

Basis für die Automatisierung ist eine Feature-basierte Werkstückbeschreibung. Den in der Konstruktion anzuwendenden oder nachträglich zuzuordnenden Design-Features sind in der objektorientierten Wissensbasis Fertigungs-Features zugeordnet. Dabei beinhaltet ein Fertigungs-Feature alle notwendigen Informationen, um die in dem Design-Feature zusammengefasste Bauteilgeometrie spanend zu fertigen. Hierzu sind mitunter verschiedene Bearbeitungsoperationen in einer definierten Reihenfolge notwendig, welche als eigene Klassen die Unterstruktur eines Fertigungs-Features bilden. Über die Klasse Bearbeitungseigenschaft werden wiederum den Bearbeitungsoperationen spezifische Eigenschaften zugeordnet. Diese Eigenschaften sind anhand diverser Kriterien strukturiert. Die Kriterien wiederum entsprechen Kennzahlen, anhand derer eine Bewertung der Bearbeitungsoperation an sich sowie im Kontext der Vorgänger- und Nachfolgeroperation erfolgen kann. Kretzschmann führt in seiner Ausarbeitung 15 Kriterien zur Bewertung der Bearbeitungseigenschaften auf und

ordnet diesen die im Prozess möglichen Bestimmungsarten subjektiv, objektiv sowie direkt oder indirekt zu:

1. Oberflächenrauigkeit: subjektiv/objektiv, direkt
2. Kritische Oberflächenveränderungen: subjektiv/objektiv, direkt
3. Zerspankraft: objektiv, direkt
4. Kritische Geräusche: subjektiv, indirekt
5. Kritische Spanverfärbungen und Spanformen: subjektiv, indirekt
6. Kritische Vibrationen: subjektiv/objektiv, indirekt
7. Kritische Gerüche: subjektiv, indirekt
8. Werkzeugverschleiß: objektiv, direkt
9. Werkzeugbruch: objektiv, direkt
10. Maschinenstunden: objektiv, direkt
11. Bearbeitungszeit: objektiv, direkt
12. Werkzeugpfadlänge/Werkzeugstandzeit: objektiv, direkt
13. Laufzeit: objektiv, direkt
14. Werkzeugeingriffszeit: objekt, direkt
15. Häufigkeit der Auswahl der Operationen: direkt

Neben den bereits genannten Klassen führt Kretzschmann in seiner Datenbasis weiterführend ein Werkstück-Modell, ein Strategie-Technologie Modell, ein Werkstück-Bearbeitungs-Modell und ein CNC-Prozessketten-Modell mit den hierdurch repräsentierten Klassen ein. Da diese Bestandteile im Gegensatz zu den vorab genannten Kriterien für die weitere Ausarbeitung von untergeordneter Bedeutung sind, wird hier auf eine detailliertere Erläuterung verzichtet.

Das eigentliche System zur automatisierten CNC-Prozessketten-Erstellung umfasst folgende Funktionseinheiten: Zuerst werden alternativ mögliche CNC-Prozessketten auf Basis der vorab genannten Klassen anhand einer Gesamtaufwandfunktion

bewertet. Ziel ist es, die Lösung mit dem geringsten Aufwand in der Haupt- und Nebenzeit zu finden. Dabei erfolgt automatisiert eine Reihenfolgenfestlegung, eine Operationsauswahl und eine Reihenfolgenumordnung. Um die Komplexität und damit den Zeitbedarf dieser Teilfunktionen zu reduzieren, erfolgt die Berechnung mit partiell heuristischen Algorithmen. Die Funktionstüchtigkeit dieses Konzeptes wird mit Hilfe eines Demonstrators in einem experimentellen Umfeld anhand von vier verschiedenen Prüfgeometrien belegt. Der Arbeitsaufwand zur Generierung der CNC-Prozessketten wird in der Beispielanwendung um über 80 Prozent reduziert. Auch wird belegt, dass die mit dem entwickelten Automatismus gefundene Fertigungsstrategie jeweils die „optimale CNC-Prozesskette“ darstellt.

Sowohl die Forschungsfrage von Kretzschmann als auch die von ihm betrachtete Domäne sind weitgehend mit denen dieser Dissertation vergleichbar. Der im ersten Kapitel am Beispiel der Standard-Modulsegmente heraus gestellte Handlungsbedarf ist weit vor der Veröffentlichung von Kretzschmanns Dissertation im Jahr 2010 definiert worden. Um so spannender ist es, die Ergebnisse von Kretzschmann in diese Ausarbeitung einfließen zu lassen. Kretzschmann folgt in seiner Arbeit der Forderung von Baumgartner, dass es „eine entscheidende Rolle spielen wird, das Mitarbeiterwissen als Expertenwissen zur Anwendung der CAM-Systeme dauerhaft als globale Wissens- und Technologienetzwerke zur Wiederverwendung zu sichern.“ Seine Umsetzung folgt allerdings dem an anderer Stelle formulierten Verständnis, dass „das Wissen der Mitarbeiter zur CNC-Prozessketten-Generierung strukturiert und dauerhaft in einer Datenbasis bzw. Wissensbasis abgelegt werden“ muss. Damit verliert das Konzept an Dynamik und unterstützt nicht das Potential eines Netzwerkes, wie beispielsweise einer CoP, zur Optimierung der Fertigungsstrategie. Der Fokus von Kretzschmanns Arbeit liegt darin, automatisiert in einem neuen Bauteilkontext aus einem Katalog bekannter Bearbeitungsoperationen die optimale Fertigungsstrategie zu generieren. Die Motivation dieser Dissertation ist es, eine Automatisierung wie beispielsweise von Kretzschmann umgesetzt mit der Möglichkeit zu vereinen, dass die Anwender konzeptionell neue Lösungen generieren und zur Wiederverwendung in das KBE-System einbringen. Dieser Anspruch wird zwar auch von Kretzschmann als Anforderung an die Wissensdatenbank formuliert: „Die leichte und unkomplizierte Pflege der Wissensbasis ist ein entscheidender Faktor zur Aktualität und Usability des Systems“. Die vorgestellte Lösung wird aber diesem Anspruch nicht ausreichend gerecht. Interessant an der Wissensbasis von Kretzschmann ist allerdings die

Möglichkeit zur Darstellung von Mehrdeutigkeiten bzw. Alternativen: „Das Konzept beruht darauf, dass alternative CNC-PK zur Fertigung des gleichen Werkstücks genutzt werden. Die Repräsentation von Mehrdeutigkeiten und Alternativen ist daher entscheidend in der Wissensbasis.“ Bemerkenswert ist hier die Parallele zum Modell der Wissensspirale nach Nonaka et al., in der Redundanz als eine wesentliche Voraussetzung für die Schaffung von neuem Wissen angesehen wird. (vergleiche hierzu auch Abschnitt 2.3.2.2 auf Seite 22)

Im Gegensatz zum Forschungsbeitrag von Kretzschmann stehen in der Dissertation von Schneider mit dem Titel „Automatisierte Akquisition von erfahrungsbasiertem Fertigungswissen im Werkzeug- und Formenbau“ das Wissen der Mitarbeiter im Fokus [54]. Wie auch dem Titel zu entnehmen ist, betrachtet dieser Forschungsbeitrag gleichfalls die Domäne des Werkzeug- und Formenbaus. Schneider betont in seiner Einleitung die besondere Bedeutung der Mitarbeiter in dieser Domäne: „Aufgrund des hohen Niveaus der Fertigungsaufgaben wird die Mitarbeiterstruktur in Werkzeug- und Formenbaubetrieben generell durch hochqualifizierte Facharbeiter dominiert, die einen Großteil der firmenspezifischen Fertigungskompetenz halten und somit einen nicht zu unterschätzenden Unternehmenswert darstellen.“

Nach Schneider resultieren aus der „individuelle(n) Haltung erfahrungsbasierten Fertigungswissens meist mehrere Lösungsalternativen für gleiche Bearbeitungsaufgaben durch die Werkstattprogrammierer [...] Folglich existiert auch keine einheitliche Grundlage, die gezielte Optimierungen der spanenden Fertigungsprozesse zulässt.“ Dem entsprechend verfolgt er in seiner Arbeit die Zielsetzung einer „zentrale(n) Haltung sowie die konsequente, automatisierte und personenunabhängige Anwendung des betriebsspezifischen Fertigungswissens“. Schneider sieht darin einen „entscheidenden Faktor des wirtschaftlichen Erfolgs“ für den Werkzeug- und Formenbau. Aus seiner Sicht ist die dafür notwendige „ganzheitliche methodische Unterstützung zur automatisierten Akquisition, expliziten Repräsentation sowie rechnerverarbeitbarer Speicherung von Fertigungswissen im Rahmen der CAD/CAM-gestützten Operationsplanung [...] nicht vorhanden.“ Der Ansatz von Schneider gliedert sich „in die Hauptschritte Datenbeschaffung, Analyse der Wissensdomäne, Automatisierte Wissensakquisition und Standardisierung. Die ermittelten Standards bilden schließlich die Grundlage für die Automatisierung von Routinetätigkeiten bei der CAD/CAM-gestützten Operationsplanung, eine hohe Transparenz der Fertigungsprozesse, die Nutzbarkeit des Wissens in vorgelagerten Tätigkeitsfeldern der NC-Verfahrenskette

sowie die gezielte Identifizierung und Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen.“ Die Standardisierung erfolgt dabei über Häufigkeiten in der bisherigen Anwendung und berücksichtigt keine explizite Rückmeldung zur Güte der Fertigungsstrategien aus der Werkstatt.

Auch Schneider verbindet in seiner Dissertation das Ziel einer automatisierten NC-Programmerstellung mit der Optimierung der Fertigungsstrategie an sich. Er spricht den Facharbeitern Fertigungskompetenz zu, verfolgt aber mit seinem Ansatz die personenunabhängige Anwendung des Fertigungswissens. Für ihn ist Lösungsdiversität gleichzusetzen mit einer Barriere für die gezielte Optimierung der spannenden Fertigung. In seiner Ausarbeitung legt er das Hauptaugenmerk auf den Umgang mit dem Datenbestand bisher erzeugter NC-Programme und nicht dem Wissen und der Kompetenz der im Prozess involvierten Menschen. Dies zeigt sich auch in seiner Zusammenfassung: „In der Konsequenz kann so eine Entlastung des NC-Programmierers von Routinetätigkeiten erreicht und der Schwerpunkt seiner Tätigkeit auf kreative Aufgaben, wie etwa der Bestimmung von Fräsbereichen oder der fertigungsgerechten Aufbereitung der CAD-Geometrie, gelegt werden.“ Der Ansatz, durch die Automatisierung von Routinetätigkeiten Freiraum für kreative Aufgaben zu schaffen, wird in dieser Arbeit geteilt. Aber seine Beispiele kreativer Tätigkeiten für kompetente NC-Programmierung sind symptomatisch nicht nur für diesen Forschungsbeitrag. In der Ausarbeitung von Schneider gibt es keinen ernstzunehmenden Ansatz für eine nachhaltige Optimierung der Fertigungsstrategien selbst. Die Automatisierung der NC-Programmierung ist von Schneider beispielhaft mit Hilfe der Technologiedatenbank des CAD/CAM Systems hyperMILL umgesetzt worden.

## 3.2 Ableitung des Forschungsbedarfs

Grundlage für die folgende Ableitung des Forschungsbedarfs ist sowohl eine umfassende Recherche zum Themengebiet als auch die vorab aufgeführten aktuellen Forschungsbeiträge aus der Domäne Werkzeugbau mit gleichgearteter Zielsetzung [32] [71] [76] [47] [21] [70]. Es ist festzustellen, dass die in der Einleitung formulierte Forschungsfrage nicht ausreichend beantwortet wird:

Wie ist ein Prozess der Arbeitsvorbereitung für eine Einzelfertigung mit Ähnlichkeitscharakter im Werkzeugbau zu gestalten, dass sowohl das Potential einer weitgehend automatisierten NC-Programmierung als auch

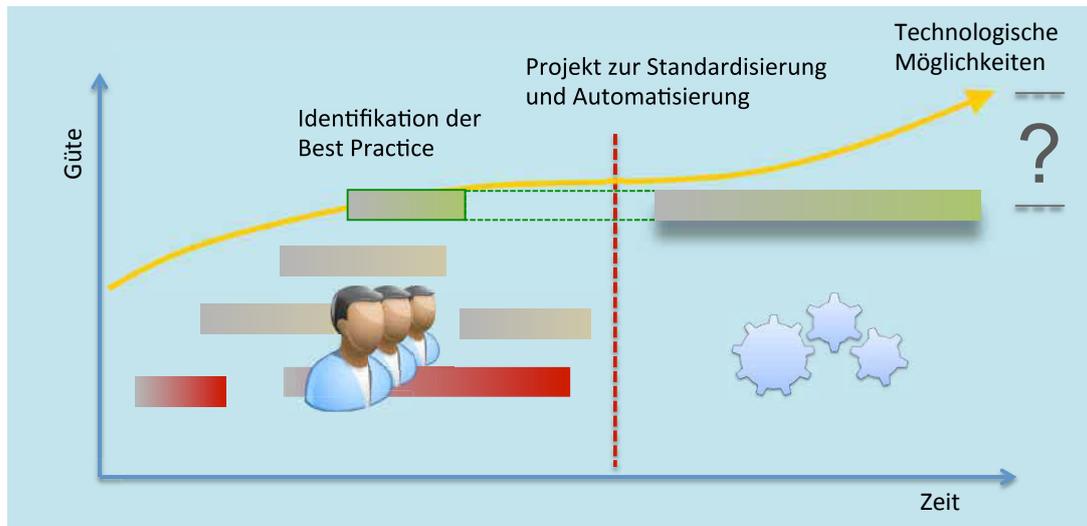


Abbildung 3.1: Darstellung zum Forschungsbedarf in der NC-Verfahrenskette

die Möglichkeit zur Optimierung der Fertigungsstrategien unter Mitwirkung der Anwender vereint werden?

Der Forschungsbedarf wird im Folgenden anhand der Abbildung 3.1 aufgezeigt. In der Darstellung wird die Art der Umsetzung der NC-Programmierung vor und nach einem Projekt zur Standardisierung und Automatisierung aufgezeigt. Dabei ist stark vereinfacht die Güte der zur Anwendung kommenden Fertigungsstrategien über die Zeit abgetragen. Vor dem Projektstart wird die NC-Programmierung zumeist von mehreren Anwendern weitgehend manuell durchgeführt, während nach Abschluss des Projektes rechts von der roten Linie eine automatisierte Erstellung angestrebt wird. Während die Lösungsgüte aufgrund der unterschiedlichen Fertigungsstrategien der Anwender in der manuellen Umsetzung variiert, liegt der Automatisierung eine Best Practice zugrunde. Diese wird im Einführungsprozess der Automatisierung aus dem vorhandenen Erfahrungswissen identifiziert und formalisiert. (Vergleiche hierzu auch die Ausführungen zum KBE im Abschnitt 2.3.1 auf Seite 15) Eine solche Standardisierung der Fertigungsstrategie wird in diversen Forschungsbeiträgen als zielführend angesehen [54].

Ein wesentlicher Aspekt bei der gewählten Darstellung ist die Abhängigkeit der Best Practice zur Zeitachse. In einem sich so dynamisch weiterentwickelnden Umfeld, wie der zerspanenden Fertigung, kann eine Best Practice nur eine begrenzte Gültigkeit haben. Dem entsprechend ist im Zuge einer Automatisierung auf Basis

einer zu dem Zeitpunkt vielleicht bestmöglichen Fertigungsstrategie auch zu klären, wie zukünftige Weiterentwicklungen der technologischen Möglichkeiten in Bezug auf Werkzeuge, Frässtrategien oder Fräsmaschinen Berücksichtigung finden. Dass dieses Potential nicht unerheblich ist, belegt eine Recherche in einschlägigen Fachzeitschriften auch bei konservativer Auslegung der dortigen Angaben [82] [19]. Wenn die Motivation für eine Standardisierung der Fertigungsstrategie nicht alleine auf die Steigerung der Prozessqualität abzielt, sondern über die Effizienzsteigerung einer automatisierten NC-Programmierung die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens gesteigert werden soll, ist die Weiterentwicklung der Fertigungstechnologien zu berücksichtigen.

Für einige Fräsparameter, wie beispielsweise dem Vorschub oder der Zustellung gibt es Ansätze zur automatischen Optimierung im Anwendungsprozess auf Basis von Fuzzy-Logic [88]. Wenn die Optimierungen allerdings nicht nur Parameter betreffen, sondern die Fertigungsstrategie auch konzeptionell geändert werden soll, ist eine Einbindung des Menschen erforderlich. Die Frage nach einer möglichen Umsetzung entspricht der Forschungsfrage.

Die Forschungsarbeiten von Kretschmann und Schneider liefern diesbezüglich keine Antworten. Während Kretschmann die Möglichkeit der Wissenspflege postuliert und in seinem Mechanismus zur Automatisierung zumindest vorsieht, ist bei Schneider davon nichts zu lesen. Das von ihm ausgearbeitete Konzept entspricht weitgehend dem Verständnis des Scientific Management. (Vergleiche hierzu auch den Abschnitt 2.4.2 auf Seite 30) Schneider favorisiert die zentrale Haltung und eine personenunabhängige Anwendung des betriebsspezifischen Fertigungswissens. Da aber seine Auswahl der Best Practice lediglich auf die Häufigkeit in der bisherigen Anwendung basiert, ist nicht garantiert, dass es sich dabei auch um die beste bisher eingesetzte Fertigungsstrategie handelt. Wenn es kein Rückfluss aus der Werkstatt zu der jeweils erreichten Lösungsgüte gibt, können Aufgaben auch dauerhaft schlecht umgesetzt werden und gute Ansätze wieder verschwinden.

Vor dem Hintergrund der aufgezeigten Forschungsergebnisse wird der Forschungsbedarf durch Aussagen aus dem zweiten Kapitel zur Weiterentwicklung der Wissensbasis im Anwendungsprozess unterstrichen. Für Probst et al. wird Wissen „nicht nur bewusst entwickelt, sondern entsteht quasi auch als Nebenprodukt im täglichen Organisationsgeschehen.“ Für Deming ist die Einbindung der Mitarbeiter vor Ort eine Grundvoraussetzung für eine kontinuierliche Verbesserung der Arbeitsweise. Und

im Phänomen der CoP wird herausgestellt, welchen Nutzen der Austausch der Anwender in einem informellen Netzwerk aufgrund des damit verbundenen Erkenntnisgewinns für die Wissensbasis des Unternehmens hat. Diese Aspekte werden in den bisherigen Ausarbeitungen zur Automatisierung der NC-Programmierung nicht ausreichend berücksichtigt.

Eine hilfreiche Parallele zum herausgearbeiteten Forschungsbedarf ist in dem Artikel „The Cathedral and the Bazaar“ von Raymond zu finden [50]. Bezogen auf die Domäne der Softwareentwicklung vergleicht er dort einen zentralistischen Entwicklungsansatz mit dem Grundsatz einer open-source-Strategie auf Basis vieler Beteiligter. Werden die vorliegenden Arbeiten zur Automatisierung der NC-Programmierung einander gegenübergestellt, so drängt sich der Vergleich zu dem von Raymond aufgezeigten zentralistischen Ansatz auf. Die Forschungsfrage zielt indes auf die Einbindung eines größeren Personenkreises ab. Raymond stellt in seinem Artikel 19 Regeln auf, die für ihn die Grundlage eines optimalen Entwicklungsprozesses unter breiter Beteiligung darstellen. Eine für dieses Forschungsvorhaben interessante Auswahl der Regeln wird im Folgenden wiedergegeben (ins Deutsche übersetzt von Hersel) [23]:

1. Jede Software beginnt mit den persönlichen Sehnsüchten eines Entwicklers.
2. Gute Programmierer wissen, welchen Code sie schreiben sollen; großartige Programmierer wissen, welchen Code sie umschreiben und recyceln können.
3. Mit der richtigen Einstellung werden interessante Probleme dich finden.
4. Die Anwender als Mitentwickler zu sehen ist der Weg zur schnellen Verbesserung und Fehlerbehebung, der die geringsten Umstände macht.
5. Früh freigeben, oft freigeben, seinen Anwendern zuhören.
6. Wenn man einen ausreichend großen Stamm an Beta-Testern und Mitentwicklern hat, wird jedes Problem schnell identifiziert und die Lösung jedem offensichtlich sein.
7. Das Zweitbeste nach eigenen guten Ideen ist das Erkennen guter Ideen von Benutzern. Manchmal ist letzteres sogar das Bessere.

Ähnliche Mechanismen wie bei der Open-Source-Entwicklung finden sich auch bei den benutzerorientierten Strukturen des Web 2.0, in denen der Inhalt nicht zentral vorgegeben, sondern durch das Engagement der Nutzer zusammengetragen wird [20]. Allerdings darf bei diesen Ausführungen zum Potential der Anwender nicht vergessen werden, dass die Fehlerauswirkungen einer Software im Beta-Test oder eines neuen Eintrags in einer Online-Datenbank nur bedingt mit den Qualitätsanforderungen an ein NC-Programm für eine CNC-Fräsmaschine zu vergleichen sind.

### 3.3 Aufstellen der Arbeitshypothese

Eine weitere Analogie zur dargestellten Forschungsfrage ist in der Methode des Kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) zu finden. Der Automatisierung in der NC-Programmierung liegt eine definierte Fertigungsstrategie zugrunde. Diese zu optimieren gleicht prinzipiell der Aufgabe, einen klar beschriebenen Standard in der Produktion weiterzuentwickeln. Der kontinuierliche Verbesserungsprozess weist auf Basis der Standardisierung einen organisierten Handlungsrahmen auf, in dem parallel zur eigentlichen Arbeit eine sequentielle Prozessoptimierung stattfindet. Die Optimierungsschleifen werden idealerweise durch die Anwender selbst sowohl moderiert als auch inhaltlich durchgeführt (vergleiche Abschnitt 2.4.3 auf Seite 32). Damit erfüllt das Konzept des KVP die zweite Komponente der Forschungsfrage zur Einbindung der Anwender in die Optimierung der eigenen Arbeitsweise.

Die Abbildung 3.2 aus dem Mercedes-Benz Produktionssystem (MPS) verdeutlicht die Ziele des KVP [38]. Auf Basis geeigneter Arbeitsstrukturen sollen in Gruppenarbeit die Lösungsmethoden kontinuierlich im Sinne von robusteren Prozessen und einer höheren Produktqualität verbessert werden. Dabei sind Verschwendungen zugunsten einer Steigerung der Effizienz zu beseitigen. Die Standardisierung dient in diesem Bild der Absicherung eines im kontinuierlichen Verbesserungsprozess erreichten Standes.

Eine kontinuierliche Optimierung der Fertigungsstrategie in einer automatisierten NC-Programmierung bedingt, dass die Anwender Einfluss auf die generierten Lösungen haben. Sowohl die Bearbeitungsoperationen in ihrer definierten Reihenfolge als auch die zugehörigen Bearbeitungsparameter und die Geometrieverknüpfungen sind als Bestandteile der Fertigungsstrategie zu modifizieren. Wenn allerdings für jede Änderungsschleife eine Implementierung der Verbesserungsidee durch Experten er-

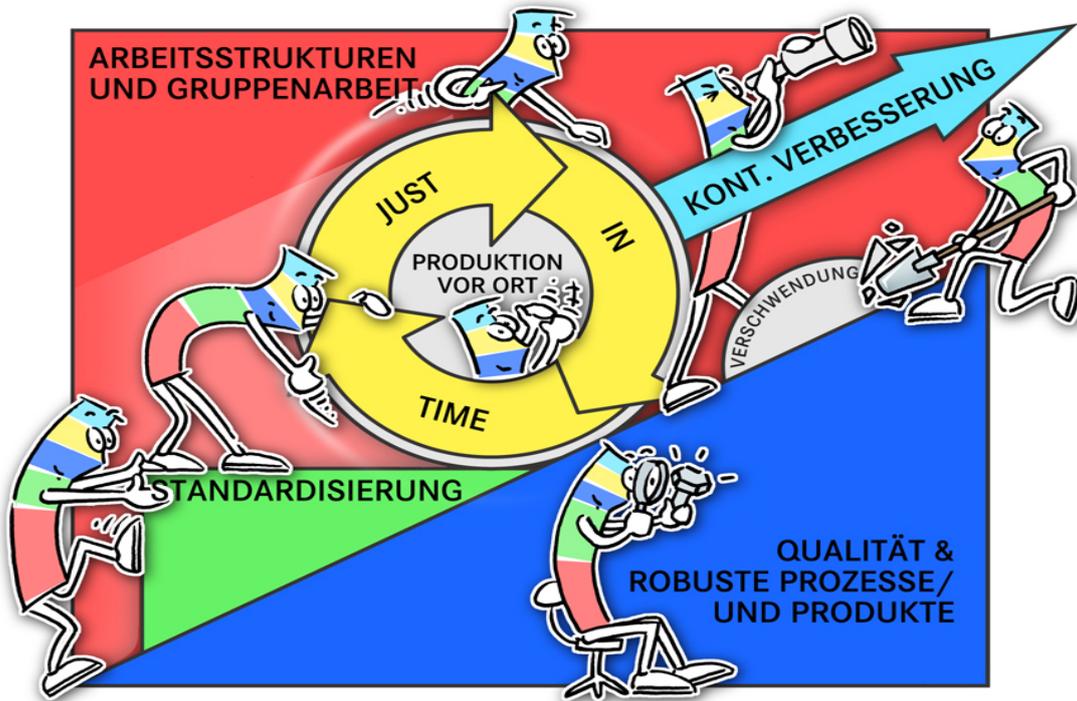


Abbildung 3.2: Zusammenwirken der MPS-Subsysteme [38]

forderlich ist, kann in der praktischen Umsetzung eine Kontinuität bei akzeptablen Zykluszeiten in Frage gestellt werden. Auch widerspricht eine solche Aufgabentrennung der Idee des KVP und fördert nicht die Eigenverantwortung der Anwender. Nach Nonaka et al. ist eine Autonomie der Anwender in ihrem Handeln unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen ein Schlüssel für die Weiterentwicklung der Wissensbasis. (vergleiche Abschnitt 2.3.2.2 auf Seite 22) Daher lässt sich für das im Rahmen der Forschungsfrage zu entwickelnde Prozessdesign schlussfolgern:

1. **Anforderung:** Der NC-Programmierer muss alle relevanten Anteile der zur Automatisierung hinterlegten Fertigungsstrategien modifizieren können.

Innerhalb der „Plan-Phase“ des KVP werden mitunter verschiedene Optimierungsansätze betrachtet. Eine mögliche Vielfalt der Ansätze wird im Verlauf der Betrachtung allerdings auf eine Lösungsmethode reduziert, die im Rahmen des neuen Standards umgesetzt wird. Die Einschränkung der Lösungsdiversität ist für viele Prozessabläufe eine Notwendigkeit. Allerdings bietet Diversität, wie Nonaka et al. und andere Vertreter aus dem Bereich des Wissensmanagements betonen, ein großes Potential für Innovationen [41] [49]. Im Wettkampf der Ideen kann der KVP-Zyklus

eine vorschnelle Entscheidung erzwingen. Abhängig von dem Erkenntnisstand über die Lösungsgüte kann dies negative Auswirkungen auf die Motivation der „unterlegenen Protagonisten“ haben.

In der hier betrachteten Domäne des Werkzeugbaus sind die Abhängigkeiten innerhalb der NC-Verfahrenskette für die involvierten Mitarbeiter überschaubar. Auch folgt diese Arbeit der Einschätzung von Schneider, dass der Werkzeugbau aufgrund des hohen Niveaus der Fertigungsaufgaben durch qualifizierte Fachkräften dominiert wird. Desweiteren kann eine Lösungsvielfalt an Fertigungsstrategien im digitalen CAx-Umfeld einfacher realisiert werden, als beispielsweise am Montageband der Automobilindustrie. Es spricht vieles dafür, das Potential der Diversität in dem zu entwickelnden Prozessdesign zu nutzen. Allerdings ist dabei, wie auch Probst et al. in ihrer Forderung nach einer geeigneten Wissens(ver)teilung feststellen, die Nutzungsmöglichkeit der Lösungsvielfalt sicher zu stellen. Dazu sind die verschiedenen Fertigungsstrategien für die Anwender transparent in einer gemeinsamen Wissensbasis zugänglich zu machen. Daraus folgt zweitens:

2. **Anforderung:** Verschiedene Fertigungsstrategien müssen parallel genutzt und weiterentwickelt werden können. Diese sind transparent und für alle Anwender zugänglich in einer gemeinsamen Wissensbasis abzulegen.

Im KVP werden die Optimierungsansätze nach einer Vorauswahl in einem Versuch erprobt und anschließend bewertet. Die Qualität der Ergebnisse entscheidet, ob eine Lösungsmethode in den Standard überführt und im produktiven Einsatz genutzt wird. Solch eine Bewertung ist auch notwendig, wenn nach dem hier skizzierten Konzept neue Fertigungsstrategien ohne Versuchsphase direkt im realen Umfeld eingesetzt werden. Die Qualität eines NC-Programmes zeigt sich zumeist erst an der Fräsmaschine. Für eine eigenverantwortliche Bewertung der Fertigungsstrategien durch die NC-Programmierer sind Gütekriterien abzustimmen, die im nachfolgenden Anfertigungsprozess zu erfassen und transparent in der Wissensbasis zu hinterlegen sind. Die Rückführung der Lösungsgüte analog zu einem Regelkreis soll eine Selektion der bisher genutzten Fertigungsstrategien ermöglichen und für neue Impulse zugunsten einer Weiterentwicklung sorgen. Diese Überlegungen basieren auf einem positiven Menschenbild entsprechend der Theorie Y von McGregor und gehen davon aus, dass sich in einem transparenten System bei freier Wahlmöglichkeit auf Dauer die jeweils besten Lösungen durchsetzen. Dieser Ansatz führt zur dritten Schlussfolgerung:

3. **Anforderung:** Die Güte der Fertigungsstrategien ist im Folgeprozess anhand definierter Kriterien zu erfassen und in der gemeinsamen Wissensbasis transparent darzustellen.

Ein Prozessdesign, welches die genannten Bedingungen erfüllt, wird im Folgenden als selbstoptimierender Prozess bezeichnet. Mit den Anwendern als zentraler Bestandteil, bietet die NC-Verfahrenskette selbst das Potential zur Optimierung der Fertigungsstrategie. Das Prozessdesign ist entsprechend der drei genannten Anforderungen so zu gestalten, dass eine Verbesserung der Fertigungsstrategie ohne ein weiteres Mitwirken von außen trotz einer Automatisierung möglich ist. Der Prozess ist damit selbstoptimierend. Die hergeleiteten Grundlagen für selbstoptimierende Prozesse sind angelehnt an die Methoden des KVP, unterscheiden sich aber in dem Merkmal der Lösungssingularität. Auf Basis der drei genannten Anforderungen kann folgende Hypothese als Kern dieser Arbeit für die Domäne Werkzeugbau aufgestellt werden:

Ein selbstoptimierender Prozess ermöglicht in der NC-Verfahrenskette einer Einzelanfertigung mit Ähnlichkeitscharakter eine kontinuierliche Optimierung der Fertigungsstrategien durch die Anwender bei weitgehend automatisierten Arbeitsabläufen.



# Kapitel 4

## Entwicklung selbstoptimierender Prozesse

### 4.1 Bezugsrahmen der Hypothese

Der Bezugsrahmen der Ausarbeitung zur Hypothese entspricht den speziellen Gegebenheiten am Standort der Promotion. Dabei können die Erkenntnisse dieser Arbeit durchaus auf entsprechende Situationen im Allgemeinen übertragen werden. Um dies zu ermöglichen, wird im Folgenden auf die Situation in der NC-Programmierung sowie auf die Bauteilkategorie der Einzelanfertigung mit Ähnlichkeitscharakter eingegangen.

#### 4.1.1 Die Rolle der NC-Programmierung

Wie bereits im zweiten Kapitel dargestellt, ist bei einer zentralen Organisationsform der NC-Verfahrenskette die Prozessplanung sowie die Operationsplanung üblicherweise in der Arbeitsplanung angesiedelt. Am Standort der Promotion gibt es zwar eine zentrale Gruppe von vier NC-Programmierern, diese gehören aber nicht zum Team der Arbeitsplaner. Sie sind dem Team der Anfertigung zugeordnet und verantworten die komplette NC-Verfahrenskette. Die Arbeitsplanung stellt zur NC-Programmierung lediglich einen Arbeitsvorgang ein und verweist auf das Protokoll des Bearbeitungsgesprächs, in dem alle fertigungstechnischen Besonderheiten zwischen der Konstruktion, der Arbeitsplanung und der Anfertigung abgeklärt werden. Auf Basis der CAD-Daten des Bauteils oder der Baugruppe und einer Arbeitsanwei-

sung, wie zum Beispiel „NC-Programm für die Grundbearbeitung unter Beachtung des Bearbeitungsprotokolls erstellen“, übernimmt der NC-Programmierer eigenverantwortlich alle weiteren Entscheidungen. So bestimmt er auch die für die Bearbeitung notwendige Fräsmaschine und die Anzahl und Art der Aufspannungen. Neben der örtlich und zeitlich von der Fertigung getrennten Programmierung komplexerer Bauteile werden sowohl einfache Bauteile als auch Ersatzteile für die Produktionsanlagen in der Werkstatt direkt programmiert. Auch dabei werden keine Vorgaben aus der Arbeitsplanung gemacht.

#### **4.1.2 Einzelanfertigung mit Ähnlichkeitscharakter**

Die Bauteilkategorie der Einzelanfertigung mit Ähnlichkeitscharakter zeichnet sich dadurch aus, dass sich die Bauteile vom prinzipiellen Aufbau her gleichen, aber in der Regel nicht gleich sind. Dies entspricht einer Anpassungsplanung, da der Arbeitsplan und die Operationsfolge gleich bleiben können. (Vergleiche Abschnitt 2.1 auf Seite 8) Im Idealfall muss lediglich das NC-Programm auf Basis der geänderten Geometrie neu berechnet werden. Diese Bauteilkategorie der Einzelanfertigung mit Ähnlichkeitscharakter ist aus fertigungstechnischer Sicht zwischen einer Serienproduktion und einer individuellen Einzelanfertigung anzusiedeln. Am Standort der Promotion handelt es sich dabei vornehmlich um Schneidmesser und Umformbacken, welche einen großen Anteil am Fertigungsumfang des Werkzeugbaus einnehmen. Eine detaillierte Beschreibung zur Verwendung von solchen Messern und Backen ist im Anhang A auf Seite 95 zu finden.

Im Gegensatz zum konventionellen Aufbau von Messer und Backen schränkt das Konzept der Standard-Modulsegmente den Gestaltungsraum der Konstruktion auf die eigentliche Funktionalität ein. Im Anhang B auf Seite 99 wird näher auf das Konzept der Standard-Modulsegmente mit den Vorteilen sowie den konzeptbedingten Einschränkungen eingegangen. Während es bei der normalen Messer- und Backengestaltung noch Einzelfälle gibt, für die eine spezielle Fertigungsstrategie ausgearbeitet werden muss, ist dies bei den Standard-Modulsegmenten nicht zu erwarten. Wenn zum Beispiel keine Abdruckstiftgewinde in ein Segment eingebracht werden müssen oder beim Fräsen keine Ecken nachzuholen sind, fallen lediglich Anteile einer ganzheitlichen Fertigungsstrategie weg. Dieses Prinzip ähnelt dem der Variantenplanung. Allerdings ist das Komplettteil nicht wesentlich umfangreicher als die zu erwartenden Varianten.

## 4.2 Ausarbeitung selbstoptimierender Prozesse

In den nächsten Unterkapiteln wird anhand der drei Anforderungen zur Hypothese ein Konzept für den NC-Manager erarbeitet. Der NC-Manager soll eine NC-Programmierung der Standard-Modulsegmente mit CATIA V5 als CAM-System nach dem Prinzip der selbstoptimierenden Prozesse ermöglichen.

### 4.2.1 Konzeptentwicklung

#### 4.2.1.1 Änderungsgerechte Automatisierung

Im Folgenden wird ein Konzept zur änderungsgerechten Automatisierung der NC-Programmierung ausgearbeitet. Grundlage für die Konzeptentwicklung ist die erste Anforderung an selbstoptimierende Prozesse auf Seite 47.

In der Arbeit von Kretzschmann ist parallel zu dieser Dissertation eine interessante Lösung zur automatisierten NC-Programmierung auf Basis von Design- und Fertigungsfeatures entwickelt worden. Dabei sind allerdings sowohl die von ihm entwickelten Mechanismen als auch die zugrunde liegende Datenbankstruktur komplexer, als es für eine Bauteilklasse wie die der Standard-Modulsegmente notwendig ist. Für Bauteile mit Ähnlichkeitscharakter ist der von ihm gewählte Modularisierungsgrad nicht notwendig, da die Reihenfolge der Bearbeitungsoperationen als Teil der Fertigungsstrategie definiert und zwischen den Bauteilen übertragen werden kann. Unter diesen Randbedingungen bietet sich das wesentlich einfachere Konzept einer Automatisierung auf Basis von Templates an. Dabei wird die Fertigungsstrategie eines NC-Programms aus dem bestehenden Bauteilkontext herausgelöst, als Prozess-Vorlage abgespeichert und zur Wiederverwendung in einen neuen Kontext instanziiert. Dabei muss gewährleistet sein, dass der Informationsgehalt des neuen Kontexts dem des Ursprünglichen entspricht. Damit liegt ein Hauptaugenmerk bei der Methodenentwicklung auf den Schnittstellen zu der Bauteilkonstruktion. Ähnlich wie bei der Zuordnung von Design- und Formfeatures, müssen bei allen Konstruktionen einer Bauteilklasse einander entsprechende Elemente vorhanden sein, auf die sich die Bearbeitungsoperationen in der Vorlage beziehen. Wenn diese Bedingung erfüllt ist, kann eine Fertigungsstrategie innerhalb der für sie gültigen Bauteilklasse weitgehend automatisch übertragen werden.

Da die Vorlagen bei dem aufgezeigten Konzept jeweils einer realen NC-Programmierung entnommen werden, besitzen alle NC-Programmierer die Kompetenz, die

hinterlegten Fertigungsstrategien abzuändern oder neu zu gestalten. Damit ist unter der Voraussetzung einer definierten Schnittstelle innerhalb der Bauteilklassse die erste Anforderung erfüllt. Die Umsetzung dieses Konzeptes erfolgt mit CATIA V5 als CAM-System. Mit Hilfe der im Anhang dargestellten Konstruktionsmethodik für die Standard-Modulsegmente wird eine definierte Geometrieschnittstelle innerhalb der Bauteilklassse sichergestellt (siehe Anhang C.2 auf Seite 105). Da zur Definition unterschiedlicher Fertigungsstrategien verschiedene Geometrien notwendig sein könnten, wird eine breite Spanne von Elementen angelegt. Die Auswahl ist gemeinsam mit den NC-Programmierern am Standort der Promotion festgelegt worden. Die Umsetzung der weitgehend zu automatisierenden NC-Programmierung im NC-Manager wird im Abschnitt 4.2.2.2 vorgestellt. Dabei ist anzumerken, dass in dem entwickelten Prototyp die Zuordnung der Geometrien manuell durchzuführen ist. Dies hängt ursächlich mit dem für einen Demonstrator unverhältnismäßig hohen Programmieraufwand aufgrund von Schwächen der zum Zeitpunkt der Umsetzung verwendete CATIA V5 Release (R16) zusammen.

#### **4.2.1.2 Diversitäre Fertigungsstrategien**

Es ist am Standort der Promotion festzustellen, dass jeder NC-Programmierer seine eigene Best Practice hat und nur bedingt die Arbeitsweisen der Kollegen kennt. Anstatt diese Diversität durch eine strenge Standardisierung zu beschränken, gilt es im Sinne der zweiten Anforderung auf Seite 48 für eine geeignete Wissensverteilung zu sorgen.

Die vorab beschriebene änderungsgerechte Automatisierung basiert auf nativen CATIA V5-Daten, die als Träger der Fertigungsstrategie in der Wissensbasis verwaltet werden müssen. Nach der Instanziierung einer Prozess-Vorlage in einem neuen Kontext kann der Anwender die Fertigungsstrategie modifizieren. Die neue Variante ist wiederum dann in die Wissensbasis aufzunehmen, wenn entscheidende Änderungen von dem Anwender vorgenommen wurden. Das Datenbank- und Softwaredesign kann so ausgestaltet werden, dass mehrere Anwender gleichzeitig von ihrem Arbeitsplatz aus auf die Vorlagen in der Wissensbasis zugreifen können. Da eine bestehende Vorlage selbst nicht abgeändert wird, sondern Änderungen als neue Variante einfließen, ist kein aufwändiges Berechtigungssystem für die Datenbank vorzusehen. Dieser Umstand birgt allerdings das Risiko, dass die Wissensbasis aufgrund zu vieler Varianten unübersichtlich wird.

Von zentraler Bedeutung ist daher die transparente Darstellung der Fertigungsstrategien. Die Begutachtung einer Prozess-Vorlage darf für den NC-Programmierer nicht viel Zeit in Anspruch nehmen. Ein Öffnen der zugrunde liegenden CATIA V5 Dateien soll zwar für den Benutzer möglich sein, ist aber als einzige Informationsquelle zu zeitaufwändig. Auch die Navigation in CATIA V5 hin zu den Strategie bestimmenden Parametern dauert zu lange, um sich schnell einen Überblick über die bestehenden Prozess-Vorlagen zu verschaffen. Eine transparente Wissensbasis ist nur zu gewährleisten, wenn die Fertigungsstrategien beim Anlegen der Vorlagen vom NC-Manager analysiert und die Struktur sowie die Strategie bestimmenden Parameter in aufbereiteter Form angezeigt werden. Um die Akzeptanz zu verbessern, ist die Darstellungsform im NC-Manager so zu wählen, dass eine möglichst große Ähnlichkeit zu CATIA V5 als gewohnte Arbeitsumgebung gewährleistet ist.

#### **4.2.1.3 Selektion anhand von Gütekriterien**

Eine wesentliche Voraussetzung für die Einführung von selbstoptimierenden Prozessen ist, dass die im Optimierungsprozess involvierten Mitarbeiter die Kompetenz zur erfolgreichen Umsetzung eigener Ideen im CAM-System besitzen. Allerdings zeigt sich in der Praxis, dass der Erfolg einer Fertigungsstrategie häufig relativ ist. So sind in einem Vorversuch zwei Standard-Modulsegmente in doppelter Ausführung mit dem CAM-Systemen CATIA V5 sowie mit HI-MILL von jeweils unterschiedlichen NC-Programmierern programmiert und an der gleichen Fräsmaschine gefertigt worden. Die Ergebnisse und die Bearbeitungszeiten für die Form- und Umrissbearbeitung sind in der Abbildung 4.1 dargestellt.

Die Ergebnisse spiegeln die Erfahrungen mit dem Einsatz der zwei Systeme in der NC-Programmierung wider. HI-MILL erzielt beim linken Segment eine um 45 Minuten bessere Fertigungszeit als CATIA V5 bei gleichen Fräsparmetern. Interessant ist allerdings der noch wesentlich größere Unterschied beim rechten Segment. Dieser beruht auf einem Fehler des NC-Programmierers, der in CATIA V5 als Rohteil das Solid zum Vorfräsen der Standard-Modulsegmente mit den Abdruckstiftlöchern ausgewählt hat. Dies führt zu unnötig komplizierten Bahnen bei der Schruppbearbeitung. Ein solcher Fehler in seiner Arbeitsmethodik wäre dem NC-Programmierer ohne eine Rückführung der Güte seiner Fertigungsstrategie womöglich nicht aufgefallen. Da die Bearbeitung selbst ohne Fehler durchgelaufen ist, hat der Maschinenbediener nach der Bearbeitung des Segmentes keine direkte Rückmeldung bezüglich

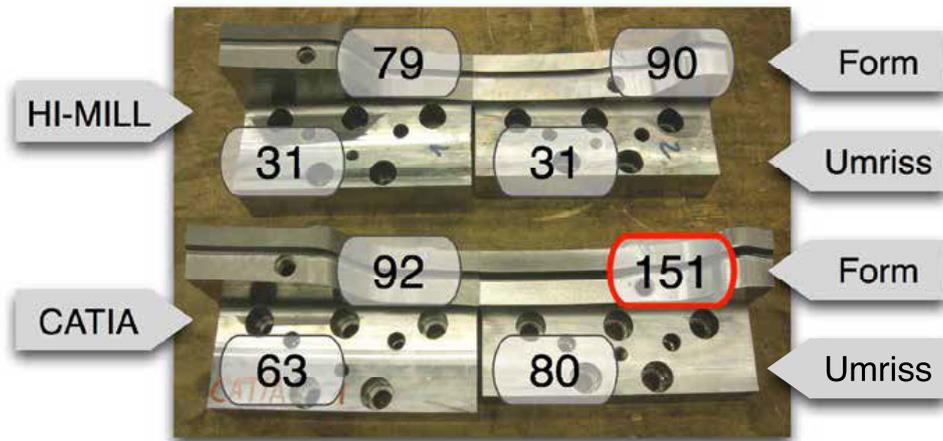


Abbildung 4.1: Fräsergebnisse aus einem Vorversuch (Angaben in Minuten)

dieser eindeutigen Ressourcen-Verschwendung gegeben. Eine unzureichende Kommunikation zur Werkstatt erschwert eine Optimierung der Fertigungsstrategien für die NC-Programmierer. Damit ist für sie als Akteure am Anfang der Verkettung von Ursache und Wirkung nicht unbedingt ersichtlich, wie gut die eigene Fertigungsstrategie ist und ob der Ansatz eines Kollegen vielleicht besser wäre.

Um eine zielgerichtete Weiterentwicklung der Fertigungsstrategien zu erreichen, ist genau solch eine Vergleichsmöglichkeit anhand von festgelegten Bewertungskriterien gemäß der dritten Anforderung an selbstoptimierende Prozesse (siehe Seite 48) zu schaffen. Diese Gütekriterien sind in den Prozessschritten aufzunehmen, in denen sich die Qualität der Fertigungsstrategie zeigt. Die Erfassung sollte möglichst automatisch erfolgen oder nur mit einem geringen Aufwand für die beteiligten Personen verbunden sein. Ansonsten besteht die Gefahr, dass diese „Zusatzbelastung“ im Arbeitsalltag nicht dauerhaft akzeptiert wird. Die Gütekriterien sind in der Wissensbasis an die zugrunde liegenden Vorlagen zurückzuführen und dort aussagekräftig darzustellen. Die Gütekriterien unterstützen die Prozessoptimierung in zweierlei Hinsicht: Zum Einen geht das Konzept der selbstoptimierenden Prozesse davon aus, dass sich erfolgreiche Fertigungsstrategien unter den NC-Programmierern durchsetzen und vermehrt Anwendung finden. Die nicht mehr verwendeten Varianten können zugunsten einer Überschaubarkeit der Lösungsvielfalt archiviert werden. Zum Anderen werden durch den möglichen Erfolg von Lösungsmethoden der Kollegen Impulse generiert. Dies kann die Mitarbeiter motivieren, sich mit neuen Ideen zu beschäftigen und für gut befundene Teillösungen mit eigenen Ansätzen zu kombinieren (siehe

hierzu auch die Regeln von Raymond im Abschnitt 1 auf Seite 45 zur Open-Source Strategie).

Im Folgenden ist die Frage zu klären, welche Gütekriterien bei der Beurteilung einer Fertigungsstrategie zielführend sind. Die 15 Kriterien nach Kretzschmann sind für eine schnelle Beurteilung der Fertigungsstrategie durch die NC-Programmierer sehr differenziert. In dieser Arbeit werden daher Eigenschaften, wie zum Beispiel die Oberflächenrauigkeit oder kritische Oberflächenveränderungen in dem Kriterium der Oberflächenqualität zusammengefasst. Desweiteren können kritische Geräusche, kritische Vibrationen oder Werkzeugbruch in dem Kriterium Prozessqualität gebündelt werden. Da eine objektive Erfassung dieser qualitativen Gütekriterien mit einem hohen Aufwand verbunden ist und die Beurteilung dieser Aspekte im Kompetenzbereich des Maschinenbedieners liegt, kann eine subjektive Bewertung auf einer Notenskala erfolgen. Das Kriterium des Werkzeugverschleisses wird aufgrund der schwierigen Zuordnung zu den einzelnen Bearbeitungen und des geringen Kostenanteils in der Messer- und Backenfertigung im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Spannend in der Auflistung von Kretzschmann ist hingegen das Kriterium der Auswahlhäufigkeit. Allerdings bezieht es sich bei den selbstoptimierenden Prozessen am Beispiel der Standard-Modulsegmente nicht auf einzelne Bearbeitungsoperationen wie bei Kretzschmann, sondern auf die Auswahl der Fertigungsstrategien durch die Anwender des NC-Managers. Im Bezug auf die Kritik am Konzept von Schneider im dritten Kapitel sei dazu angemerkt, dass dem NC-Programmierer bei seiner Wahl die Güte der Fertigungsstrategie bekannt ist.

Bei einigen Kriterien von Kretzschmann zur Bewertung der Bearbeitungsoperationen handelt es sich um objektiv zu messende Zeiten. Allerdings sagt beispielsweise die Bearbeitungszeit allein nichts über die Leistungsfähigkeit einer Fertigungsstrategie aus, wenn diese Zeitangaben nicht zu den bearbeiteten Bauteilen in Relation gesetzt werden. Abhängig von dem zu schrumpfenden Volumen oder der zu schlichtenden Fläche kann eine Zeitangabe gut oder schlecht sein. Es ist wichtig, beide Größen mit der dafür benötigten Zeit ins Verhältnis zu setzen. Dabei ist zu beachten, dass die Bearbeitungszeiten an der Fräsmaschine zu erfassen sind. Zum einen kann der Maschinenbediener die Vorschubgeschwindigkeit modifizieren. Zum anderen weichen die in CAM-Systemen errechneten Werte zum Teil erheblich von den real benötigten Bearbeitungszeiten ab. (Siehe hierzu auch die statistische Auswertung

Bezeichnung	Beschreibung	Art	Einheit
Zeitspanvolumen	pro Zeiteinheit zerspanntes Materialvolumen	quantitativ	cm <sup>3</sup> <i>pro Minute</i>
Zeitspanfläche	pro Zeiteinheit geschlichtete Bauteilfläche	quantitativ	cm <sup>2</sup> <i>pro Minute</i>
Auswahlhäufigkeit	Anzahl der Anwendungen einer Fertigungsstrategie	quantitativ	Anzahl
Prozessqualität	Subjektiv bewertetes Fräsverhalten	qualitativ	Notenskala von 1 bis 5
Flächenqualität	Subjektiv bewertete Flächenqualität	qualitativ	Notenskala von 1 bis 5

Tabelle 4.1: Gütekriterien zur Bewertung der Fertigungsstrategien

im Abschnitt 5.1.1 auf Seite 69) Eine Möglichkeit zur Zeiterfassung besteht in dem Einsatz eines Maschinen-Daten-Erfassungs-Systems (MDE-System). Um sowohl das Schrappvolumen als auch die Schlichtfläche der Bauteile zu ermitteln, werden in dem Segment-Modul entsprechende Parameter angelegt und von dem NC-Manager ausgelesen. Damit können sowohl das Zeitspanvolumen als auch die Zeitspanfläche objektiv als quantitative Gütekriterien einer Fräsbearbeitung ermittelt werden. Eine Übersicht der Gütekriterien zur Bewertung der Fertigungsstrategien nach dem Konzept der selbstoptimierenden Prozesse findet sich in der Tabelle 4.1.

#### 4.2.2 Ausarbeitung des NC-Managers

Es folgt die Ausarbeitung des NC-Managers auf Basis des vorab entwickelten Konzeptes der selbstoptimierenden Prozesse. Die mit dem NC-Manager angestrebte Automatisierung beruht auf der Erstellung und Wiederverwendung von Grundprozessen im Zusammenspiel mit CATIA V5 als CAM-System und dessen Schnittstelle auf Basis von Visual Basic (VB). Mit der Vereinheitlichung der Konstruktionsmethode von Standard-Modulsegmenten auf Basis des Segment-Moduls (siehe Anhang C.2 auf Seite 105) und der damit definierten Geometrieschnittstelle ist eine wesentliche Voraussetzung für eine änderungsgerechte Automatisierung der NC-Programmierung bereits im Rahmen dieser Promotion umgesetzt.

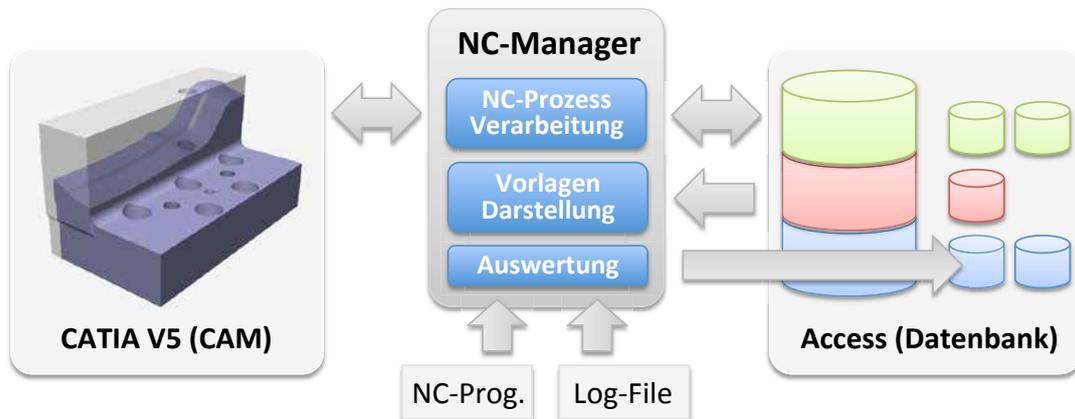


Abbildung 4.2: Struktur des NC-Managers

Wie in der Abbildung 4.2 dargestellt, umfasst der NC-Manager im Wesentlichen drei Module. Die NC-Prozessverarbeitung interagiert über die bereits erwähnte VB-Schnittstelle mit CATIA V5 und legt die dabei generierten Daten je nach Art in einer Access Datenbank oder in eine definierte File-Struktur ab. In umgekehrter Richtung werden die so hinterlegten Vorlagen zur Wiederverwendung der Fertigungsstrategien an CATIA übergeben und dort instanziiert. Um dem Anwender die Auswahl einer geeigneten Vorlage zu ermöglichen, wird die Datenbasis mit Hilfe des zweiten Moduls in dem Hauptmenü des NC-Managers transparent dargestellt.

Das dritte Modul wertet für jedes bearbeitete Standard-Modulsegment sowohl das erstellte NC-Programm als auch das aus dem Anfertigungsprozess zurück geführte Log-File aus und speichert die Ergebnisse den Vorlagen zugeordnet in der Datenbank. So kann die Leistungsfähigkeit der Fertigungsstrategien von den Anwendern beurteilt werden. Über die Gütekriterien hinaus wird bei der Auswertung jeweils auch eine Vorschubanalyse erstellt, um differenzierte Aussagen zur Leistungsfähigkeit der einzelnen Bearbeitungsoperationen treffen zu können.

#### 4.2.2.1 Rückführung der Gütekriterien

Als Grundlage für die Bewertung der Fertigungsstrategien bedarf es Gütekriterien, die erst im realen Anfertigungsprozess zu erfassen sind. In der Abbildung 4.3 sind die Komponenten zur Erfassung der Gütekriterien entlang des Datenflusses dargestellt. Dabei handelt es sich, ausgehend von dem links dargestellten NC-Manager, um den Post-Prozessor zur Umwandlung der Frässtrategie in ein NC-Programm, der

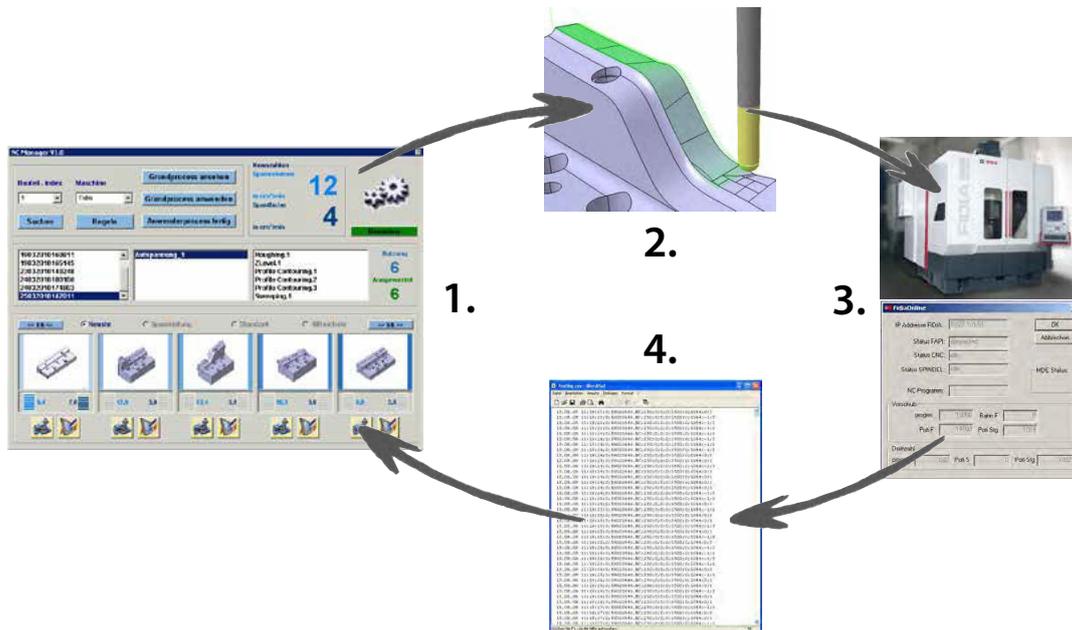


Abbildung 4.3: Komponenten zur Erfassung/Rückführung der Gütekriterien

Maschinen-Daten-Erfassung (MDE) parallel zur Bearbeitung an der Fräsmaschine und der Auswertung der erfassten Daten aus dem Log-File des MDE-Systems. Die einzelnen Komponenten und ihre Schnittstellen werden nun näher erläutert:

- 1. NC-Manager** Der „NC-Manager“ ist als eigenständige Software für dieses Promotionsvorhaben in Visual Basic programmiert. Wie vorab beschrieben, verbindet er funktional eine Access-Datenbank mit CATIA V5 als CAM-System. Nach dem Abschluss der vom NC-Manager unterstützten NC-Programmierung in CATIA V5 werden die Steuerungsinformationen für die Werkzeugmaschine im standardisierten APT-Format erzeugt.
- 2. Post-Prozessor** Als Post-Prozessor wird mit der Software „NC-Mod“ eine Eigenentwicklung der Abteilung eingesetzt. Diese wandelt das maschinenunabhängige APT-File in ein von der Steuerung der jeweiligen CNC-Fräsmaschine interpretierbares NC-Programm um.

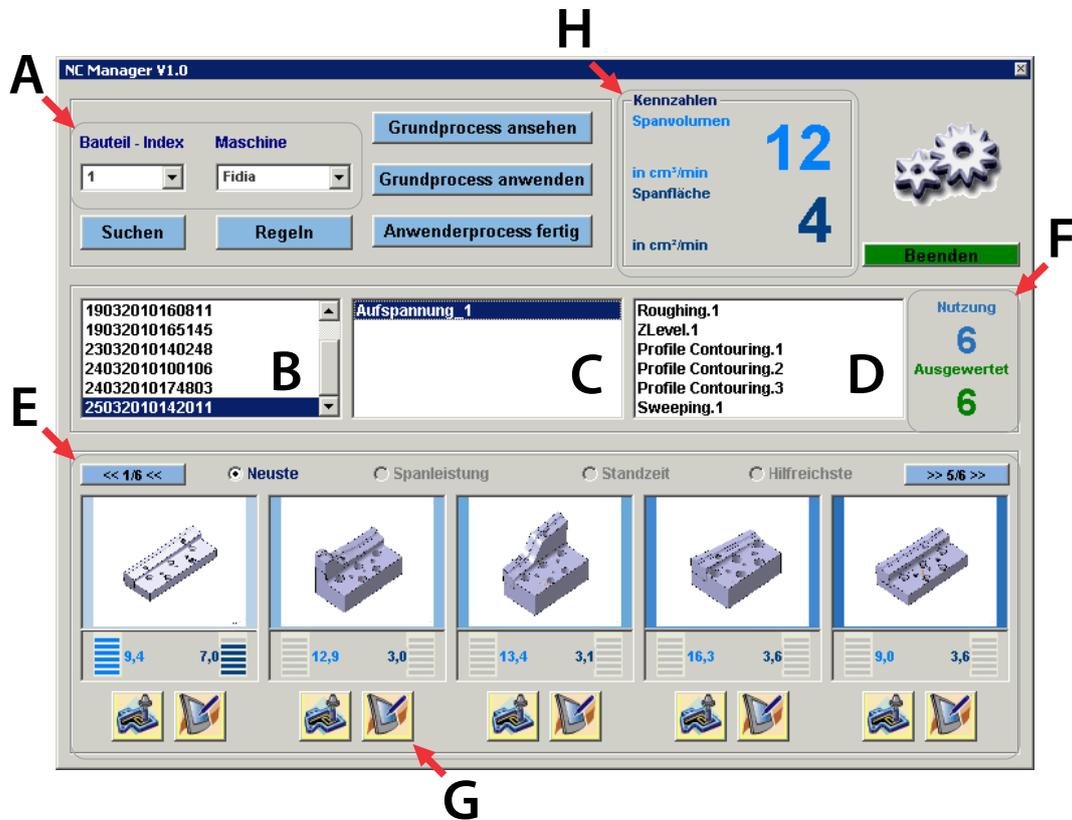


Abbildung 4.4: Hauptmenü des NC-Managers

3. **MDE-System** Zur Datenerfassung an der CNC-Fräsmaschine wird ein MDE-System eingesetzt. Dieses Programm läuft während der Bearbeitung im Hintergrund und schreibt chronologisch alle für die Auswertung notwendigen Maschinenparameter in eine CSV-Datei.
4. **Modul zur Auswertung** Das Auswertungs-Modul ist als Komponente in den NC-Manager integriert. Es ermittelt die Gütekriterien auf Basis des erzeugten LOG-Files und des zugehörigen NC-Programms. Nach deren Selektion und einer manuellen Zuordnung zum zugrunde liegenden CATIA V5 Prozess werden die Informationen in der Access Datenbank hinterlegt.

#### 4.2.2.2 Funktionsweise des NC-Managers

Die prototypische Umsetzung des NC-Managers wird nun anhand der verschiedenen Benutzungsoberflächen erläutert. In der Abbildung 4.4 ist das Hauptmenü des entwickelten NC-Managers dargestellt. Nach Angabe des Bauteil-Indexes und der

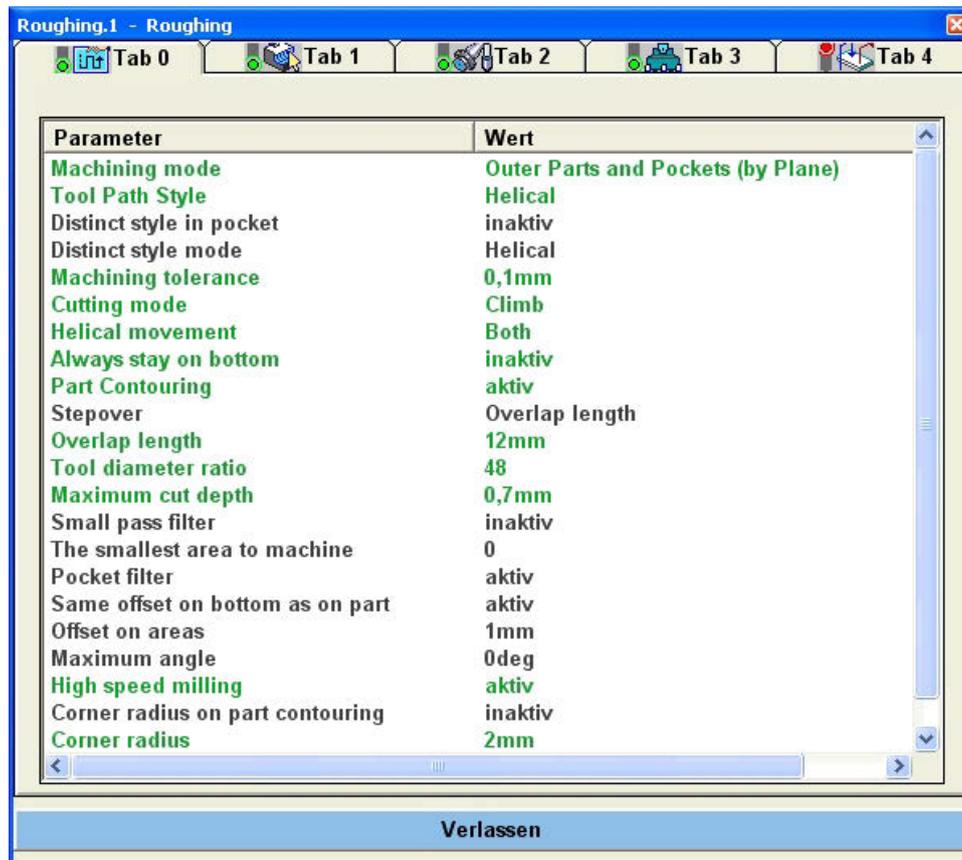


Abbildung 4.5: Parameter der einzelnen Bearbeitungsoperationen

Fräsmaschine unter (A) werden mit Hilfe der Funktion „Suchen“ alle für diesen Kontext vorhandenen Vorlagen im Auswahlfenster (B) angezeigt. Nach der Selektion einer Vorlage durch den Anwender werden deren Aufspannungen (C) und die zugehörigen Bearbeitungsoperationen (D) angezeigt. Um nähere Informationen zu den Details der Fertigungsstrategie zu erhalten, erscheint nach einer Auswahl die in den Bearbeitungsoperationen hinterlegten Parameter. Wie in der Abbildung 4.5 zu sehen, sind die Parameter identisch zur Eingabemaske in CATIA V5 strukturiert. Die wesentlichen Parameter sind farbig markiert.

Mithilfe dieser Übersicht kann sich der Benutzer rasch einen Überblick über die in der Vorlage verwendeten Fertigungsstrategie verschaffen. Über die Funktion „Grundprozess ansehen“ kann zusätzlich der zugrunde liegende NC-Prozess in CATIA V5 geöffnet werden. Hat der Benutzer sich für eine Vorlage entschieden, wird mithilfe der Funktion „Grundprozess anwenden“ das in CATIA V5 geöffnete und zu programmierende Bauteil automatisch in den Grundprozess eingebettet. Um

Bearbeitung	gleiche Parameter	ungleiche Parameter	relevante Parameter	Regeln
Roughing	80	0	0	
Roughing	80	0	0	
ZLevel	59	0	0	
<b>Sweeping</b>	<b>73</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	
Sweeping	74	0	0	
Sweeping	74	0	0	
Sweeping	67	0	0	

Parameter	Ursprungsprozess	Anwendungsprozess
Offset on part	0mm	0mm
Offset on check	1mm	1mm
Part autolimit	aktiv	aktiv
Side to machine (Limit Definition)	Inside	Inside
<b>Stop position (Limit Definition)</b>	<b>On</b>	<b>Outside</b>
Stop mode (limit Definition)	Tool end	Tool end
Offset (Limit Definition)	0mm	0mm

Abbildung 4.6: Analyse vor dem Anlegen eines neuen Grundprozesses

die NC-Programmierung abzuschließen, sind bei dem aktuellen Entwicklungsstand vom Benutzer noch die geometrischen Verknüpfungen innerhalb der einzelnen Bearbeitungsoperationen sowie einige Definitionen in der Aufspannung vorzunehmen.

Um Änderungen in der Fertigungsstrategie oder auch eine neu erstellte Vorlage im NC-Manager abzulegen, wird mit der Funktion „Anwendungsprozess fertig“ der aktuelle Prozess in CATIA V5 analysiert und dem Benutzer die Modifikationen angezeigt. Wie in der Abbildung 4.6 zu sehen ist, werden alle abgeänderten Parameter rot markiert und dem Benutzer die Erstellung eines neuen Grundprozesses angeboten. Hat sich die Reihenfolge oder die Anzahl der Bearbeitungsoperationen selbst geändert, führt dies auf jeden Fall zu einem neuen Grundprozess. Für eine Rückführung der Gütekriterien an die genutzte Vorlage ist es notwendig, dass auch bei der Programmierung eines Bauteils unter Beibehaltung der Fertigungsstrategie die Funktion „Anwendungsprozess fertig“ angewendet wird. Nach Bestätigung von „Keinen Grundprozess erzeugen“ werden wie zuvor bei der Neuanlage eines Grundprozesses Angaben zum Ersteller dieses NC-Programms sowie sonstige Bemerkungen abgefragt und hinterlegt. Zusätzlich wird in CATIA V5 von dem NC-Manager ein Screenshot des Bauteils erzeugt und im Bereich der Vorlagen-Nutzungshistorie (E in Abbildung 4.4) angezeigt. Die Summe aller bisher mit der Vorlage programmierten Bauteile findet sich unter dem Punkt „Nutzung“ (F). An gleicher Stelle wird unter

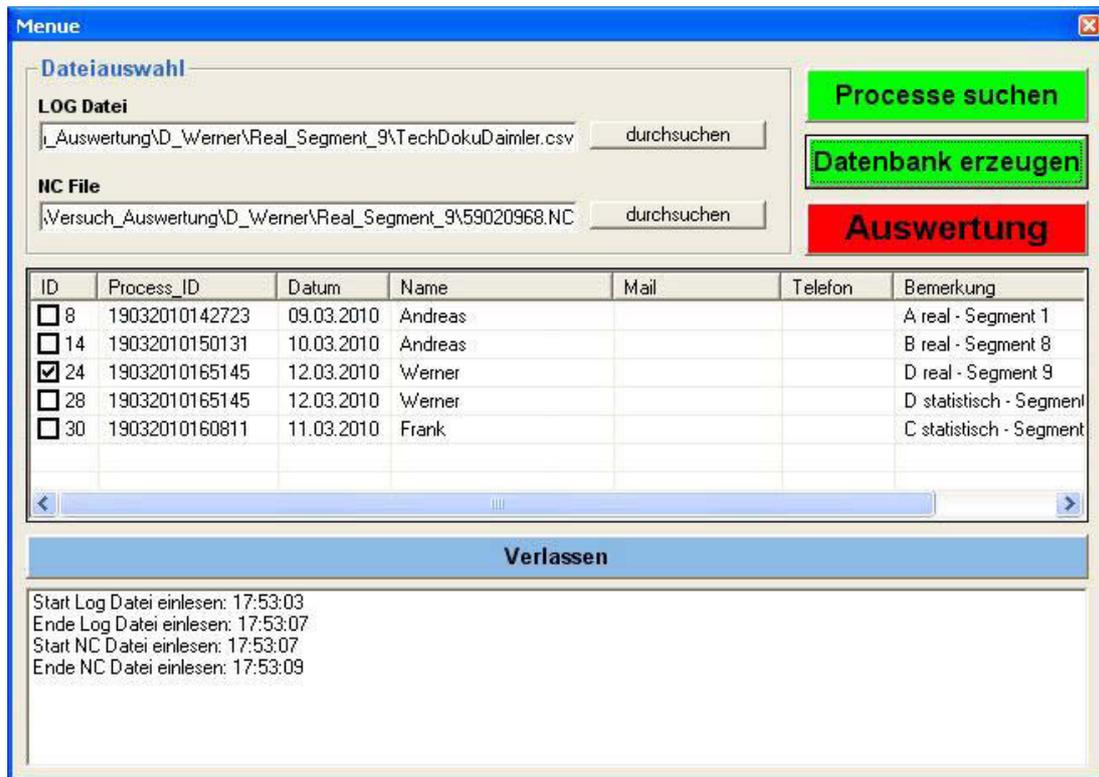


Abbildung 4.7: Menü zum Einlesen der Fertigungsinformationen

„Ausgewertet“ angezeigt, für wie viele dieser Bauteile bereits die Informationen aus dem LOG- und NC-File eingelesen, analysiert und als Gütekriterien für die ausgewählte Vorlage hinterlegt wurden. Die Häufigkeit der Anwendung ist dabei auch als ein Kriterium für die Güte der Fertigungsstrategie zu werten.

Für die Auswertung der abgearbeiteten NC-Programme gelangt man über ein Tastenkürzel zu der in der Abbildung 4.7 dargestellten Oberfläche. Nach Abschluss der Dateiauswahl werden mit „Prozess suchen“ alle noch nicht ausgewerteten NC-Prozesse aufgelistet. Nach einer Zuordnung durch den Benutzer erfolgt das „Datenbank erzeugen“ und die „Auswertung“.

Die Ergebnisse der Auswertung können in der Vorlagen-Nutzungshistorie aufgerufen werden (G). In der Abbildung 4.8 ist die Auswertung für die Bearbeitung eines Standard-Modulsegmentes dargestellt. Im oberen Bereich stehen Informationen zum Gesamtprozess, während die zwei unten stehenden Tabellen Angaben zu den einzelnen Bearbeitungsoperationen der verwendeten Frässtrategie enthalten. Dabei wird farblich angezeigt, ob die bereit gestellten Informationen aus dem CATIA NC-Prozess, dem NC-Programm oder aus dem LOG-File stammen oder ob sie aus diesen

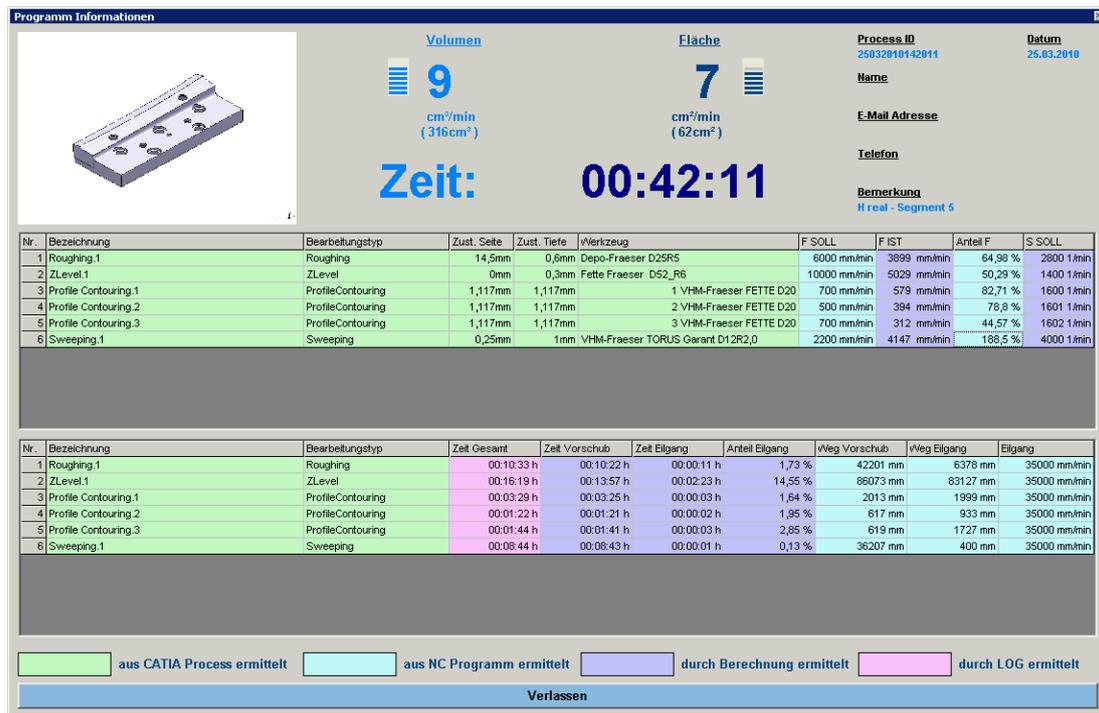


Abbildung 4.8: Darstellung der Vorschubanalyse im NC-Manager

Daten berechnet werden. So wird für die untere Tabelle aus dem NC-Programm der Weg des Fräasers für jede Fräsoperation im Vorschub inklusive der An- und Abfahrbewegung sowie der Weg im Eilgang berechnet. Für die durchschnittliche Geschwindigkeit des Eilgangs der ausgewählten CNC-Fräsmaschine ist ein Wert von 35 Metern pro Minute hinterlegt. Damit kann die Gesamtzeit der Fräsoperation um den Eilganganteil bereinigt werden. Die einzelnen Zeiten sowie der prozentuale Anteil des Eilgangs sind in den Tabellen angegeben. Über den Weg und die Bearbeitungszeit im Vorschub kann die real erreichte Vorschubgeschwindigkeit berechnet werden. Diese wird in der oberen Tabelle absolut und als prozentualer Anteil von der programmierten Vorschubgeschwindigkeit dargestellt. Desweiteren sind dort der Bearbeitungstyp, die Zustellungen und die programmierte Drehzahl aufgeführt.

Im oberen Bereich ist das geschruppte Materialvolumen und die geschlichtete Bauteilfläche angegeben. Diese Angaben wurden bei der Analyse des NC-Prozesses in CATIA V5 aus hinterlegten Parametern ausgelesen und sind Grundlage für die Berechnung der quantitativen Gütekriterien. Die zuvor genannten Einzelzeiten werden zu einer Schrupp- sowie einer Schlichtzeit aufsummiert. Dabei wird der Bearbeitungstyp Sweeping zur Identifikation der Schlichtbearbeitung genutzt. Der Quotient

aus dem zerspannten Volumen und der dafür notwendigen Bearbeitungszeit wird als Zeitspanvolumen in der Einheit  $\frac{cm^3}{min}$  angegeben. Dem entsprechend wird die Zeitspanfläche auf Basis der geschlitzten Fläche ermittelt und in der Einheit  $\frac{cm^2}{min}$  dargestellt. Daneben befindet sich jeweils in Form einer Balkenanzeige die Beurteilung der Prozess- und der Oberflächenqualität. Darüber hinaus wird in dem Fenster noch die Gesamtbearbeitungszeit sowie ein Screenshot vom Bauteil und Informationen zum Ersteller mit seinen Bemerkungen angezeigt.

In der Bedienoberfläche des NC-Managers werden die Gütekriterien für die ausgewerteten Bauteilbearbeitungen unter dem Screenshot in der Vorlagen-Nutzungshistorie angezeigt. Aus dem Zeitspanvolumen und der Zeitspanfläche werden zusätzlich die Mittelwerte berechnet und als Kennzahlen für die selektierte Vorlage (H) angegeben.

Bei der Entwicklung des NC-Managers sind einige Funktionalitäten zwar vorgesehen worden, aber der Aufwand ihrer Umsetzung hat die zur Verfügung stehenden Programmierkapazitäten überstiegen. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um die automatische Geometrieverknüpfung in CATIA V5 beim Anwenden einer Vorlage. Nach einer Bestätigung der Machbarkeit ist auf eine Umsetzung in Hinblick auf den geringen Aufwand einer manuellen Verknüpfung in der anstehenden Validierung verzichtet worden. Unter dem gleichen Gesichtspunkt sind nur die Parameterlisten der wichtigen Bearbeitungsoperationen in CATIA V5 zur Analyse im NC-Manager hinterlegt.

# Kapitel 5

## Technische Validierung des NC-Managers

Der NC-Manager ist ein Werkzeug, das selbstoptimierende Prozesse in der NC-Verfahrenskette ermöglichen soll. Ob die Anwender im Zielprozess diese Möglichkeiten zur Optimierung der Fertigungsstrategien nutzen, hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Vor allen Dingen ist das Management gefordert, geeignete Rahmenbedingungen zur zielführenden Einbindung der Ressource Mensch zu schaffen, wie die Ausführungen im zweiten Kapitel insbesondere zum Wissensmanagement und dem Phänomen der CoP aufzeigen.

In der folgenden Validierung soll belegt werden, dass der NC-Manager in der NC-Verfahrenskette eine zentrale Rolle zur Einbindung der Anwender spielen kann. Der Fokus liegt auf den technischen Aspekten des NC-Managers. Auch soll die Handhabung in der praktischen Anwendung überprüft werden. Die Validierung gliedert sich in drei Abschnitte. Zuerst wird anhand von 40 Standard-Modulesegmenten und zwei gegensätzlichen Fertigungsstrategien sowohl der Bedarf einer Datenerfassung an der Fräsmaschine belegt, als auch die Aussagekraft der quantitativen Gütekriterien unter Einfluss der Maschinendynamik untersucht.

Im zweiten Abschnitt werden die 10 Segmente einer realen Werkzeugkonstruktion unter Anwendung des NC-Managers programmiert und gefertigt. Ziel dieser Phase ist die Absicherung der Funktionalitäten in einer direkten Interaktion mit den NC-Programmierern am Standort der Promotion. Auch kann die Erfassung der qualitativen Gütekriterien sowie die detaillierte Auswertung der Fertigungsstrategien nur anhand realer Fräsprozesse abgesichert werden.

Während im ersten Teil der Validierung die Gültigkeit der quantitativen Gütekriterien auf Basis von idealisierten Fertigungsstrategien untersucht werden, ermöglichen die Fertigungsstrategien aus dem zweiten Abschnitt eine anwendungsnahe Überprüfung der Streuung. Dazu werden im letzten Teil der Validierung jeweils fünf gleichwertige Segmente mit den unterschiedlichen Fertigungsstrategien aus der zweiten Validierungsphase ohne Rohmaterial abgefahren und die Ergebnisse ausgewertet.

## 5.1 Versuchsreihe zum Einfluss der Maschinendynamik

Ein wesentliches Kriterium bei der technischen Validierung von selbstoptimierenden Prozessen in der NC-Verfahrenskette ist die Streuung der quantitativen Gütekriterien einer Fertigungsstrategie zwischen unterschiedlichen Bauteilen. Die Streuung resultiert zum einen aus den unterschiedlichen Geometrien der Bauteile, was zu unterschiedlichen Verfahrenswegen beim Fräsen führt. Zum anderen wird die Vorschubgeschwindigkeit beim Abfahren der Fräsbahnen von den dynamischen Einschränkungen der eingesetzten Fräsmaschine beeinflusst.

Um die Auswirkungen der aufgezeigten Faktoren auf die quantitativen Gütekriterien statistisch abschätzen zu können, wurden im ersten Abschnitt der Validierung 40 verschiedene Bauteilgeometrien programmiert und die Fräsbahnen an einer Fräsmaschine ohne Materialeingriff abgefahren. Damit gibt es in der ersten Versuchsreihe keine Notwendigkeit seitens des Maschinenbedieners, den Vorschub an der Maschinensteuerung zu beeinflussen. Um die Laufzeiten zu verkürzen, ist die Fertigungsstrategie auf jeweils eine Bearbeitungsoperation zum Schrappen und zum Schlichten der Formfläche mit Freigang beschränkt. Da aber die genannten Einflüsse abhängig von der gewählten Fertigungsstrategie unterschiedlich stark sein könnten, werden die Versuche mit zwei sehr gegensätzliche Fertigungsstrategien durchgeführt.

Die Umsetzung erfolgt mit Hilfe der Automatisierung im NC-Manager. In der Abbildung 5.1 sind die zwei Vorlagen mit den abgefahrenen Segmenten in der Historie dargestellt. Die Unterschiede der Fertigungsstrategien werden in der Gegenüberstellung der Vorschubanalysen in der Abbildung 5.2 deutlich. Bei der oberen Fertigungsstrategie hebt das Fräswerkzeug innerhalb einer Bearbeitungsebene beim Schrappen nicht ab, während bei der unteren Fertigungsstrategie nur im Gleichlauf bearbeitet wird. Dem entsprechend weist die zweite Strategie einen ungefähr dop-

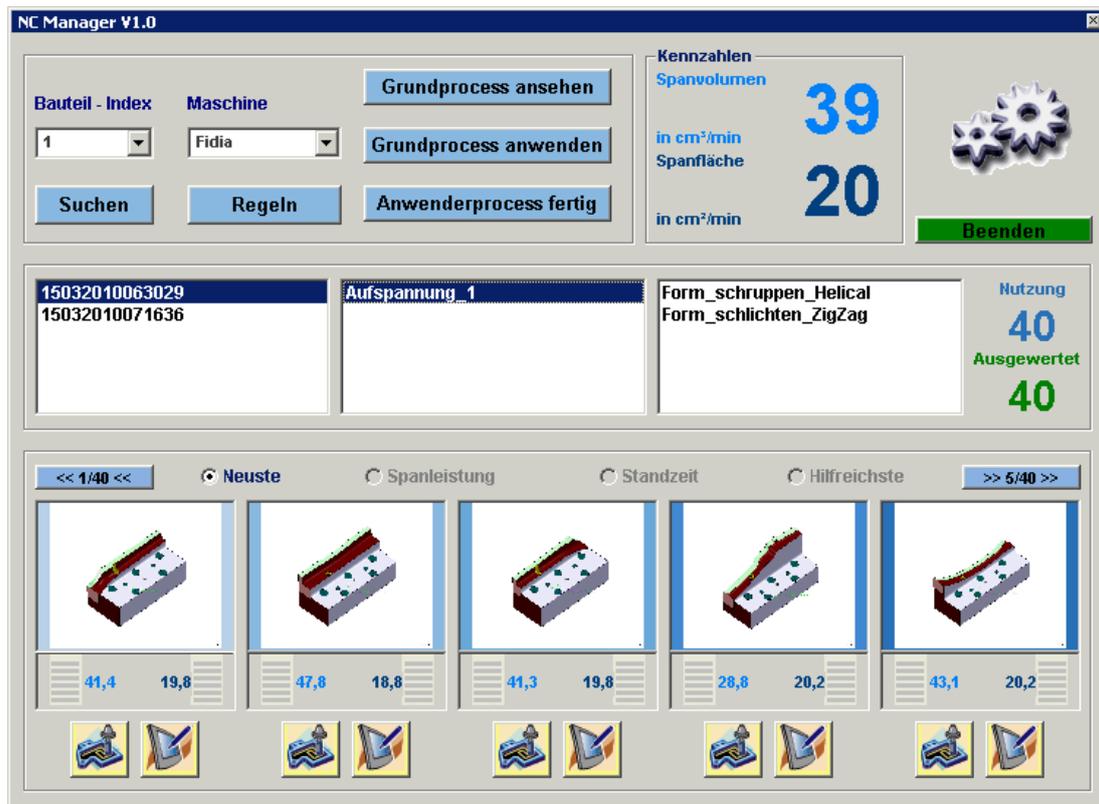


Abbildung 5.1: Statistische Untersuchungsreihe mit dem NC-Manager

pelt so langen Verfahrensweg auf. Auch der zurück gelegte Weg im Eilgang ist deutlich höher. Die Zerspanzeit für die Schruppbearbeitung ist fast drei mal so lang, was sich auch in dem deutlich niedrigeren durchschnittlichen Vorschub widerspiegelt.

### 5.1.1 Aussagekraft berechneter Bearbeitungszeiten

Zur Ermittlung der quantitativen Gütekriterien ist die real benötigte Bearbeitungszeit an der Fräsmaschine entscheidend. In den CAM-Systemen wird nach der Berechnung der Fräsbahnen auch die benötigte Bearbeitungszeit angegeben. Einige Forschungsbeiträge zur Automatisierung der NC-Programmierung nutzen diese Angabe als Grundlage zur Bewertung der Bearbeitungsoperationen [54]. Über einen Faktor wird versucht, Zeitverluste an der Fräsmaschine aufgrund von dynamischen Einschränkungen zu kompensieren.

Anhand der vorab vorgestellten Untersuchungsreihe soll die Eignung der berechneten Bearbeitungszeit als Datengrundlage für den NC-Manager bewertet werden. Im Idealfall würde sich die Datenerfassung an der Fräsmaschine auf die Reglerstel-

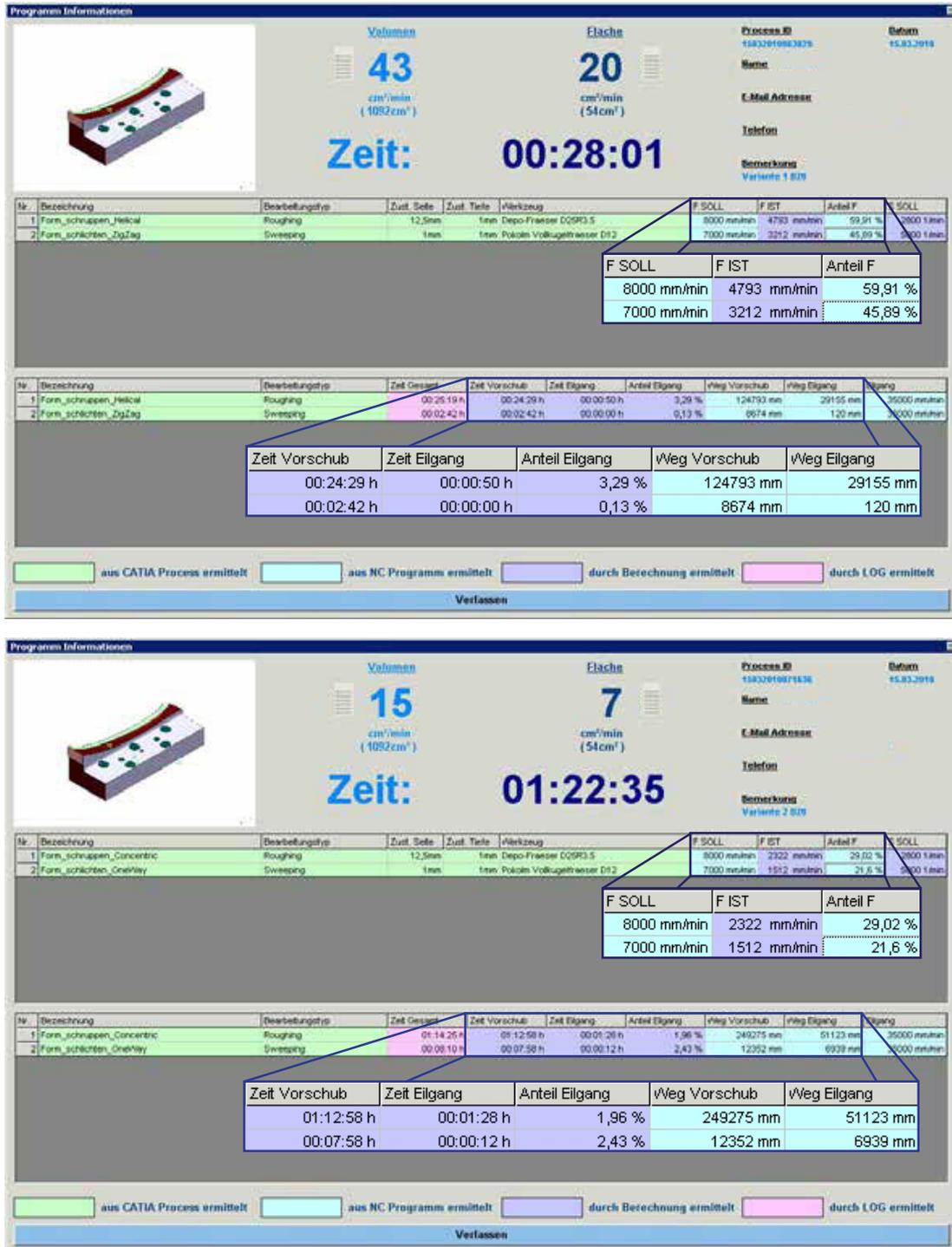


Abbildung 5.2: Vergleich der Fertigungsstrategien im NC-Manager

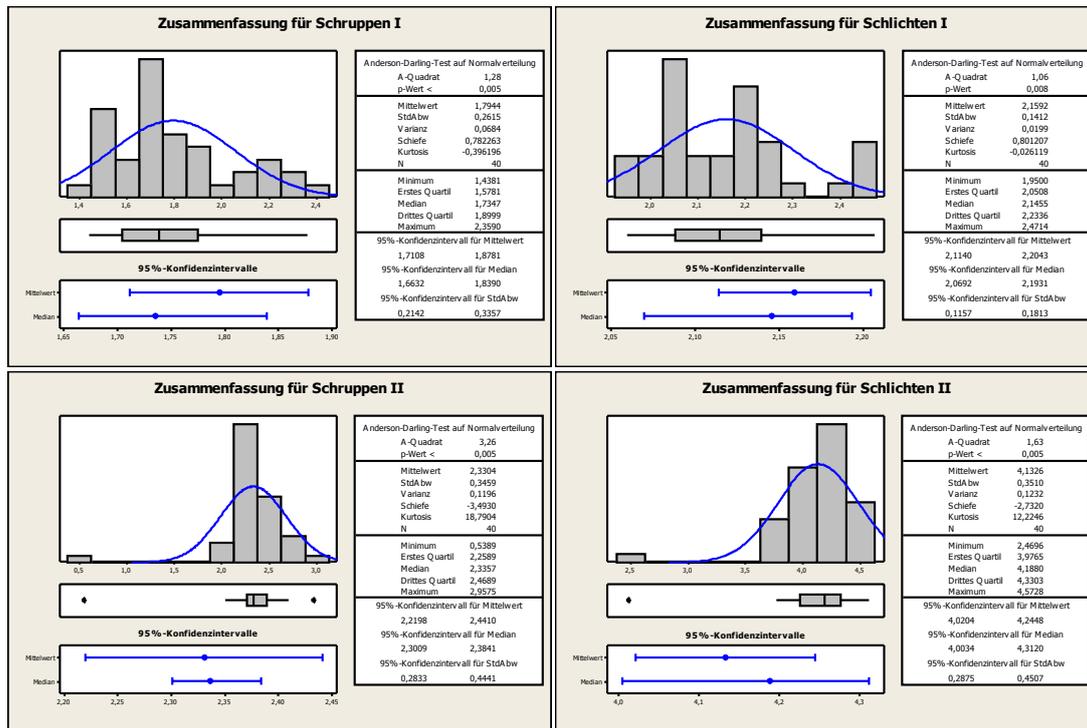


Abbildung 5.3: Auswertungen zur Genauigkeit berechneter Bearbeitungszeiten

lung zur Anpassung von Vorschub und Spindeldrehzahl an der Maschinensteuerung reduzieren. Auch müsste der NC-Programmierer nicht auf die Rückführung der Bearbeitungsergebnisse aus der Werkstatt warten, um seine Modifikationen (zumindest teilweise) bewerten zu können.

Als Datengrundlage für die Untersuchung wird jeweils der Quotient aus der real benötigten Zeit an der Fräsmaschine und der berechneten Bearbeitungsdauer in CATIA V5 für die Schrupp- und Schlichtbearbeitungen der zwei Fertigungsstrategien gebildet. In der Abbildung 5.3 sind die Ergebnisse jeweils für die 40 Standard-Modulsegmente der Untersuchungsreihe dargestellt (eine größere Darstellung findet sich im Anhang D.1 auf Seite 116). Die Mittelwerte für die zwei Schruppstrategien unterscheiden sich um mehr als 50 % der zugrunde liegenden berechneten Bearbeitungsdauer (1,79 zu 2,33). Die Standardabweichung liegt im gleichen Bezugssystem bei 26 % und 35 %. Noch größer sind die Unterschiede beim Schlichtfräsen: Die Mittelwerte unterscheiden sich um die zweifache theoretische Bearbeitungsdauer (2,16 zu 4,13). Die Standardabweichungen liegen in der Größenordnung wie bei den Schruppbearbeitungen (0,14 und 0,35).

Sowohl das vorab aufgezeigte Delta der Mittelwerte, als auch die Streuung in-

nerhalb der Bearbeitungsstrategien selbst sprechen gegen die Berechnung der Bearbeitungsdauer von Standard-Modulsegmenten auf Basis des CAM-Systems CATIA V5 auch unter Anwendung eines pauschalen Korrekturfaktors. Der Einfluss der Maschinendynamik auf die Bearbeitungsdauer ist so erheblich, dass der Aufwand einer Zeiterfassung via MDE-System im Konzept des NC-Managers gerechtfertigt ist.

### 5.1.2 Aussagekraft der quantitativen Gütekriterien

Im Konzept der selbstoptimierenden Prozesse kommen den Kennzahlen als Mittelwert der bis zu dem Zeitpunkt ermittelten quantitativen Gütekriterien einer Fertigungsstrategie eine wesentliche Bedeutung zu. Sie haben maßgeblichen Einfluss auf die Entwicklungsrichtung. Besonders gute Kennzahlen als Resultat der ersten Umsetzungen machen aus einer neuen Idee einen vielversprechenden Ansatz. Dabei stellt sich die Frage, wie repräsentativ die Kennzahlen sind. Kann für den gesamten Kontext mit ähnlichen Ergebnissen gerechnet werden? Kann umgekehrt eine gute Idee an einem schlechten Ausgang der ersten Umsetzungen scheitern, obwohl der Mittelwert ihres Zeitspanvolumens und -fläche bei häufiger Anwendung sehr gut gewesen wäre? Unter welchen Bedingungen kann sich der Mitarbeiter auf die Kennzahlen verlassen? Um diese Fragen zu beantworten, soll die statistische Aussagekraft der Kennzahlen auf Basis der eingangs vorgestellten Versuchsreihe untersucht werden.

Die Ergebnisse aus den Versuchen sind in der Abbildung 5.4 dargestellt. Unter der Abbildung des Bauteils befinden sich jeweils die mit den zwei Fertigungsstrategien erreichten quantitativen Gütekriterien. Links ist das Zeitspanvolumen und die Zeitspanfläche für die Frässtrategie mit möglichst stetigem Eingriff des Fräsers (Schruppen und Schlichten I), rechts die Werte für eine Bearbeitung nur im Gleichlauf mit dementsprechend vielen Leerbewegungen im Eilgang angegeben (Schruppen und Schlichten II). Dabei sind die Kennzahlen für das Zeitspanvolumen blau und die für die Zeitspanfläche grün hinterlegt.

Die Streuung der Ergebnisse ist entscheidend für die Aussagekraft der Gütekriterien. Je geringer im Mittel die Abweichung um den arithmetischen Mittelwert ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Gütekriterien auch bei einer kleinen Datenbasis eine richtige Schlussfolgerung zulassen. Um dies für die Resultate der Untersuchungsreihe beurteilen zu können, ist die Stichprobe mit der Größe  $n = 40$  für die zwei Fertigungsstrategien mit der Software Minitab 16 ausgewertet worden. Die Ergebnisse sind in der Abbildungen 5.5 als Übersicht dargestellt (diese und



Abbildung 5.4: Untersuchungsreihe zu den quantitativen Gütekriterien

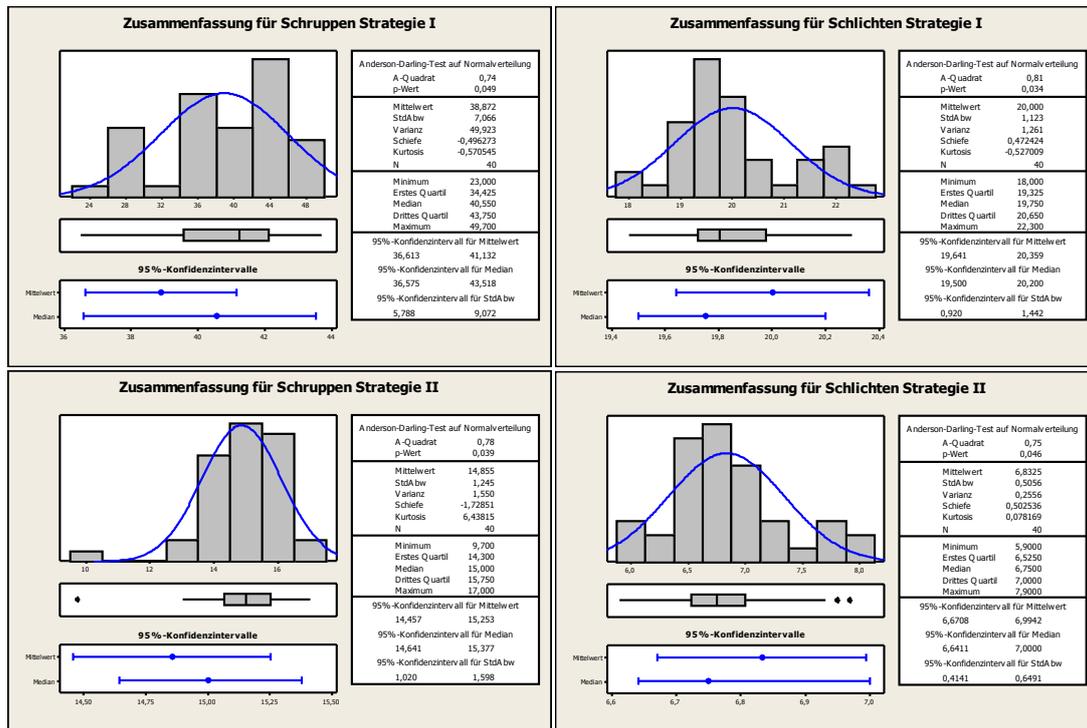


Abbildung 5.5: Statistische Auswertung der Untersuchungsergebnisse

alle weiteren Auswertungen sind in größerer Form im Anhang D.2 auf Seite 118 zu finden). Es gibt jeweils eine Analyse für die Verteilung des Zeitspanvolumens und der Zeitspanfläche für die Strategie I und II. Dabei unterscheiden sich die Ergebnisse der beiden Strategien deutlich. Für das Zeitspanvolumen ergibt sich eine Differenz zwischen den Mittelwerten von ca.  $24 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$ . ( $38,9 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$  zu  $14,9 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$ ) Während allerdings die Standardabweichung bei der weniger leistungsfähigen Fertigungsstrategie II einen relativ niedrigen Wert von  $1,25 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$  aufweist, ist dieser bei der Fertigungsstrategie I mit  $7,07 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$  als hoch zu bewerten. Eine genauere Analyse hierzu folgt an späterer Stelle dieses Abschnittes. Der Mittelwert der Zeitspanfläche unterscheidet sich zwischen den beiden Fertigungsstrategien im Verhältnis zu den absoluten Werten ( $20 \frac{\text{cm}^2}{\text{min}}$  und  $6,8 \frac{\text{cm}^2}{\text{min}}$ ) mit ca.  $13,2 \frac{\text{cm}^2}{\text{min}}$  ähnlich stark wie das Zeitspanvolumen. Allerdings liegen beide Standardabweichungen im Verhältnis zum Mittelwert auf einem niedrigen Niveau ( $1,12 \frac{\text{cm}^2}{\text{min}}$  und  $0,51 \frac{\text{cm}^2}{\text{min}}$ ). Alle vier Verteilungen liegen nach dem Anderson-Darling-Test auf Normalverteilung mit ihrem p-Wert unter 0,05. (0,049; 0,034; 0,034; 0,046) Damit ist die Annahme auf Normalverteilung, wenn auch knapp, bei allen Verteilungen zu verwerfen.

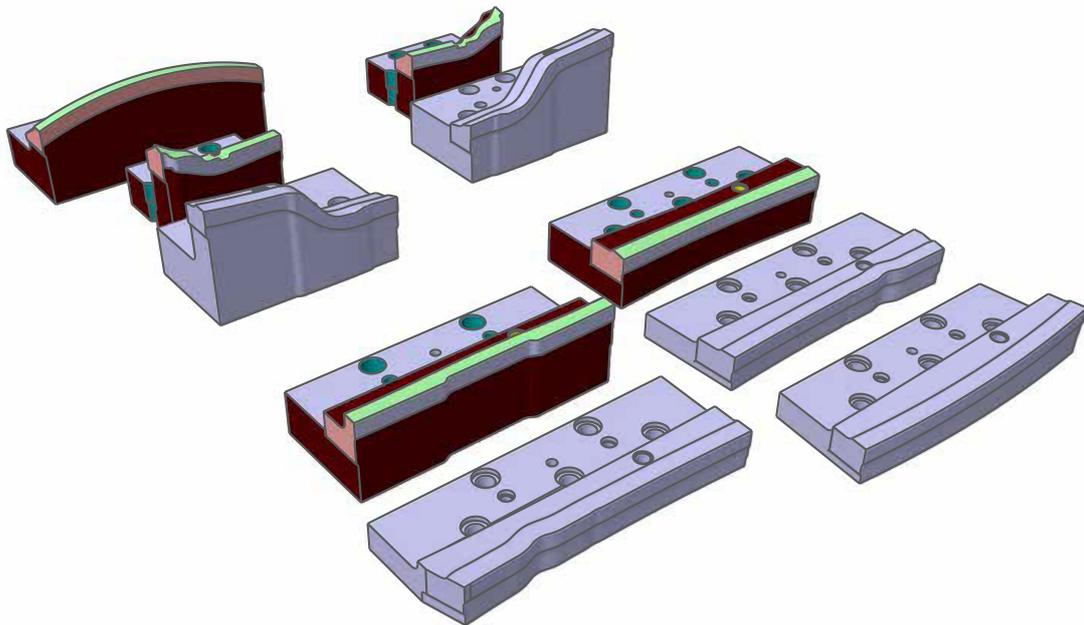


Abbildung 5.6: Segmente nach dem Zeitspanvolumen sortiert

Drei von den vier aufgezeigten Ergebnissen der Untersuchung würden die Aussagefähigkeit der quantitativen Gütekriterien im Konzept der selbstoptimierenden Prozesse bestätigen. Die Standardabweichung für das Zeitspanvolumen der Fertigungsstrategie I ist dagegen mit 18 Prozent vom Mittelwert als relativ hoch zu bewerten. Um weitere Differenzierungsmöglichkeiten innerhalb der betrachteten Segmentauswahl zu finden, sind in der Abbildung 5.6 jeweils die fünf Segmente mit dem höchsten und dem niedrigsten Zeitspanvolumen dargestellt. Zwischen diesen Gruppen ist ein klarer geometrischer Unterschied zu erkennen. Während die Segmente mit einem hohen Zeitspanvolumen vorne rechts tendenziell länger sind und einen flachen Formanteil haben, weisen die Segmente in der anderen Gruppe einen Formanteil mit einem deutlichen Höhenunterschied auf. Für eine differenzierte Auswertung der Fertigungsstrategie I sind die Segmente in der Abbildungen 5.4 anhand dieses relativ einfachen und subjektiv zu definierenden Unterscheidungsmerkmals gruppiert. Alle Segmente mit einem ausgeprägten Höhengsprung im Formanteil sind dementsprechend mit einem H gekennzeichnet.

In der Abbildung 5.7 sind die Ergebnisse für die Analyse der Fertigungsstrategie I bei zusätzlicher Differenzierung anhand eines Höhengsprungs im Formanteil dargestellt. Die 30 Segmente des Teileumfangs A sind eher flach, während die 10 Segmente des Teileumfangs B zuvor mit einem H für ihren ausgeprägten Höhengsprung gekenn-

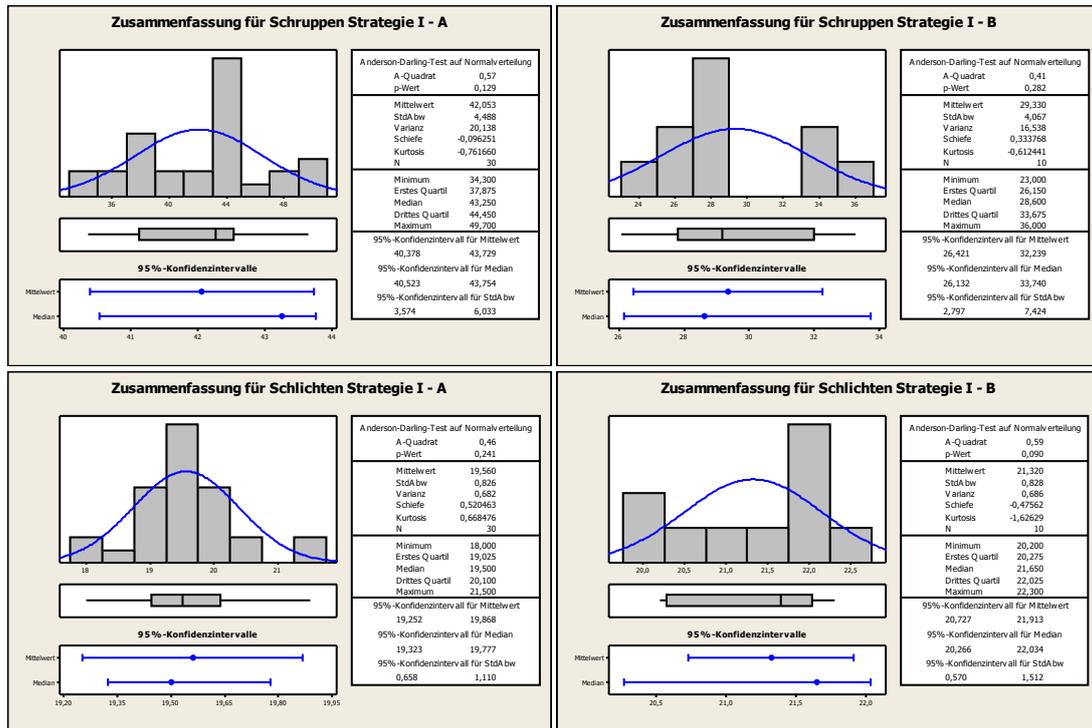


Abbildung 5.7: Statistische Auswertung nach der Segmentform getrennt

zeichnet wurden. Die Mittelwerte des Zeitspanvolumens unterscheiden sich deutlich ( $42 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$  zu  $29,3 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$ ), während die Standardabweichung der beiden Stichproben annähernd gleich ist. ( $4,5 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$  zu  $4,1 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$ ) Die statistischen Ergebnisse für die Zeitspanfläche sind bei beiden Stichprobenumfängen auf gleichem Niveau. (Mittelwert:  $19,6 \frac{\text{cm}^2}{\text{min}}$  zu  $21,3 \frac{\text{cm}^2}{\text{min}}$ ; Standardabweichung:  $0,83 \frac{\text{cm}^2}{\text{min}}$  zu  $0,83 \frac{\text{cm}^2}{\text{min}}$ ) Ein Indiz für die Qualität des gewählten Unterscheidungsmerkmals liefert der Anderson-Darling-Test auf Normalverteilung. Während der Stichprobenumfang insgesamt weder für das Schruppen noch für das Schlichten eine Normalverteilung annehmen lässt, sind die Verteilungen der differenzierten Stichprobenumfänge mit einer hohen Wahrscheinlichkeit normalverteilt. (0,13; 0,28; 0,24; 0,09)

Auf Basis der identifizierten Normalverteilung kann der t-Test eine weitere interessante Information zur Aussagekraft der Kennzahlen liefern [14]. Mit dem t-Test kann ermittelt werden, ab welcher Differenz zwischen den Mittelwerten zweier voneinander unabhängigen normalverteilten Stichproben von unterschiedlichen Grundgesamtheiten ausgegangen werden kann. Der Wert ist abhängig vom Stichprobenumfang, von der Standardabweichung und dem Konfidenzniveau. Je kleiner dieser Wert schon bei einem geringen Stichprobenumfang ist, desto aussagekräftiger sind

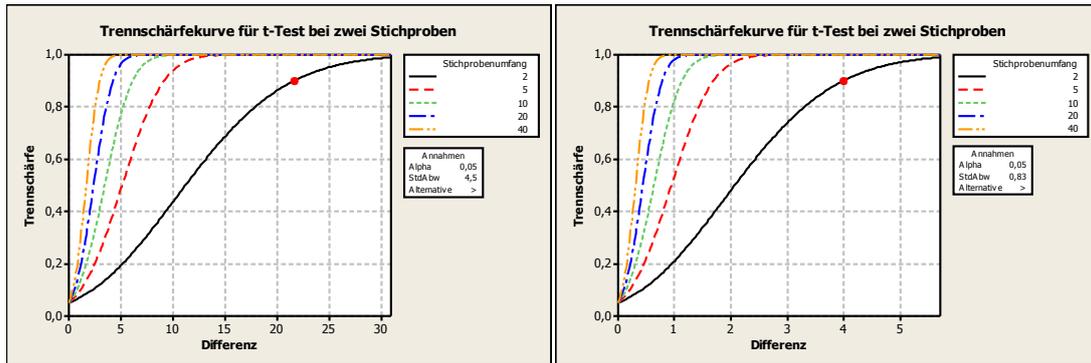


Abbildung 5.8: Notwendige Differenzen der Mittelwerte zur Unterscheidung

die Kennzahlen für die Leistungsfähigkeit der Fertigungsstrategien. Die Ergebnisse der t-Tests sind in der Abbildung 5.8 für die jeweils größere Standardabweichung der differenzierten Stichprobenumfänge dargestellt. In den Kurvenscharen für das Zeitspanvolumen (links) und der Zeitspanfläche (rechts) sind für Stichprobengrößen von 2, 5, 10, 20, und 40 die Verhältnisse vom Konfidenzniveau zur minimalen Differenz der Mittelwerte angegeben, um von einem Unterschied der Fertigungsstrategien ausgehen zu können. In der Tabelle 5.1 sind die Differenzwerte für ein Konfidenzniveau von 0,95 angegeben. Dieser Standardwert entspricht einer hohen Wahrscheinlichkeit, dass bei den angegebenen Differenzen die Erkenntnis „Fertigungsstrategie A ist besser als Fertigungsstrategie B“ richtig ist. Als Orientierung sind in der Tabelle in den unteren beiden Zeilen auch die korrespondierenden Werte ohne eine Unterscheidung der Bauteile anhand ihrer Form angegeben. Da die zugrunde liegenden Verteilungen nicht dem Kriterium der Normalverteilung entsprechen, sind diese Angaben allerdings nur bedingt aussagekräftig.

Die Auswertung spricht für die Aussagekraft der Kennzahlen als Mittelwert der erzielten Zeitspanvolumina und Zeitspanflächen. Bei drei der vier durchgeführten Untersuchungsreihen ist die Standardabweichung im Verhältnis zum Delta zwischen den Mittelwerten klein. Wie der t-Test mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit bestätigt, ist aber die Standardabweichung beim Schruppen I ohne Abheben zu groß, um schon nach wenigen Anwendungen eine Aussage über die Leistungsfähigkeit dieser Bearbeitungsoperation treffen zu können. Wenn allerdings eine Bewertung unter subjektiver Berücksichtigung der Segmentform erfolgt, kann die Aussagekraft der quantitativen Gütekriterien so weit verbessert werden, dass eine Beurteilungsmöglichkeit bei realitätsnaher Anzahl an gefertigten Segmenten besteht. Dieser Erkenntnis ent-

	$\sigma$	n=2	n=5	n=10	n=20	n=40
Schruppen I - A/B (in $\frac{cm^3}{min}$ )	4,5	21,6	9,2	6,1	4,2	3
Schlichten I - A/B (in $\frac{cm^2}{min}$ )	0,83	3,99	1,69	1,13	0,78	0,55
Schruppen I (in $\frac{cm^3}{min}$ )	7,1	48,1	16,6	10,8	7,4	5,2
Schlichten I (in $\frac{cm^2}{min}$ )	1,12	7,61	2,63	1,72	1,18	0,82

Tabelle 5.1: Resultate (t-Test) zur Unterscheidung zweier Fertigungsstrategien

sprechend, soll der Anwender bei der Auswahl einer „guten“ Fertigungsstrategie im NC-Manager für ein zu bearbeitendes Bauteil nicht nur auf die Kennzahlen als Mittelwert der erzielten quantitativen Güten achten, sondern ergänzend auch Tendenzen bei ähnlichen Standard-Modulsegmenten in der Abarbeitungshistorie berücksichtigen.

## 5.2 Validierung des NC-Managers im Anwendungsprozess

Die technische Anwendung des NC-Managers basiert sowohl bei der Erstellung der NC-Programme als auch bei der Definition der qualitativen Gütekriterien auf menschlicher Einflussnahme. Während im ersten Validierungsschritt der Einfluss der Maschinendynamik auf die quantitativen Gütekriterien untersucht wurde, steht in diesem Abschnitt die menschliche Komponente in den technischen Abläufen im Vordergrund. Die Fertigungsstrategien sollen von den NC-Programmierern am Standort der Promotion bewertet und modifiziert werden können. Auch basiert die Vergabe der qualitativen Gütekriterien bezüglich der Prozess- und Flächenqualität auf einer subjektiven Einschätzung des Maschinenbedieners. Um den Faktor einer subjektiven Definition der qualitativen Güte explizit in die Validierung miteinzubeziehen, ist eine spanende Bearbeitung von Standard-Modulsegmenten an einer CNC-Fräsmaschine notwendig.

Hierzu sollen die Beschnittmesser von dem in der Abbildung 5.9 dargestellten Presswerkzeug als Standard-Modulsegmente gefertigt werden. In der rechten Werkzeughälfte ist die bereits produktiv umgesetzte Variante als Gussmesser anhand der originalen Konstruktion dargestellt. Links sieht man die Ausführung des spiegel-

symmetrischen Beschnitts auf Basis des Konzeptes der Standard-Modulsegmente. Für die Validierung stehen somit die Konstruktionsdaten von fünf verschiedenen Segmenten in jeweils gespiegelter Ausführung zur Verfügung.

### 5.2.1 Modifikation der Fertigungsstrategien

Eine elementare Eigenschaft von selbstoptimierenden Prozessen ist die Möglichkeit, bestehende Fertigungsstrategien als Grundlage der Automatisierung zu modifizieren und neue hinzuzufügen. Anhand der vorab dargestellten 10 Standard-Modulsegmente soll dies von Anwendern im NC-Manager erprobt werden. Hierzu stehen am Standort der Promotion 4 NC-Programmierer mit Kompetenzen im CAM-System CATIA V5 zur Verfügung.

Nach einer Einführung in die Arbeitsweise mit dem NC-Manager sind von den Anwendern im Wechsel 10 unterschiedliche Fertigungsstrategien definiert worden. Die NC-Programme sind sowohl komplett neu erstellt oder bauen auf bereits im NC-Manager abgelegte Varianten auf. In der Abbildung 5.10 ist das Ergebnis im NC-Manager dargestellt.

Das Ablegen neuer Fertigungsstrategien im NC-Manager ist auf Basis der in der Erprobung gemachten Erfahrungen als einfach zu beurteilen. Gleiches gilt für die Möglichkeit, sich anhand der Strukturierung im NC-Manager und der dort hinterlegten Strategieparameter einen Überblick über die bereits vorhandenen Fertigungsstrategien zu verschaffen.

Die Versuche haben aber auch gezeigt, dass sich die Anwender zum Teil nicht an die Vorgabe gehalten haben, nur die Geometrien zu nutzen, die in dem Konstruktionsmodul standardisiert für die NC-Programmierung aufbereitet werden. Damit ist die Vorlage ohne den Mehraufwand einer zusätzlichen Aufbereitung nicht für eine automatisierte NC-Programmierung zu nutzen. Auch ist in den Versuchen eine Bearbeitungsoperation genutzt worden, deren Auswertung aufgrund der geringen Bedeutung noch nicht im NC-Manager vorgesehen ist. Für einen produktiven Einsatz des NC-Managers ist in beiden Bereichen die Auswahlmöglichkeit des Anwenders auf abgesicherte Elemente einzuschränken.

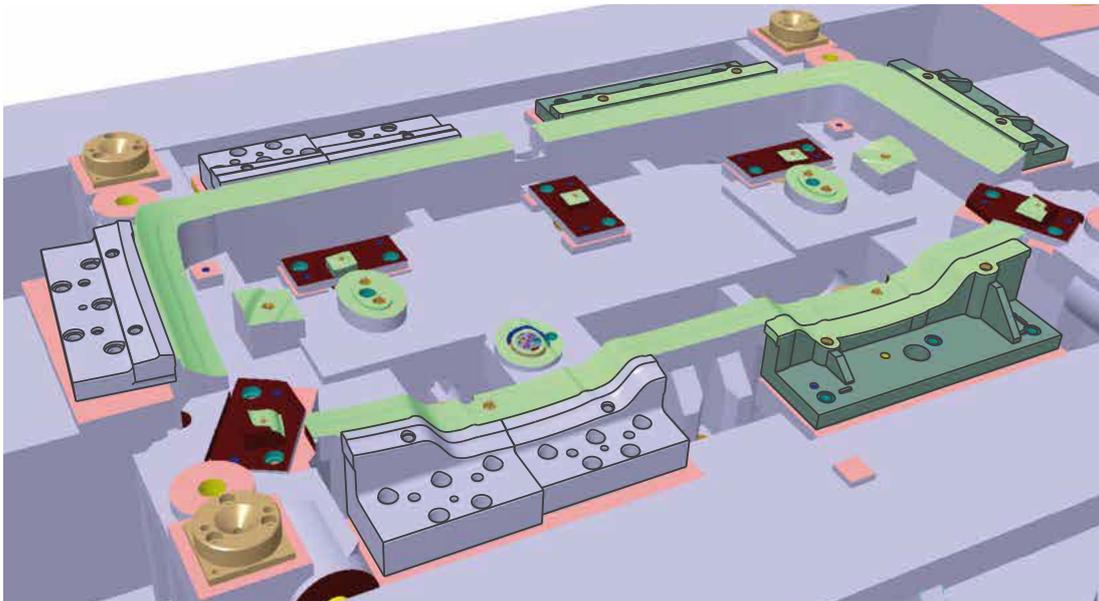


Abbildung 5.9: Werkzeugkonstruktion für die zweite Validierungsphase

### 5.2.2 Bewertung in der Segmentfertigung

Die Leistungsfähigkeit eines NC-Programms zeigt sich im Anfertigungsprozess des zugrunde liegenden Bauteils. Neben des bereits im Vorfeld untersuchten Einflusses der Maschinendynamik spielt dabei auch der Maschinenbediener eine wesentliche Rolle. Über Regler an der Maschinensteuerung kann er prozentual Einfluss auf die Vorschubgeschwindigkeit und die Drehzahl nehmen. In der Praxis zeigt sich, dass diese Eingriffsmöglichkeit bisweilen in der Einzelanfertigung mit Ähnlichkeitscharakter notwendig ist, um eine Prozesssicherheit der nur einmal genutzten NC-Programme zu gewährleisten. Gleich der Prozessqualität zeigt sich auch die Oberflächenqualität der Schlichtbearbeitung erst an der Fräsmaschine.

Die Beschnittmesser des Validierungsbeispiels werden jeweils nach Fertigstellung des NC-Programms aus den vorgefrästen Standard-Modulesegmenten gefertigt (der gesamte Anfertigungsprozess ist im Anhang C.3 auf Seite 111 dargestellt). Nach Abschluss der Bearbeitung wird der Maschinenbediener von dem MDE-System aufgefordert, die Prozess- und die Flächenqualität auf einer Notenskala von eins (sehr gut) bis fünf (mangelhaft) zu bewerten. Bei der Prozessqualität gilt die Vorgabe, NC-Programme mit einer Vier zu bewerten, die nur durch einen Eingriff des Maschinenbedieners abzufahren sind. Eine Fünf ist zu vergeben, wenn das NC-Programm trotzdem abgebrochen werden muss.

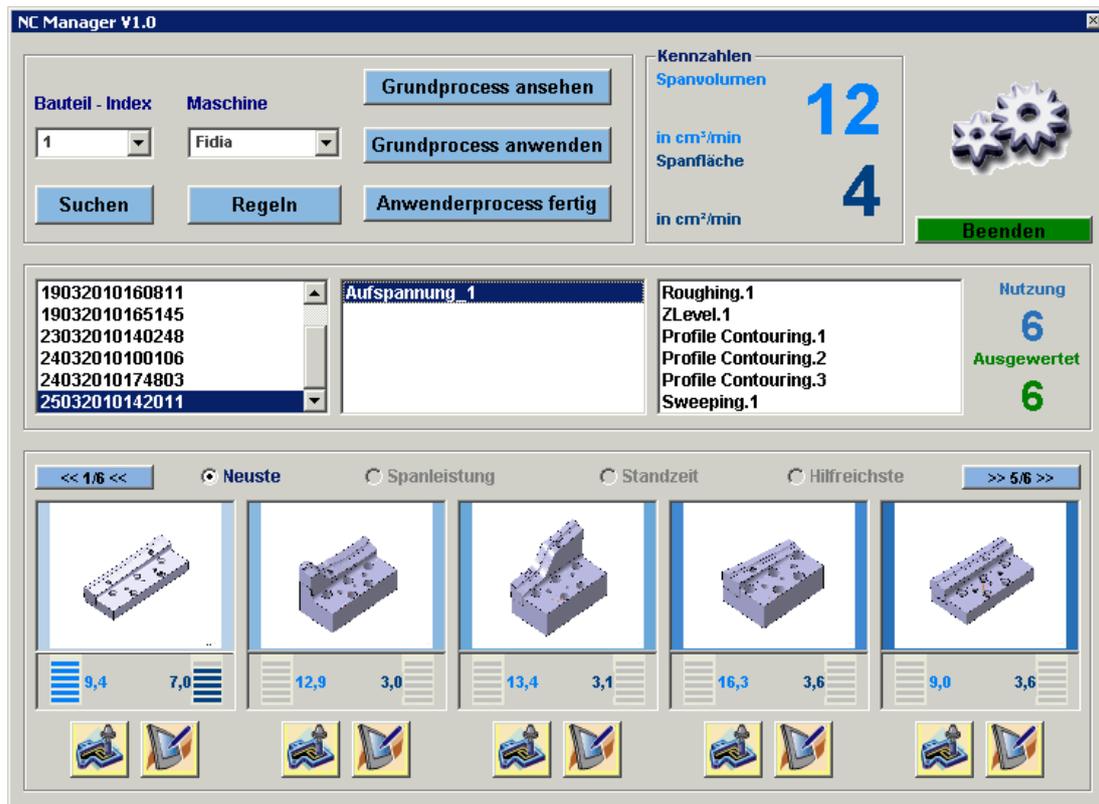


Abbildung 5.10: Anwendung des NC-Managers zur Segmentfertigung

In der Abbildung 5.11 sind die physikalischen Ergebnisse der Versuchsfertigung dargestellt. Der Maschinenbediener steht vor keiner großen Herausforderung, die Prozessqualität der Segmentfertigung zu bewerten. Auch hat eine Verbesserung der Prozessqualität oberhalb der Schwelle zum „es funktioniert“ keine wesentlichen Auswirkungen über die Anfertigung hinaus. Dem gegenüber ist die Oberflächengüte als elementarer Teil der Bauteil-Qualität entscheidend für den Folgeprozess. Um die Aussagekraft einer subjektiven Bewertung der Oberflächengüte abschätzen zu können, werden im Folgenden die Bewertungen des Maschinenbedieners mit Messreihen zur Bestimmung der mittleren Rauheit  $R_a$  verglichen.

Wie in der Abbildung 5.12 dargestellt, sind mit einem mobilen Rauheitsmessgerät an jedem geschichteten Segment 8 Messungen vorgenommen worden. Das Messgerät erfasst bei jeder Messung das Rauheitsprofil einer Einzelmessstrecke auf einer Länge von 5 mm und berechnet daraus die mittlere Rauheit  $R_a$  als Indikator für die Qualität von maschinenbearbeiteten Oberflächen. Wie die statistischen Auswertungen der Messreihen im Anhang D.3 auf Seite 123 zeigen, streuen die Messwerte zum Teil

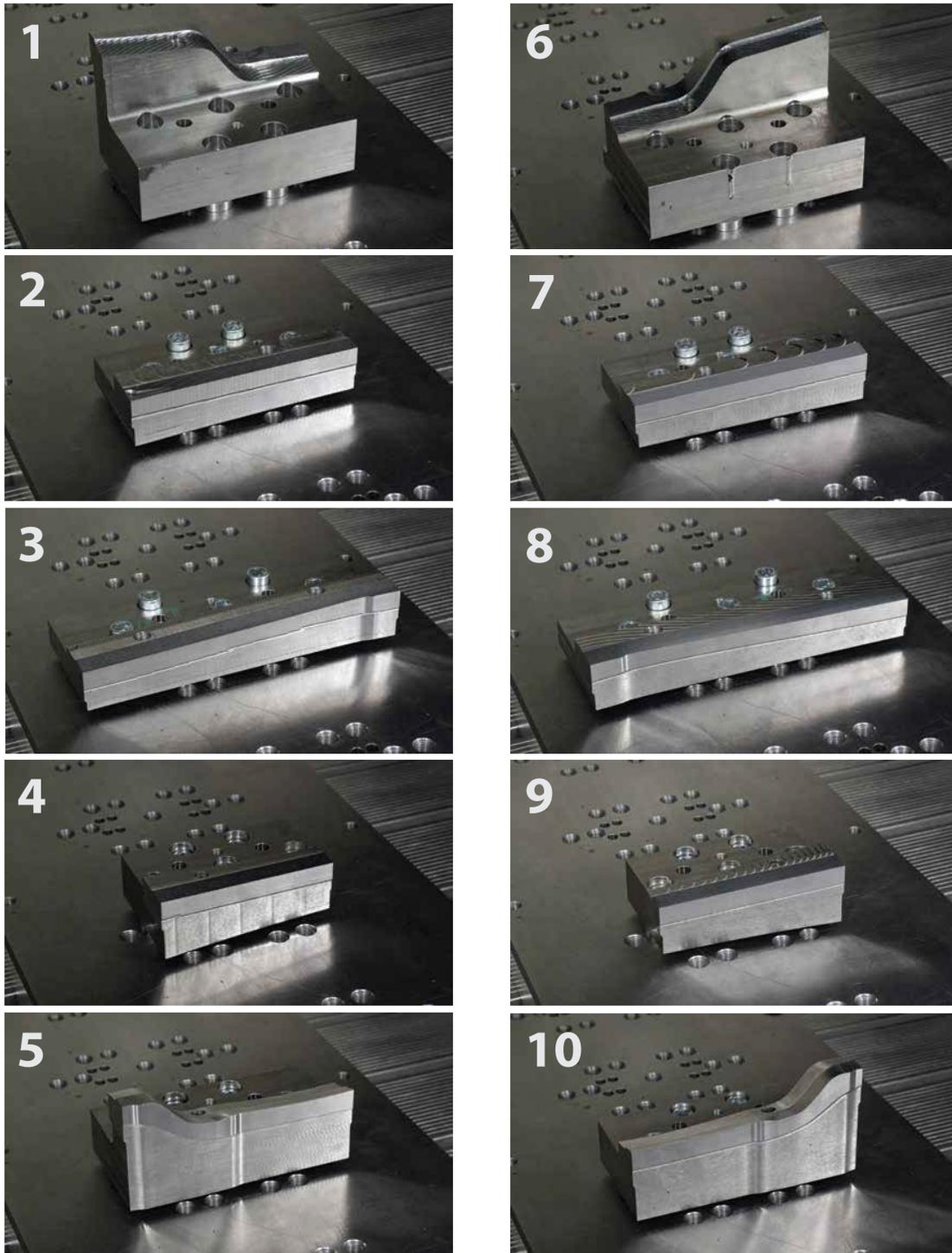


Abbildung 5.11: Fräsergebnisse der 10 Iterationsschleifen

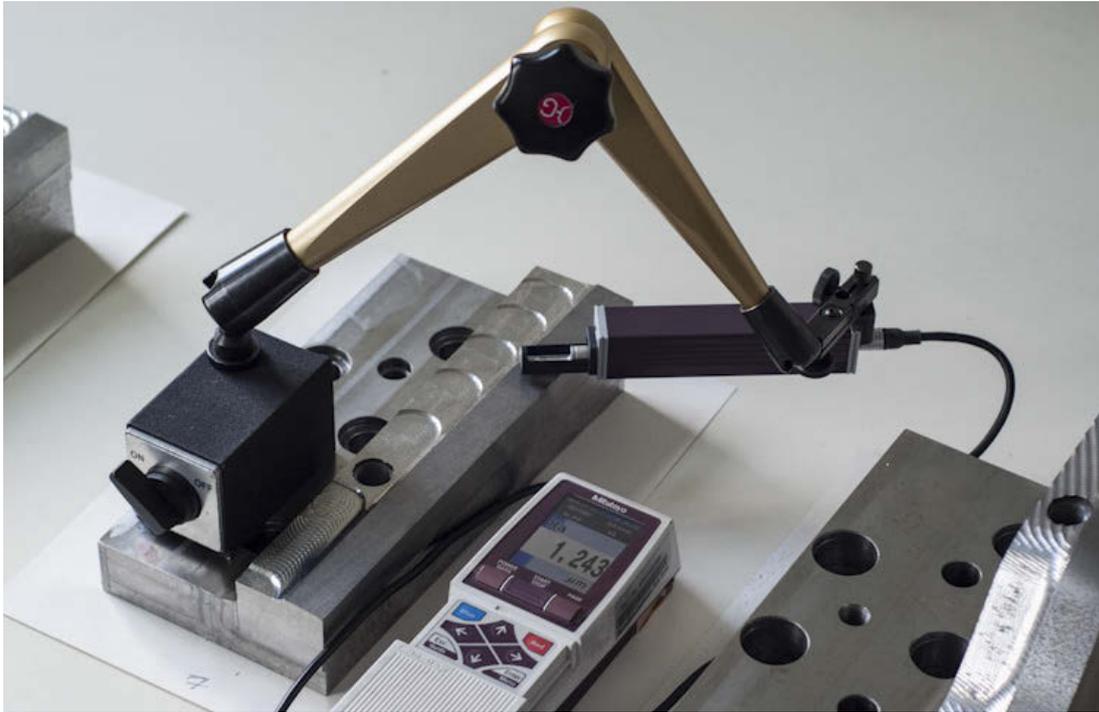


Abbildung 5.12: Messung der mittleren Rauheit  $R_a$  von den Formflächen

sehr stark in Abhängigkeit von der Position des Messgerätes auf der Formfläche, obwohl immer normal zur Fräsrichtung gemessen wurde.

Für die erfassten Standard-Modulsegmente sind in der Abbildung 5.13 die Mittelwerte der Messreihen den subjektiven Bewertungen des Maschinenbedieners gegenüber gestellt. Die Werte für  $R_a$  variieren von  $0,6 \mu m$  bis  $2,6 \mu m$ . Die Bewertung der Flächenqualität variiert von 1 bis 4 und stimmt tendenziell im Verlauf mit den  $R_a$  Werten überein. Das Segment mit dem besten  $R_a$  Wert ist auch als sehr gut bewertet worden. Dem gegenüber ist jedoch das Segment mit dem schlechtesten  $R_a$  Wert als einziger Ausreisser deutlich zu gut bewertet worden. Vor dem Hintergrund des Aufwandes einer objektiveren Messung der Oberflächengüte und der festgestellten Streuung innerhalb der Fläche selbst, ist der Ansatz einer subjektive Bewertung durch den Maschinenbediener insgesamt als tragfähig zu bewerten.

### 5.2.3 Auswertung der Fertigungsstrategien

Es ist nicht explizit Ziel der durchgeführten Versuche mit dem NC-Manager gewesen, die Fertigungsstrategien anhand der Gütekriterien iterativ zu optimieren. Jedoch ist festzustellen, dass sich die qualitativen Gütekriterien von ausreichenden hin zu sehr

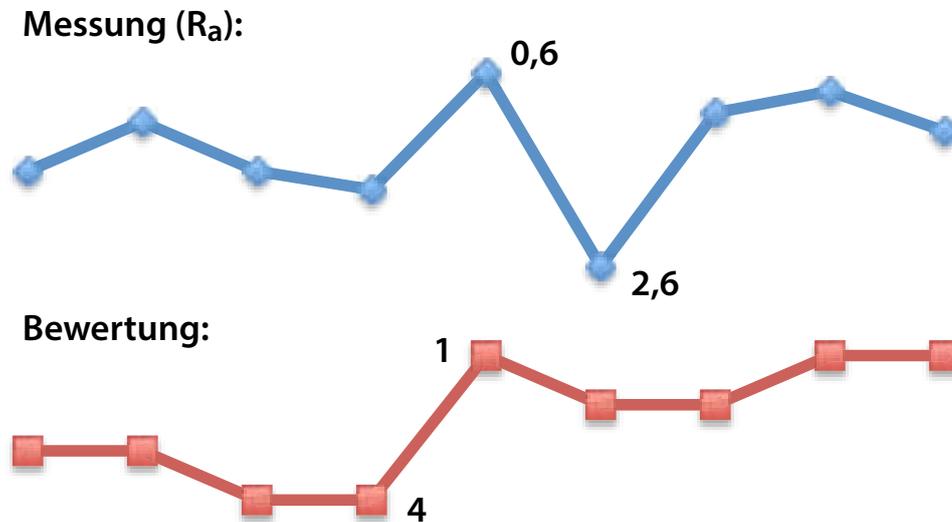


Abbildung 5.13: Vergleich von der gemessenen Oberflächengüte zur Bewertung

guten Bewertungen entwickelt haben. Anders sieht es bei den quantitativen Gütekriterien aus. Hier sind mitunter große Sprünge zu verzeichnen. Im Folgenden soll aufgezeigt werden, wie anhand der Auswertemöglichkeiten im NC-Manager Rückschlüsse auf ein Verbesserungspotential der Fertigungsstrategien zu gewinnen sind.

Ziel der spanenden Fertigung ist die Herstellung der benötigten Bauteile mit ausreichender Qualität bei möglichst geringem Ressourceneinsatz. Eine ausreichende Qualität wird, Maßhaltigkeit vorausgesetzt, über die qualitativen Gütekriterien dokumentiert. Die Kennzahlen als Mittelwert der Zeitspanfläche und -volumens ermöglichen eine Aussage über die Effizienz der Fertigungsstrategien. Darüber hinaus ermöglicht die in der Abbildung 5.14 dargestellte Vorschubanalyse die einzelnen Bearbeitungen detaillierter zu beurteilen und so Impulse für eine Optimierung zu generieren. Bei der konkreten Fertigungsstrategie aus der Validierung kann beispielsweise der Vorschub für die Schlichtbearbeitung um fast 90 Prozent erhöht werden. Wie am tatsächlich erreichten Vorschub zu erkennen ist (grüne Markierung), hat der Maschinenbediener den Vorschub an der Maschinensteuerung entsprechend nach oben korrigiert und die Flächenqualität trotzdem als gut bewertet. Umgekehrt weist die Z-Level-Bearbeitung einen hohen Anteil an Leerbewegungen im Eilgang auf (rote Markierung) und erreicht nur einen Vorschub von 50 Prozent des vorgegebenen Sollwertes.

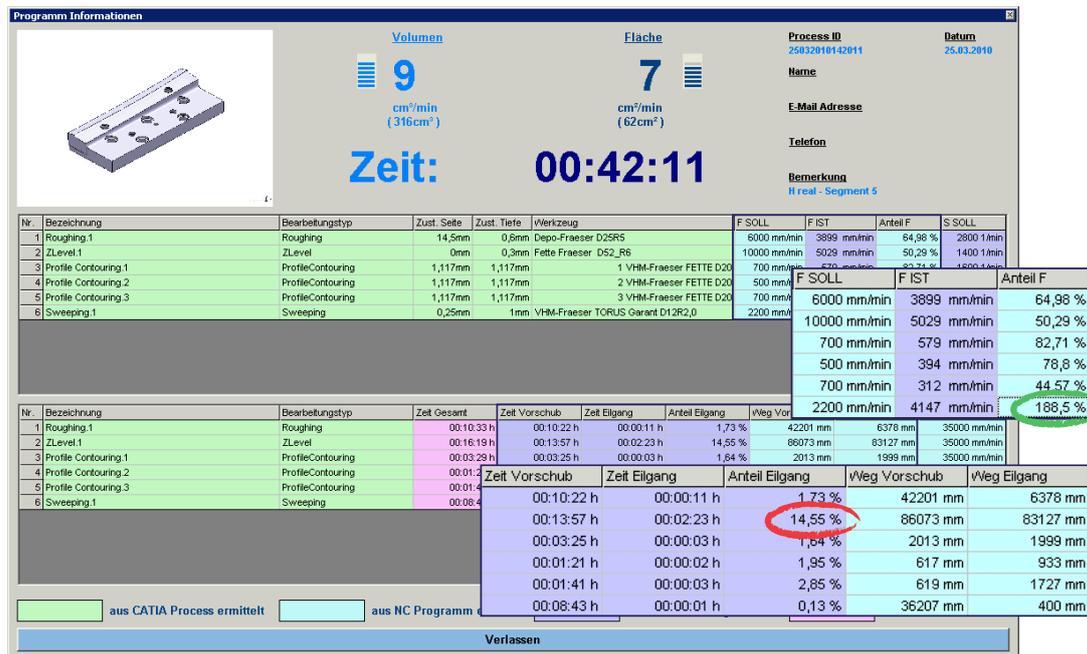


Abbildung 5.14: Auswertung der Vorschubanalyse im NC-Manager

Die implementierte Vorschubanalyse bietet besonders im Vergleich von unterschiedlichen Fertigungsstrategien eine wichtige Möglichkeit zum Erkenntnisgewinn. Die Auswertung ist Auslöser einiger konstruktiver Diskussionen im Verlauf der Validierung gewesen. Allerdings hat sich dabei auch gezeigt, dass die tabellarische Darstellung der Analyse für die meisten Anwender in der NC-Programmierung zu überladen und wenig intuitiv ist. Auch wäre es sinnvoll, die Vorschubkorrektur durch den Maschinenbediener explizit anzugeben, um bei einer Unterschreitung des Soll-Wertes diesen Einfluss von dem einer mangelnden Maschinendynamik unterscheiden zu können.

### 5.3 Statistische Untersuchung der realen Fertigungsstrategien

Wie in der Abbildung 5.10 zu sehen ist, sind zusätzlich zu dem gefertigten Segment auch alle weiteren Segmente der Werkzeugseite mit der Fertigungsstrategie programmiert worden. Ziel ist es dabei einerseits, den verbleibenden Aufwand in der NC-Programmierung ohne eine Modifikation an den realen Fertigungsstrategien zu bewerten. Zum anderen sind alle fünf Segmente ähnlich der Versuche zum

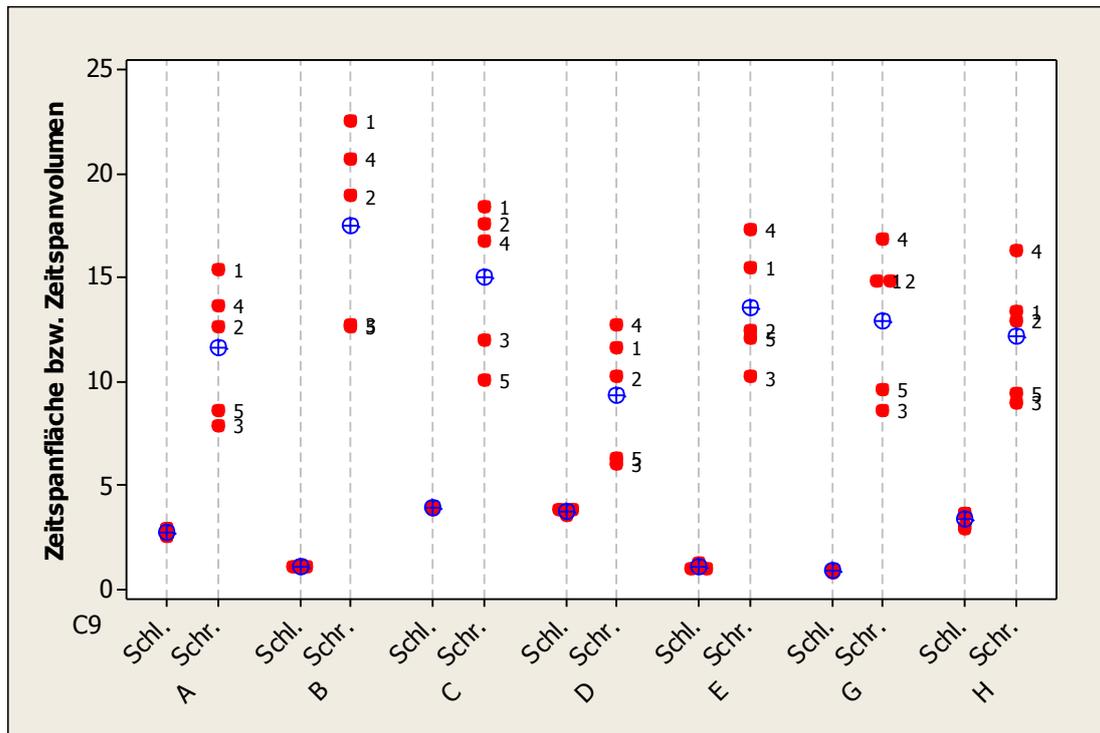


Abbildung 5.15: Zeitspanfläche und -volumen der realen Fertigungsstrategien

Einfluss der Maschinendynamik im Abschnitt 5.1 an der Versuchsfräse in der Luft abgefahren worden, um die Aussagekraft der Kennzahlen in der konkreten Anwendung zu verifizieren. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in der Abbildung 5.15 dargestellt. Die Kennzahlen für die Zeitspanfläche entsprechen mit einer durchschnittlichen Streuung von 6 Prozent des Mittelwertes den Resultaten der ersten Versuchsreihe. Die Streuung der Ergebnisse für das Zeitspanvolumen ist allerdings mit 27 Prozent deutlich größer als der im Abschnitt 5.1.2 an Seite 72 maximal ermittelte Wert von 14 Prozent.

In der Abbildung 5.15 sind die Zeitspanvolumina der einzelnen Fertigungsstrategien nach den jeweils zugrunde liegenden Segmenten nummeriert. Es fällt auf, dass die Segmente 1, 2 und 4 tendenziell ein hohes Zeitspanvolumen haben, während die Segmente 3 und 5 im unteren Bereich der Spannweite liegen. Diese Verteilung korrespondiert mit dem zu zerspannenden Volumen der Segmente. Je größer also der zeitliche Anteil der eigentlichen Schrüppbearbeitung im Vergleich zu der Umriss- und Stoßbearbeitung ist, desto höher ist das Zeitspanvolumen. Die gemeinsame Betrachtung aller Bearbeitungen außer des Schlichtfräsens scheint also bei realen Fertigungsstrategien eine negative Auswirkung auf die Kennzahlengüte zu haben.

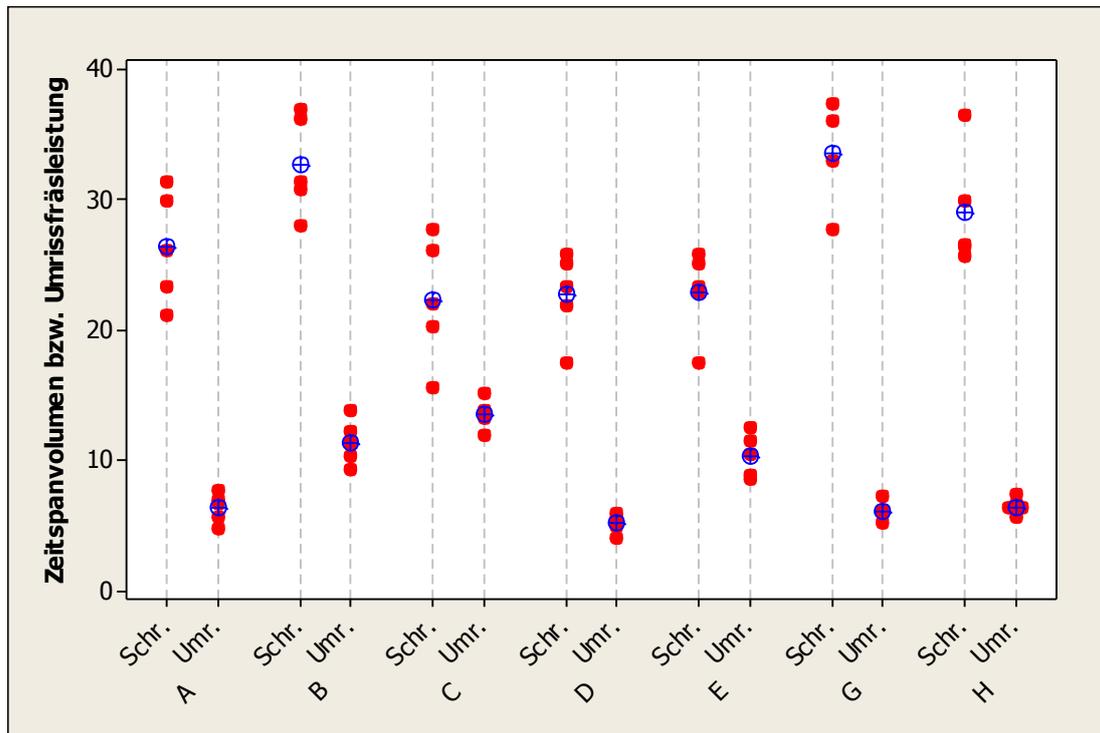


Abbildung 5.16: Differenzierung nach Schrupp- und Umrissbearbeitung

Diese Erkenntnis führt zu dem Ansatz, eine eigene Kennzahl für die Umriss- und Stoßbearbeitung einzuführen. Als Bezugsgröße dient die Fläche von der Umrisskurve bis zur Grundfläche der Segmente. In der Abbildung 5.16 sind die Werte auf Basis der Unterscheidung von Schrupp- und Umrissbearbeitung dargestellt. Die mittlere Streuung reduziert sich dadurch auf 15 Prozent für die Schruppbearbeitung und auf 14 Prozent für den Anteil der Umrissbearbeitung.

Dieses Ergebnis spricht dafür, den NC-Manager für die Bauteilklasse der Standard-Modulsegmente um eine weitere Kennzahl zu erweitern. Die Umsetzung ist in der Abbildung 5.17 dargestellt. Während die bisherige Aufteilung bauteilübergreifend Anwendung finden könnte, ist eine zusätzliche Kennzahl für die Umrissbearbeitung bauteilspezifisch.

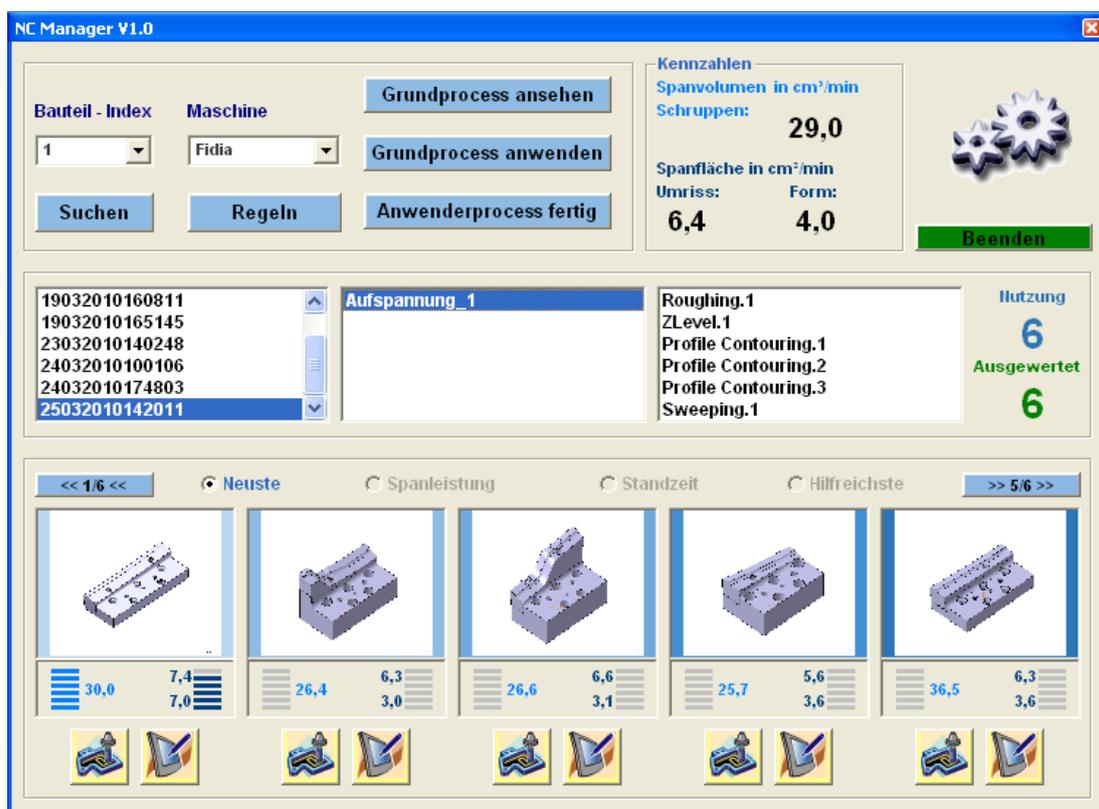


Abbildung 5.17: Umsetzung des NC-Managers mit drei Kennzahlen

## 5.4 Zusammenfassung und Bewertung der Validierung

Der NC-Manager erfüllt seine Aufgabe als Werkzeug zur Umsetzung von selbstoptimierenden Prozessen in der NC-Verfahrenskette zur Fertigung von Standard-Modulsegmenten. Im Folgenden werden die Erkenntnisse aus der Validierung anhand der drei Anforderungen an selbstoptimierende Prozesse aus dem Abschnitt 3.3 ab Seite 47 zusammengefasst und bewertet.

Die Anwendung und Modifikation von Fertigungsstrategien als Grundlage einer weitgehend automatisierten NC-Programmierung von Standard Modulsegmente mit dem NC-Manager funktioniert. Im Verlauf der Versuchsdurchführung sind über 100 Standard-Modulsegmente mit hinterlegten Vorlagen programmiert, an einer CNC-Fräsmaschine abgefahren und anschließend im NC-Manager ausgewertet worden. Der Aufwand zur NC-Programmierung ist schon bei der prototypischen Umsetzung einer Automatisierung wesentlich geringer, als es nach der herkömmlichen Arbeitsweise am Standort der Promotion der Fall gewesen wäre. Bei der Wiederverwendung von hinterlegten Fertigungsstrategien hat sich die definierte Schnittstelle zur Konstruktion bewährt. Wie die Versuche belegen, ist allerdings die Auswahlmöglichkeit des Anwenders bei der Modifikation und Erstellung von Vorlagen auf die dafür aufbereiteten geometrischen Elemente zu beschränken. Eine verbale Arbeitsanweisung hierzu ist nicht ausreichend. Von dieser Einschränkung abgesehen, kann jeder der vier NC-Programmierer auf Basis seiner Kompetenz in CATIA V5 bestehende Fertigungsstrategien weiter entwickeln oder auch ganz neue Fertigungsstrategien im NC-Manager hinterlegen. Damit kann die Umsetzung der ersten Anforderung an selbstoptimierende Prozesse mit dem NC-Manager als erfolgreich angesehen werden.

Im NC-Manager können Vorlagen zur Automatisierung parallel abgelegt und von den Anwendern verwendet werden. Alle Anwender haben über ein entsprechendes Netzlaufwerk Zugriff auf den NC-Manager und damit auf eine zentrale Sammlung der favorisierten Fertigungsstrategien. In der Versuchsreihe unter Beteiligung der NC-Programmierer ist ein sehr unterschiedlicher Umgang mit der vorhandenen Transparenz zu beobachten gewesen. Während ein Teil der Probanden sich sehr für die Lösungsvarianten der Kollegen interessieren, gehen andere gar nicht auf die vorhandenen Fertigungsstrategien ein und setzen direkt eigene Ideen um. Dabei ist festzustellen, dass die Anwender aufgrund der Versuchsbedingungen nicht unter dem

Ergebnisdruck der normalen Arbeit stehen und dazu neigen, diese Freiheit für ihre persönliche Entfaltung zu nutzen.

Hinsichtlich einer transparenten Darstellung ist die dreigliedrige Strukturierung der Fertigungsstrategien (siehe Abschnitt 4.2.2.2) als gut zu bewerten. Verbesserungspotential besteht allerdings bei der Bezeichnung der Vorlagen. Die aktuelle Benennung hat aufgrund des numerischen Inhaltes für die Anwender kaum einen Wiedererkennungswert und sollte durch eine signifikantere Bezeichnung ersetzt werden. Die Analyse und Darstellung der Strategieparameter im NC-Manager wird von den Anwendern als gelungen bewertet, wenngleich der Ursprungsprozess häufiger als vermutet in CATIA V5 geöffnet wird. Aufgrund der Erkenntnisse aus der Versuchsreihe mit den Anwendern ist die Schlussfolgerung zulässig, dass der NC-Manager (abgesehen von den genannten Einschränkungen) auch der zweiten Anforderung gerecht wird.

Die Bestätigung der dritten Anforderung bezüglich einer Rückführung geeigneter Gütekriterien nimmt eine wesentliche Stellung in der Ausarbeitung zur Validierung ein. Es wird aufgezeigt, dass die Leistungsfähigkeit von Fertigungsstrategien auf Grundlage der quantitativen Gütekriterien und deren Aggregation zu Kennzahlen sowie der qualitativen Gütekriterien ausreichend gut zu beurteilen ist. Dazu ist es allerdings notwendig, eine weitere bauteilspezifische Kennzahl für die Umrissbearbeitung einzuführen. Während Kennzahlen zur Schrupp- und Schlichtbearbeitung prinzipiell auf alle Bauteile der Einzelanfertigung mit Ähnlichkeitscharakter zu übertragen sind, kann bei der Umrissbearbeitung nicht davon ausgegangen werden. Die dritte Anforderung ist somit in der Umsetzung des NC-Managers bisher nur für Standard-Modulsegmente erfüllt. Wie die Validierung jedoch zeigt, funktioniert das Prinzip der Rückführung von Gütekriterien aus dem Anfertigungsprozess und kann spezifisch auf weitere Bauteilklassen übertragen werden.

Als Werkzeug für die Umsetzung von selbstoptimierenden Prozessen vereinigt der NC-Manager erfolgreich das Potential einer Automatisierung der NC-Verfahrenskette mit der Möglichkeit für die Anwender, Verantwortung für die Verbesserung der Fertigungsstrategien zu übernehmen. Damit ist die Hypothese als verifiziert anzusehen. Es sei dazu angemerkt, dass die Möglichkeiten des NC-Managers zwar ein notwendiges, aber kein hinreichendes Kriterium für den gewünschten Effekt sind. Entsprechend der Beiträge im zweiten Kapitel sind dazu auch adäquate Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Einführung selbstoptimierender Prozesse notwendig.

# Kapitel 6

## Zusammenfassung und Ausblick

Im Folgenden werden die Inhalte und Ergebnisse der Entwicklung selbstoptimierender Prozesse in der NC-Verfahrenskette zusammengefasst. Im Ausblick werden anschließend die Perspektiven thematisiert und ein Forschungsdesiderat aufgezeigt.

### 6.1 Zusammenfassung

In dieser Dissertation spielen sowohl die technischen Möglichkeiten zur Automatisierung im Umfeld der NC-Programmierung als auch das Potential der Ressource Mensch zur Optimierung der Fertigungsstrategien eine zentrale Rolle. Wie ausgeführt, bieten sich in beiden Themenfeldern erhebliche Chancen für die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens. Eine Analyse der bestehenden Wechselwirkungen zeigt allerdings auf, dass etablierte Methoden und Werkzeuge zur weitgehenden Automatisierung der Arbeitsabläufe in der NC-Programmierung eine eigenverantwortliche Optimierung der Fertigungsstrategien durch die Anwender einschränken. Angelehnt an die Methode des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses wird folgende Hypothese zur Vereinbarkeit der aufgezeigten Potentiale in der NC-Programmierung der Domäne Werkzeugbau aufgestellt:

Ein selbstoptimierender Prozess ermöglicht in der NC-Verfahrenskette einer Einzelanfertigung mit Ähnlichkeitscharakter eine kontinuierliche Optimierung der Fertigungsstrategien durch die Anwender bei weitgehend automatisierten Arbeitsabläufen.

Das erarbeitete Konzept der selbstoptimierenden Prozesse beinhaltet neben einer weitgehenden Automatisierung der Arbeitsinhalte mit Hilfe von Werkzeugen und

Methoden des Knowledge-Based Engineering drei weitere wesentliche Eigenschaften:

1. Der NC-Programmierer muss alle relevanten Anteile der zur Automatisierung hinterlegten Fertigungsstrategien modifizieren können.
2. Verschiedene Fertigungsstrategien müssen parallel genutzt und weiterentwickelt werden können. Diese sind transparent und für alle Anwender zugänglich in einer gemeinsamen Wissensbasis abzulegen.
3. Die Güte der Fertigungsstrategien ist im Folgeprozess anhand definierter Kriterien zu erfassen und in der gemeinsamen Wissensbasis transparent darzustellen.

Die Umsetzung dieses Konzeptes am Beispiel der Standard-Modulesegmente zeigt, dass selbstoptimierende Prozesse aus technischer Sicht funktionieren. Die NC-Programmierung der Standard-Modulesegmente lässt sich mit dem NC-Manager - von einigen prototypischen Eigenheiten abgesehen - weitestgehend automatisieren. Die Anwender können eigene Ideen umsetzen und neue Fertigungsstrategien in die gemeinsame Wissensbasis einpflegen. Sie können sich ebenfalls schnell einen Überblick über die Bandbreite der parallel existierenden Fertigungsstrategien verschaffen. Dabei schafft die Nutzungshistorie mit den erfassten Gütekriterien Transparenz hinsichtlich der Lösungsqualität für das bisherige Anwendungsspektrum.

Die Aggregation der quantitativen Gütekriterien zu Kennzahlen erlaubt dem Anwender, aus den vorhandenen Fertigungsstrategien die bisher leistungsfähigste auszuwählen. Abgesichert wird die Prozess- und Flächenqualität auf Basis einer Bewertung der bisherigen Anwendungen durch die Maschinenbediener. Es wird in der Arbeit aufgezeigt, dass eine subjektive Beurteilung dieser Gütekriterien im Anfertigungsprozess ausreichend ist. Die Maschinen-Daten-Erfassung der real an der Fräsmaschine erreichten Vorschübe berücksichtigt den Eingriff des Maschinenbedieners über die Maschinensteuerung und ermöglicht eine detaillierte Analyse der Fertigungsstrategie im NC-Manager. Aus den identifizierten Stärken und Schwächen können Impulse für eine kontinuierliche Optimierung der Fertigungsstrategien generiert werden.

In den Versuchsreihen zur technischen Validierung wurde die Tauglichkeit des NC-Managers unter Beweis gestellt und wurden zusätzlich Erkenntnisse zur Verbesserung der Handhabung gewonnen. Die Erfahrungen mit dem NC-Manager als Werkzeug zur Umsetzung von selbstoptimierenden Prozessen in der NC-Verfahrenskette

bestätigen die eingangs formulierte Hypothese und liefern eine Antwort auf die zentrale Forschungsfrage dieser Dissertation.

## 6.2 Ausblick

Der konsequente nächste Schritt für die Umsetzung von selbstoptimierenden Prozessen ist die Anwendung des NC-Managers im produktiven Alltagsgeschäft. Vor dem Hintergrund der aufgezeigten Vorteile wäre der Aufwand zu vertreten, die Erkenntnisse aus der Validierung im NC-Manager zu berücksichtigen und eine automatische Verknüpfung der zugeordneten Geometrien vollständig umzusetzen. Zwei strategische Entscheidungen zum Ende der Promotion widersprechen allerdings diesem Vorhaben. Zum einen wird bei der Daimler AG das CAx-System CATIA V5 durch das Konkurrenzprodukt Siemens NX abgelöst. Zum Anderen ist die Software Tebis bis zur vollständigen Migration der Prozesslandschaft auf Siemens NX das einzige noch eingesetzte CAM-System am Standort der Promotion. Damit gibt es keine Einsatzperspektiven für die aktuelle Umsetzung des NC-Managers.

Jedoch ist das Konzept der selbstoptimierenden Prozesse so überzeugend, dass der Ansatz bei einem möglichen Einsatz von Siemens NX als CAM-System gegebenenfalls wieder aufgegriffen wird. Nach heutigem Stand bieten sich mit Siemens NX wesentlich bessere Möglichkeiten zur Umsetzung eines NC-Managers. Zum Beispiel wird eine Zuordnung von Fertigungs- zu Designfeatures systemseitig bereits unterstützt. Auch bietet die Programmierschnittstelle von Siemens NX Vorteile.

Aus den schlechten Ergebnissen zur Berechnung der Bearbeitungszeit ergibt sich eine interessante Forschungsfrage. Wie es bereits realitätsnahe kinematische Maschinenmodelle für eine Kollisionsüberprüfung gibt, könnte versucht werden, die Maschinendynamik im Vorfeld der realen Bearbeitung abzubilden. Dieses Modell könnte aus einer Rückführung der Log-Files entsprechend der Umsetzung mit dem jetzigen NC-Manager für die unterschiedlichen Fräsmaschinen und Bearbeitungsoperationen trainiert werden. Vermutlich wären damit im Vergleich zum aktuellen Konzept der Kennzahlen genauere Vorhersagen möglich.

Der Bezugsrahmen dieser Arbeit beschränkt sich auf die Einzelanfertigung mit Ähnlichkeitscharakter. Über diese Promotion ist in vielen Diskussionen zum Ansatz der selbstoptimierenden Prozesse deutlich geworden, dass die zugrunde liegende Problemstellung prinzipiell bei jeglicher Festlegung der Lösungsmethoden im KBE

besteht. Es ist wünschenswert, dass die vorgestellten Erkenntnisse zum Konzept der selbstoptimierenden Prozesse auch über die Grenzen der Domäne Werkzeugbau hinweg einen Beitrag zur nachhaltigen Einbindung des Anwenders in die Werkzeuge und Methoden des KBE leisten.

# Anhang A

## Die Arbeitsinhalte des Werkzeugbaus

Im Folgenden wird die Ausgangssituation in der Messerfertigung am Standort der Promotion thematisiert. Nach einer kurzen Erläuterung des Gesamtkontextes, wird der etablierte Entstehungsprozess der Beschneidmesser (gilt analog für Umformbacken) sowie die hierfür verwendeten Ressourcen erläutert.

Die Messerfertigung produziert Funktionselemente zum Beschneiden von Blechteilen. Für die Herstellung einer komplexen Fahrzeugkomponente aus Blech werden bis zu sechs Operationen in der Pressenstrasse benötigt. Nachdem in der ersten Operation die Platine geschnitten und diese in der zweiten Operation durch ein Ziehwerkzeug in Form gebracht wurde, wird in den nachfolgenden Beschneidwerkzeugen der zum Tiefziehen benötigte Ziehrand als Ankonstruktion zum eigentlichen Bauteil entfernt. Beim Zusammenfahren von dem Ober- und Unterteil in der Pressenstrasse wird zuerst das Blech durch den Niederhalter fixiert, um danach den Abfall durch Abscheren zwischen den oben verbauten Messern und dem Aufsatz unten abzutrennen. In der Abbildung A.1 sind die Detaillierungsgrade von der Pressenstrasse bis zum Messer als Komponente im Oberteil des Beschneidwerkzeuges abgebildet.

Die Werkzeugsätze für Mercedes-Benz-Cars werden vom Center BM an den Standorten Sindelfingen und Bremen produziert oder von Fremdherstellern beschafft. Dabei werden vor allem die Werkzeuge für die anspruchsvollen Blechteile selbst gefertigt. In Bremen als Standort der Industrie-Promotion sind dies vorwiegend Klappenteile, wie zum Beispiel Türen, Motorhauben oder Heckklappen. Die Messerfertigung ist dabei ein wichtiger Teil des Gesamtprozesses. Die meisten Messer werden aus Gussrohlingen gefertigt, die von externen Gießereien bezogen werden. In verlorenen Formen werden aus Stahlguss die Geometrien der Messer abgebildet, um den Auf-

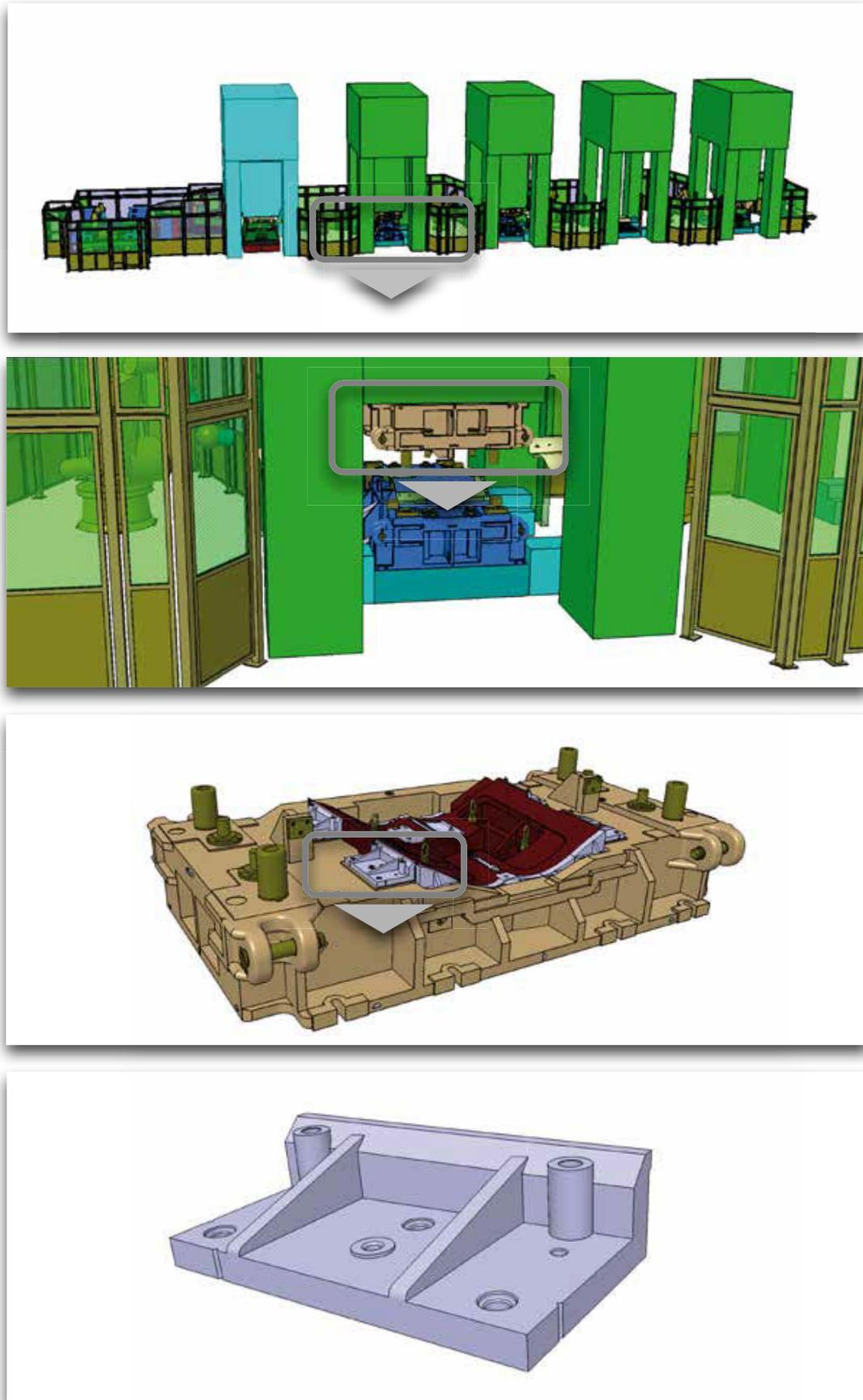


Abbildung A.1: Von der Pressenstrasse zum Beschnittmesser

wand bei der zerspanenden Fertigung zu minimieren. Da die Lieferzeit dieser Gussrohlinge 8 Wochen beträgt, werden schon vor Abschluss der Konstruktion Modelldaten für die Gussbeschaffung bereitgestellt. Dafür muss die Werkzeugkonstruktion im Zusammenspiel mit der parallel entwickelten Feinmethode so weit abgesichert sein, dass sich für die Elemente aus Gussmaterial keine wesentlichen Formänderungen mehr ergeben. Zu diesem Zeitpunkt liegt der „W“-Datensatz des Bauteils vor. Erst kurz vor Fertigstellung der Werkzeugkonstruktion ist auch die Fahrzeugkonstruktion mit dem „\_“-Datensatz abgeschlossen. Dessen geometrische Abweichung zum „W“-Datensatz soll nicht mehr als 3 mm betragen. Durch ein Gussaufmaß von 8 mm auf den Wirkflächen kann auch die fertige Werkzeugkonstruktion auf Basis des „\_“-Datensatzes mit den Gussrohlingen gefertigt werden. Änderungen der Bauteilgeometrie aufgrund von Erkenntnissen aus nachgeschalteten Prozessschritten, z.B. aus dem Rohbau, werden gesondert betrachtet und machen unter Umständen eine Neuanfertigung der Messer notwendig.

Am Standort Bremen wird die Entwicklung der Feinmethode sowie die Konstruktionsumfänge in dem CAD-System CATIA V5 zum großen Teil fremd vergeben. Eine Begleitung bis zur Abnahme der Werkzeugkonstruktionen erfolgt durch die Konstruktionsbetreuer. Alle planerisch notwendigen Arbeitsinhalte, wie zum Beispiel die Gussbeschaffung oder die Erstellung von Arbeitsplänen zur Fertigung der Werkzeuge, werden von den Arbeitsplanern übernommen.

Für die Messerfertigung beträgt das Zeitfenster zwischen Gussanlieferung und Fertigstellung zwei Wochen mit einer Woche Überschneidung zur Messerfertigung von dem nächsten Werkzeug. Die NC-Programmierung für die Gussmesser erfolgt mit dem CAM-System HI-MILL hauptzeitparallel zur Fertigung. Neben Gussmessern werden zunehmend auch Messer aus Halbzeugmaterial eingesetzt. Diese werden hauptsächlich an einer fünfschichtigen CNC-Fräsmaschine bearbeitet. Aufgrund der Komplexität wird das NC-Programm hierfür meistens nicht in der Werkstatt, sondern von den NC-Programmierern erstellt.

Im Anschluss an die Fertigung der Messer wird in der Erstmontage die Verbaubarkeit überprüft, um eventuelle Fehler noch vor dem Härten entdecken und beseitigen zu können. Nach dem Härten werden die Grundflächen geschliffen, die Messer montiert und bei Bedarf die Stöße nachgearbeitet. Die Umrisse der Funktionselemente zum Beschneiden sind genauso wie die Formflächen im Unterteil mit Aufmaß gefertigt worden. Die geforderte Toleranzen des Schnittspaltes sowie der Flächen mit

Kontakt zum Bauteil werden derzeit nur durch die Bearbeitung im Zusammenbau erreicht. Bei anspruchsvollen Beschneideoperationen wird die Geometrie des Unterteils im fast zusammengefahrenen Zustand durch einen Abguss auf die Obermesser übertragen. Diese werden dann wieder demontiert und der Umriss auf Basis der abgeformten Geometrie an speziellen Maschinen geschliffen. Nach der Endmontage werden die Werkzeuge an den Tryout übergeben. Hier wird die Funktionstüchtigkeit der Werkzeuge sichergestellt.

# Anhang B

## Das Konzept der Standard-Modulsegmente

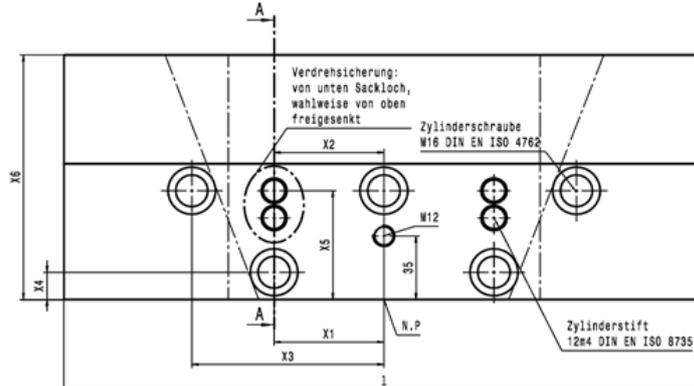
Parallel zu ersten eigenen Überlegungen zum verstärkten Einsatz von Halbzeugmessern am Standort der Promotion, ist von dem Team für Werkzeugentwicklung im Centers die Idee der Standard-Modulsegmente vorgestellt worden. Eine erste Analyse hat gezeigt, dass Standard-Modulsegmente ein hohes Potenzial für die Messerfertigung aufweisen. Die Ausarbeitung der noch undefinierten Prozesskette zur Umsetzung der Standard-Modulsegmente ist Ursprung der Forschungsfrage gewesen. Im Folgenden wird das Konzept der Standard-Modulsegmente erläutert. Ergänzend dazu ist in der Abbildung B.1 der Norm-Entwurf dargestellt.

Bisher können Messer bis zu einem vorgegebenen Maximalgewicht frei konstruiert werden. Die Bohrungen sind zwar in einem Rastermaß von 15 mm zu platzieren, aber auch dies schränkt die Konstruktionsvielfalt kaum ein. Bei den Standard-Modulsegmenten müssen die Messer aus vorgegebenen Rohlingen zu fertigen sein. In die Rohlinge ist bereits ein Bohrbild eingebracht. Bis zu einer Mindestbreite des Halses von 30 mm und der jeweiligen Höhe des Messerfußes kann das Rohsegment bearbeitet werden. Daraus ergibt sich für die Abbildung der Wirkgeometrie ein maximal zur Verfügung stehender Raum. Dieser wird im folgenden Geometrieraum genannt. Weiterhin kann das Rohsegment bis zu den drei mittleren Schraubenlöchern eingekürzt werden. In einer Untersuchung an bestehenden Werkzeugkonstruktionen hat das Team Werkzeugentwicklung den in der Norm hinterlegten Kompromiss zwischen Variantenzahl und Geometrieabstufung gefunden. Ziel des Kompromisses ist es, mit möglichst wenigen verschiedenen Varianten bei geringem Materialeinsatz

 Mercedes-Benz **Presswerkzeugnormen**

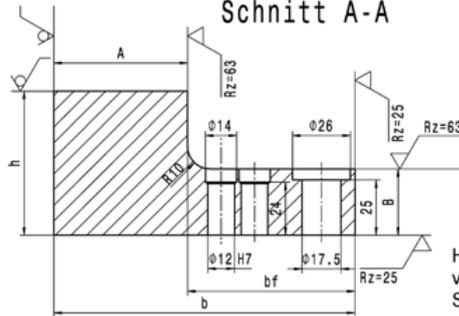
<b>Gruppe:</b> Großwerkzeuge allgemein Anleitungen	<b>Kapitel:</b> GWZ	<b>Normblatt- Nr.:</b> <b>FO 1000 000 000 000</b>	<b>Seite:</b> 1 von 1
<b>Titel: Ausführung von Segmenten (Messer/Backen) als Standardmodulsegment</b>			<b>Ausgabedatum:</b> 2009-06-17

**Anwendung:**  
Stahlblech bis 490N/mm<sup>2</sup> und Aluminiumblech



Entwurf

**Schnitt A-A**



Halbzeugwerkstoff: 1.2358  
vorvergütet 30-34 HRC  
Schneidkante randschichtgehärtet 58 + 4 HRC

Maß	Größe	1	2	3	4	5	6
Zählnummer		xxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxx
Rohmaterial		FL 150x70x255	FL 150x70x355	4 KT 140x255	4 KT 140x355	4 KT 160x255	4 KT 160x355
l		110 - 250	170 - 350	110 - 250	170 - 350	110 - 250	170 - 350
b		105 - 130	105 - 130	105 - 130	105 - 130	120 - 150	120 - 150
h		35 - 60	35 - 60	55 - 130	55 - 130	65 - 150	65 - 150
bf		75	75	75	75	90	90
A		33 - 65	33 - 65	33 - 55	33 - 55	33 - 60	33 - 60
B		30	30	50	50	60	60
X1		30	60	30	60	30	60
X2		45	60	45	60	45	60
X3		75	105	75	105	75	105
X4		15	15	15	15	15	15
X5		60	60	60	60	75	75
X6		60	60	60	60	75	75
Anz. Zylinderschraube M16		5 x	5 x	5 x	5 x	5 x	5 x
Anz. Zylinderstift 12m4		2 x	2 x	2 x	2 x	2 x	2 x

Teil - Nr.	Stück	Benennung	Normblatt - Nr.	Werkstoff	Bestell - Nr.	DIN	Bemerkung
Letzte Änderung :					Frühere Ausgabe :		

Schutzvermerk nach DIN 34 beachten  
Copyright Daimler AG

Fachbetreuer: Müller, Stefan, Werk: 050; Abt.: BM/B4 Tel.: + 49 (0) 7031-90-76926  
Stoll, Walter, Werk: 050; Abt.: BM/B4 Tel.: + 49 (0) 7031-90-76073

Abbildung B.1: Norm-Entwurf der Standard-Modulsegmente

möglichst viel der Beschnittkontur sinnvoll mit den Segmenten umsetzen zu können. Die Norm sieht dazu sechs verschiedene Varianten aus drei Querschnitten in jeweils zwei Längen vor. Das Bohrbild ist den Abmessungen der jeweiligen Segmentvariante angepasst.

Durch die Vorfertigung der Rohsegmente ist ein Kapazitätsausgleich möglich. Auch ist die Termintreue der Anfertigung nicht mehr abhängig von einer bauteilspezifischen Gussanlieferung. Die Rohsegmente können bei der im ersten Schritt vorgesehenen Stückzahl entweder aus vorgegossenen L-Profilen oder aus Halbzeugquadrern hergestellt werden. Bei einem Einsatz von Halbzeugmaterial besteht weiterhin das Potenzial, höhere Schnittwerte in der Fertigung realisieren zu können. Auch im Bereich der Konstruktion ergibt sich durch die Standardisierung der Messer Verbesserungspotential. So sind Lösungen zur Automatisierung stabiler und änderungsgerechter zu gestalten. Die Ausarbeitung eines Konstruktionsmoduls zur schnellen Erstellung von Standard-Modulesegmenten in CATIA V5 wird im Anhang C vorgestellt. Durch den damit möglichen standardisierten Aufbau sind definierte Schnittstellen zu gewährleisten, wie sie für eine änderungsgerechte Automatisierung der NC-Programmierung eingefordert werden.

Die Standard-Modulesegmente sind als Ergänzung zur bisherigen Konstruktionsweise gedacht. Nur in sehr seltenen Fällen wird der komplette Beschnittumfang mit den sechs Varianten umzusetzen sein. Im Vergleich zur bisherigen Konstruktionsweise werden die Messer in Segmentbauweise nach dem Norm-Entwurf wieder kleiner. Dies wird vom Presswerk zwar als Vorteil unter dem Aspekt der Wartung und Reparatur gesehen, kann aber zu einer treppenförmigen Anordnung mit vielen Aufbauflächen führen. Solch eine Konstruktion wird von der Werkzeugmontage und dem Grossfräsen aufgrund des Aufwandes abgelehnt. Eine weitere Einschränkung im Norm-Entwurf der Standard-Modulesegmente ist die Beschränkung auf Messer ohne Abfalltrennung.

Unter dem Gesichtspunkt der NC-Programmierung beinhaltet das Konzept der Standard-Modulesegmente den großen Vorteil einer Ähnlichkeit zwischen den Bauteilen. So kann eine Fertigungsstrategie direkt übertragen werden, ohne diese einer geänderten Bauteilstruktur anpassen zu müssen.



# Anhang C

## Konstruktion/Anfertigung von Standard-Modulesegmenten

Auf die Einsatzmöglichkeit von Standard-Modulesegmenten in den Beschneidewerkzeugen hat sowohl die Bauteilgeometrie aus der Fahrzeugkonstruktion als auch die Feinmethode einen großen Einfluss. Der geometrische Verlauf des Bauteil-Umrisses im Raum bestimmt abhängig von den Abmessungen der Varianten, wie viele Messer maximal in Segmentbauweise erstellt werden können. Die Definition der Segmentaufteilung selber ist das Ergebnis eines iterativen Prozesses und stellt einen Kompromiss zwischen sich zum Teil widersprechenden Zielsetzungen dar. Die Kombinationsmöglichkeit aus Segmentvariante, der Segmentbreite und der Platzierung unterliegt folgenden Regeln:

1. Die Segmente sollen möglichst viel Beschnittanteil abdecken.
2. Es sollen dafür möglichst wenig Segmente gebrauchen werden.
3. Es sollen möglichst wenige Aufbauflächen benötigt werden.
4. Die Segmentauswahl und Platzierung soll eine möglichst geringe Bearbeitung des Rohsegmentes erfordern.
5. Es sind Segmentvarianten mit möglichst kleinem Querschnitt zu wählen.
6. Schulterflächen sollen nach Möglichkeit übereinstimmen.
7. Vorzugsweise soll die Segmentausrichtung parallel zu den Hauptachsen liegen.

Der Einfluss der Feinmethode resultiert aus einer Aufteilung des für die Teileherstellung notwendigen Beschnittes auf zwei Schneideoperationen. Bei dem so genannten segmentierten Beschnitt reduziert sich die Einsatzmöglichkeit von Standard-Modulsegmenten auf die Operation 40 (OP40), da mit den L-förmigen Rohlingen kein Trennmesser-Anteil umgesetzt werden kann um ein Abfallstück U-förmig auszuklinken. Wenn aber aufgrund der Feinmethode die geometrisch günstigen Abschnitte des Umrisses bereits in der OP 30 beschnitten werden, kann das Konzept der Standard-Modulsegment keine Anwendung finden. So hat eine Untersuchung der Feinmethode von acht Beplankungsteilen des Fahrzeugtyps W212 im Rahmen dieser Arbeit eine sehr geringe Einsatzmöglichkeit der Segmente ergeben. Obwohl sich flächige Beplankungsteile formbedingt anbieten, hätte kaum eins der bestehenden Gussmesser durch Standard-Modulsegmente ersetzt werden können.

## C.1 Anforderungen an das Segment-Modul

Die eigentliche Auskonstruktion von Standard-Modulsegmenten sollte weitgehend automatisch erfolgen und eine im Zuge der Konkretisierung notwendige Anpassung der Segmentaufteilung ermöglichen. Nach Erstellung der Segmente müssen Details wie zum Beispiel die Position der Abdruckstiftgewinde oder die Ausformung der Freimachungsphase angepasst werden können. Darüberhinaus sollte eine Aktualisierung der Konstruktion auf einen neuen Stand der Wirkgeometrie mit möglichst wenig Aufwand verbunden sein. Die Konstruktion muss fertigungsgerecht sein und eine so große Auswahl an Geometrien für die NC-Programmierung in einer standardisierten Schnittstelle aufweisen, dass die Lösungsfindung in der NC-Programmierung nicht durch die vorhandene Geometrieauswahl eingeschränkt ist. Damit entfällt die sonst notwendige Datenaufbereitung und über eine eindeutige Benennung wird eine weitgehend automatische Verknüpfung in der NC-Programmierung ermöglicht. Die Umsetzung ist in CATIA V5 zu realisieren und muss performant und stabil funktionieren. Als Teil dessen ist auf ein kleines Datenvolumen zu achten. Die Umsetzung des Segment-Moduls soll mit vertretbarem Aufwand die konstruktive Grundlage für die Untersuchungen in der NC-Verfahrenskette schaffen.

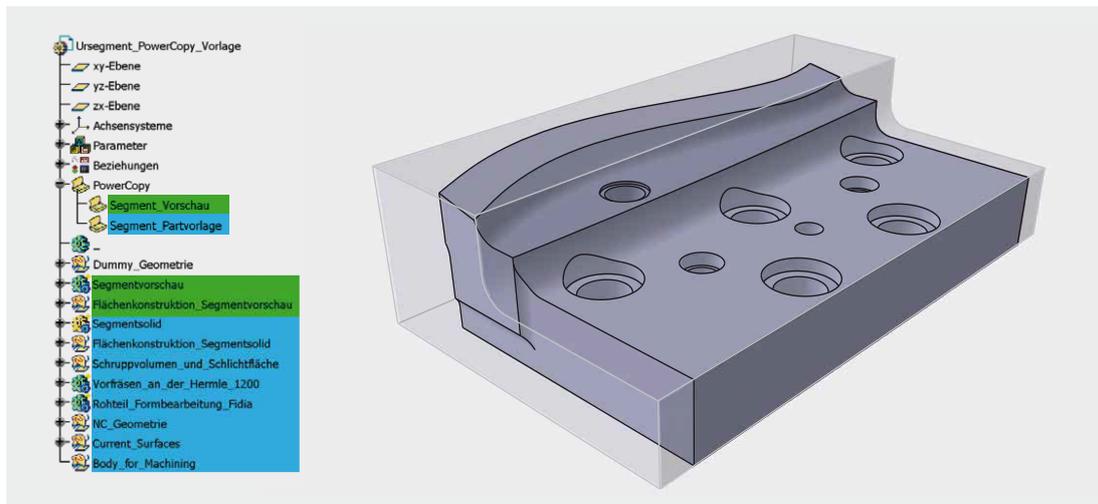


Abbildung C.1: Das Ursegment als Ergebnis der Ausarbeitung

## C.2 Ausarbeitung des Segment-Moduls

Für die Ausarbeitung eines Moduls zur Segmentkonstruktion steht CATIA V5 in der Release 16 zur Verfügung. Der benötigte Funktionsumfang wird vom Part Design, Produkt Design, Generativ Shape Design und dem Knowledge Advisor abgedeckt. Entscheidend sind, neben der parametrischen Assoziativität selbst, und der Möglichkeit Geometrielemente in Parametern abzulegen, die Grundelemente der Knowledgeware. Besonders hervorzuheben sind dabei die PowerCopy, Konstruktionstabellen, Formeln und Regeln. Eine geschickte Kombination dieser Funktionalitäten führt zu dem gewünschten Automatisierungsgrad bei der Konstruktion der Standard-Modulsegmente.

Die Ausarbeitung des zugrunde liegenden Konzeptes war geprägt von einer iterativen Entwicklung im Wechselspiel zwischen gewählter Konstruktionsmethode und den funktionalen Möglichkeiten in CATIA V5. Das Ergebnis dieser Lösungsfindung ist in der Abbildung C.1 dargestellt. In diesem Ursegment sind alle konstruktiven Merkmale auf Basis einer Dummy-Geometrie dergestalt umgesetzt, dass sie in einem anderen Kontext übertragen zu dem gewünschten Ergebnis führen. Diese Überführung geschieht zweistufig durch PowerCopys für die Vorschauerstellung und der Auskonstruktion. Die zugehörigen Inhalte sind in dem Strukturbaum grün bzw. blau hinterlegt.

Zur Vorbereitung wird von dem Konstrukteur zuerst ein Vorschau-part in die Werkzeugkonstruktion integriert. Dazu wird ein Part erzeugt, dieses mit dem Ach-

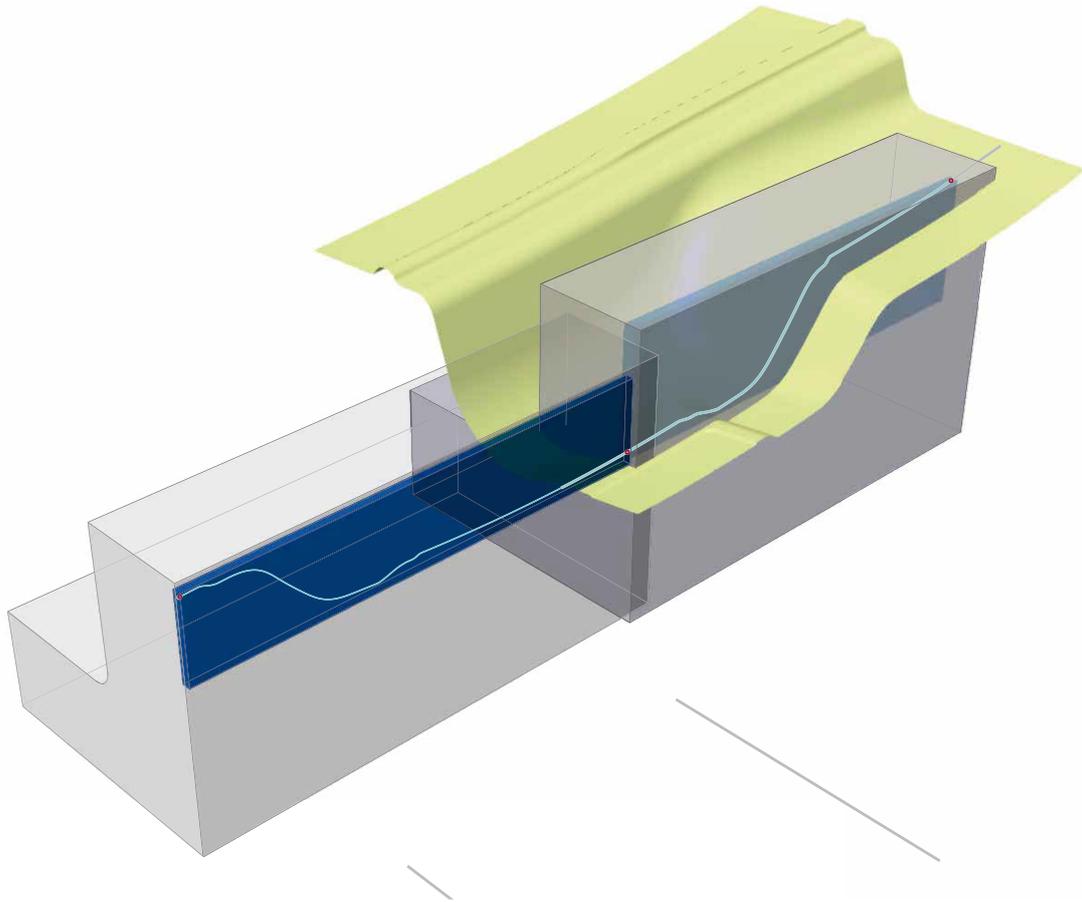


Abbildung C.2: Darstellung zur Vorschauerstellung

sensystem des zugehörigen Großgusses kongruent ausgerichtet und die Wirkfläche sowie der Umriss, bzw. die Beschnittaufteilung aus den Methodendaten kopiert. Dabei wird auf eine Übergabestruktur mittels Adapterpart im Rahmen der prototypischen Umsetzung verzichtet. Die weiteren Schritte der Vorschauerstellung werden mithilfe der Abbildung C.2 verdeutlicht. Hellblau dargestellt ist ein Abschnitt des Bauteilumrisses, für den nach der Beschnittaufteilung in der Feinmethode Messer zu konstruieren sind. Zwischen den rot dargestellten Endpunkten erstellt der Konstrukteur durch Setzen weitere Punkte auf der Beschnittkurve eine erste Version der Segmentaufteilung. Hilfreich ist dabei eine Referenzierung auf den jeweils nächstgelegenen Punkt unter Eingabe eines Abstandes knapp unterhalb der Rohsegmentlängen.

Zwischen zwei benachbarten Punkten kann dann mit Hilfe der ersten PowerCopy eine Segmentvorschau erstellt werden. Neben den zwei Punkten ist die Beschnitt-

kurve, die Wirkfläche und die Grundebene des Vorschauparts zu selektieren. Dabei ist auf eine übereinstimmende Ausrichtung der richtungsabhängigen Elemente mit der zu ersetzenden Dummy-Geometrie zu achten. In dem neu definierten Kontext generiert CATIA V5 alle Elemente nach Vorlage aus dem Ursegment. Um die dort hinterlegte Logik zu verdeutlichen, ist in der Abbildung bei dem linken Segment ein Zwischenschritt dargestellt. Zuerst wird der blaue Quader generiert. Er beschreibt den für die Abbildung des Beschnittes benötigten Raum zwischen den zwei Punkten. Die Ausrichtung ist parallel zu der Verbindungslinie zwischen den Eingabepunkten und der Grundebene. Damit wird die Quaderlänge durch den Abstand der zwei Punkte bestimmt. Die Quaderbreite ergibt sich direkt aus der seitlichen Ausdehnung der Beschnittkurve. Zur Bestimmung der Quaderhöhe muss zusätzlich die Wirkfläche betrachtet werden. Da eine Kontaktfläche zwischen dem Messer und dem zu beschneidenden Bauteil mit einer Breite von 15 mm zu schaffen ist, entscheiden die Extremas der Fläche über die für die Umsetzung benötigte Höhe.

Die in der Norm auf Seite 100 beschriebenen Segmentvarianten sind in ihren Abmessungen in einer Konstruktionstabelle hinterlegt. Ein Abschnitt der Konstruktionstabelle beinhaltet dabei den in allen drei Ausrichtungen maximal abzubildenden Geometrieraum. Nach diesen Kriterien wird durch eine Regel die kleinstmögliche Variante bestimmt, deren Geometrieraum größer als der ermittelte Quader ist. Dabei werden zwei zusätzliche Bedingungen beachtet. Zum einen wird zu der Quaderhöhe und -breite 6 mm addiert, da sich der Beschnitt bis zur „\_“-Freigabe um maximal 3 mm verändern darf. Diese Änderungen müssen mit der gewählten Segmentkonstruktion umzusetzen sein, da erst bei größeren Änderungen zusätzlich anfallende Kosten getragen werden. Zum anderen ist gefordert, dass die Höhe der Aufbauflächen der Messer über der Grundebene des Großgusses ein Vielfaches von 5 mm beträgt. Dementsprechend ist die Position des Segmentes auf das nächsthöhere Maß zu verschieben, was den zur Verfügung stehenden Geometrieraum zusätzlich um die Höhendifferenz verkleinert. Mithilfe der Geometriedaten aus der Konstruktionstabelle wird das Rohsegment der ermittelten Variante symmetrisch zu dem Quader dargestellt. Besteht eine Lösung zur Abbildung des Quaders, ist das Rohsegment transparent. Wenn der Quader zu groß ist, wird das größte zur Verfügung stehende Rohsegment dargestellt und rot eingefärbt. Auch wird eine Kollision zwischen dem Bauteil und dem Messerfuß der gewählten Segmentvariante durch eine Rotfärbung angezeigt.

Nach Erstellung aller Vorschausegmente auf Basis einer ersten Segmentaufteilung, kann eine weitere Optimierung erfolgen. Hierzu gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder wird die Segmentaufteilung verändert oder die Position und Ausrichtung der Segmente selbst beeinflusst. Die Parametrik ermöglicht es, die Punkte zu verschieben, und nach einer Aktualisierung der Konstruktion die Auswirkungen auf die Segmentauswahl zu beobachten. Je nach Bedarf können Punkte entfernt oder hinzugefügt werden. Danach müssen allerdings die Elemente der nicht mehr benötigten Segmente manuell im Strukturbaum gelöscht werden. Zusätzliche Segmente können, wie bei der Neuerstellung beschrieben, auch nachträglich hinzugefügt werden. Um die Position oder Ausrichtung zu beeinflussen, können entweder Parameter geändert oder Referenzelemente angegeben werden. Die Grundpositionierung des Geometrie-raums und damit des Segmentes zur Beschnittkurve erfolgt im Sinne eines geringen Zerspannvolumens möglichst tief und mit maximaler Segmentbreite. Im Rahmen des nicht ausgeschöpften Geometrieräumes kann allerdings das Segment durch Parameter nach oben oder näher an die Beschnittkurve geschoben werden. Überschreitet der dafür benötigte Geometrieräum die Grenzen der bisherigen Segmentvariante, wird die nächstgrößere Variante gewählt. Auch hier wird der Konstrukteur bei einer nicht abbildbaren Verschiebung durch eine Rotfärbung gewarnt.

Um die Ausrichtung zu ändern, kann eine Verdrehung des Segmentes durch eine Winkeleingabe erfolgen, oder es wird ein Referenzelement selektiert, zu dem das Segment parallel liegen soll. Mit dem Segment dreht sich auch die Längsausrichtung des Quaders mit den oben beschriebenen Auswirkungen auf die Variantenauswahl. Die Zielsetzung dieser Modifikation folgt den auf der Seite 103 dargestellten Regeln. Durch Try and Error kann der Konstrukteur sich einer für diese Beschnittkurve optimalen Lösung annähern. Im Anschluss werden die einzelnen Segmente im Vorschau-part miteinander verknüpft, um winkelhalbierende Stöße zu erzeugen.

Alle für die weitere Auskonstruktion der Segmente benötigten Geometrien werden in einer Schnittstelle abgelegt. Wie in der Abbildung C.2 bei dem rechten Segment zu erkennen, handelt es sich dabei neben den Stößen auch um den relevanten Ausschnitt der Wirkfläche und um den verlängerten Abschnitt der Beschnittkurve. Weiterhin gibt es einen Parameter mit der Variantenummer und ein Achsensystem für die Positionierung und Ausrichtung des im nächsten Schritt zu erzeugenden Segmentparts.

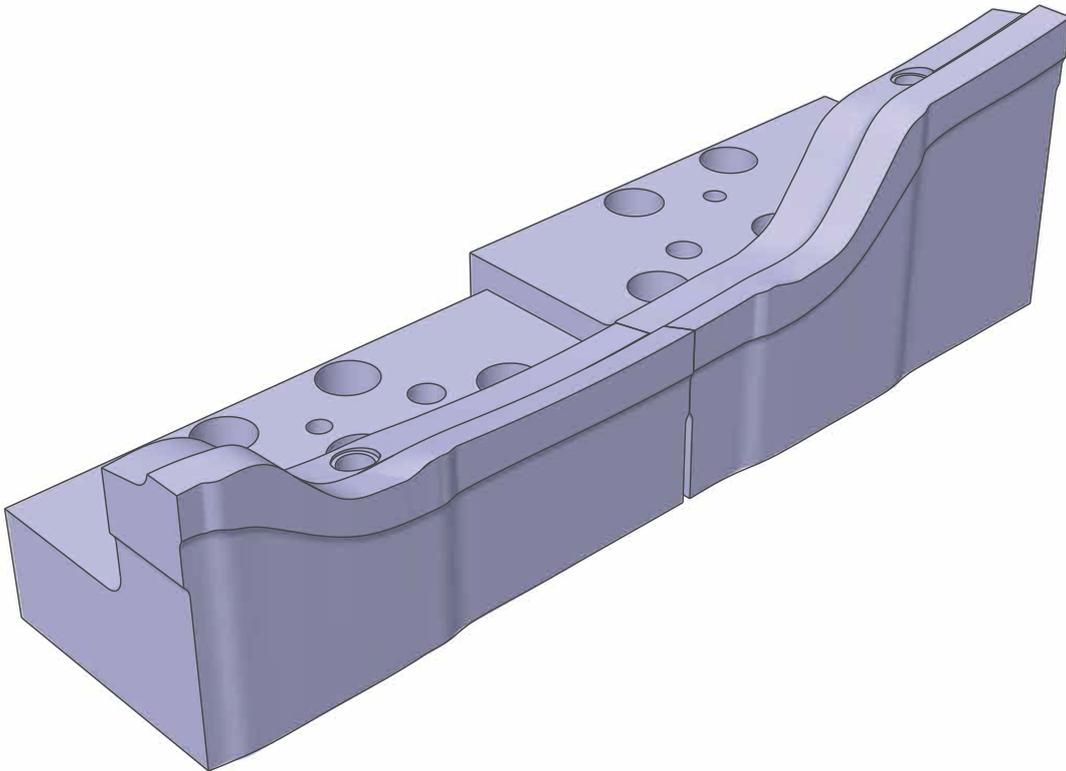


Abbildung C.3: Ergebnis der zweiten PowerCopy

Bisher ist die Vorschau aller Segmente in einem Part erzeugt worden. Für die Anfertigung werden jedoch separate Parts benötigt. Diese werden erzeugt und mit dem vorab beschriebenen Achsensystem der jeweils zugeordneten Segmentvorschau kongruent gesetzt. In diesen Parts wird die zweite PowerCopy aufgerufen und die vorab genannten Elemente selektiert. Musste bei der ersten PowerCopy noch auf die Ausrichtung der Eingabe geachtet werden, können diese Geometrielemente direkt verwendet werden. Das Ergebnis der zweiten PowerCopy ist in der Abbildung C.3 zu sehen. Durch Variation von Parametern kann die Anzahl und die Position der Abdruckstiftgewinde sowie die Ausformung der oberen Freimachungsphase beeinflusst werden. Durch die Konstruktionsweise der Freimachungsphase ist sichergestellt, dass es keine Kollision mit der Bauteilgeometrie gibt. Es kann aber sinnvoll sein, mithilfe des Phasenwinkel, des Auslaufradius oder der Freimachtungstiefe den Segmentquerschnitt zu optimieren. Durch einen weiteren Parameter wird definiert, welches von zwei Stiftlöcher in dem Rohsegmenten als Unterscheidungsmerkmal freigeätzt wird. Damit können die Segmente bei spiegelsymmetrisch aufgebauten Werkzeugen nur auf einer Seite montiert und nicht vertauscht werden. Aus Sicht des Konstrukteurs

Schruppvolumen:  $1054 \text{ cm}^3$

Schlichtfläche:  $94 \text{ cm}^2$

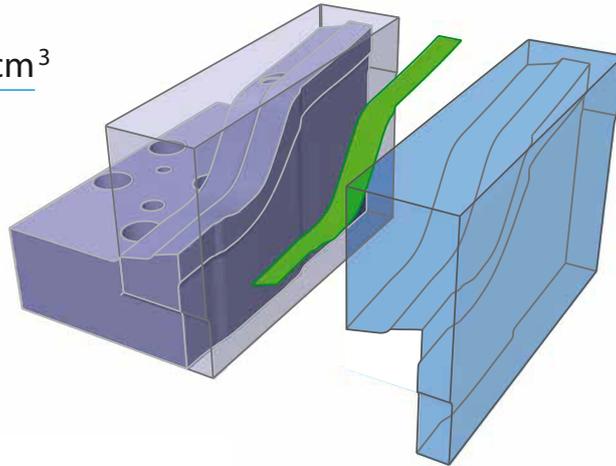


Abbildung C.4: Kenngrößen der Segmente

ist damit seine Arbeit an den Segmenten abgeschlossen. Etwaige Änderungen können zu einem späteren Zeitpunkt in die Segmentkonstruktion gepflegt werden. Wenn der Variantentyp gleich bleibt, werden auch Modifikationen aus der Vorschau übernommen.

Neben der eigentlichen Auskonstruktion der Segmente erzeugt die PowerCopy auch die notwendigen Geometrien und Parameter für den Folgeprozess. Um die Lösungsfindung in der NC-Programmierung nicht durch eine zu begrenzte Auswahl an Kurven und Flächen unnötig einzuschränken bzw. zu lenken, ist eine Vielzahl an Definitionsmöglichkeiten berücksichtigt. Diese Auswahl ist zusammen mit den NC-Programmierern am Standort der Promotion erarbeitet und in dem Ursegment umgesetzt worden. Des Weiteren haben die in der Abbildung C.4 dargestellten geometrischen Größen der Standard-Modulsegmente einen wesentlichen Einfluss auf den weiteren Anfertigungsprozess. In der zweiten PowerCopy werden das Schrappvolumen und die Schlichtfläche automatisch als Messgrößen erfasst und in Parameter abgelegt.

Zusätzlich werden für den Anfertigungsprozess zwei Solids erzeugt und in dem Strukturbaum abgelegt. Zum einen handelt es sich dabei um das Segment auf dem Stand, der durch die Vorfertigung erzielt werden soll. Auf dieser Datenbasis kann eine Programmierung in der Werkstatt erfolgen. Zum anderen brauchen CAM-Systeme ein Rohteil für die Berechnung der Schrappoperationen sowie für eine Abtragsimulation. Dieses Solid gleicht dem vorgenannten. Nur sind keine Bohrungen einge-

bracht, da diese bei Catia V5 beim Schrappen im Bereich der Abdruckstiftgewinde zu komplizierten Fräsbahnen führen würde. Eine wesentliche Anforderung bei der Erstellung der erläuterten Inhalte und Funktionalitäten ist eine stabile Konstruktionsmethodik. Wie diverse Versuche gezeigt haben, ist dieses Ziel mit der erarbeiteten Lösung für den Anspruch eines Prototypen sehr gut erfüllt. Eine detaillierte Erläuterung der dazu in der Umsetzung notwendigen Schritte würde hier zu weit führen. Mit dem Prototypen konnte auch der notwendige Zeitaufwand zur Konstruktion von Messern stark reduziert werden. Um die zwei Segmente aus diesem Beispiel wie beschrieben zu erstellen, werden weniger als 15 Minuten benötigt. Ein Großteil der im Segment-Modul noch notwendigen „Fleißaufgaben“ könnten in einer nächsten Entwicklungsstufe durch eine Makroprogrammierung automatisiert werden. Durch die beschriebenen Funktionalitäten des KBE wird der Konstrukteur allerdings nicht in seinem Gestaltungsspielraum der relevanten Konstruktionsmerkmale eingeschränkt. Im Rahmen des Konzeptes der Standard-Modulsegmente kann er alle wesentlichen Eigenschaften durch Parameter modifizieren.

### C.3 Ablauf der Vor- und Anfertigung

Der Fertigungsablauf ist parallel zu der Entwicklung des Segment-Moduls definiert worden. Im Dialog mit Mitarbeitern der Fertigung konnte ein hohes Maß an Fertigungsgerechtigkeit der Segmentkonstruktion realisiert werden. Die Inhalte der Konstruktion sind eng mit den Erfordernissen zur Optimierung der Fertigung abgestimmt. Eine wesentliche Zielsetzung ist dabei die Möglichkeit zum Kapazitätsausgleich durch die Minimierung der Fertigungsinhalte nach Freigabe der Konstruktion auf Basis des „\_“ - Datensatzes. Die erarbeitete Lösung bezieht sich auf die Ressourcen im Betriebsmittelbau Bremen und berücksichtigt auch ein übergreifendes Spannkonzep. Die einzelnen Schritte des Fertigungsablauf sind in der Abbildung C.5 dargestellt und gliedern sich in folgende Bereiche:

1. **Fertigung der Segmentprofile** Unter 1 sind die drei kurzen Varianten der Segmentprofile zu sehen. Diese können unabhängig von der Werkzeuganfertigung hergestellt und auf Lager gelegt werden. Ausgangsmaterial ist ein Halbzeugblock, der in zwei Aufspannungen gebohrt und gefräst wird. Da das Fräsen des Absatzes je nach Variante nur 25 - 60 Minuten in Anspruch nimmt, wird Halbzeugmaterial einer ebenfalls angedachten Lösung auf Basis eines vorgegos-



Abbildung C.5: Bilder zum vierstufigen Fertigungsablauf

senen Rohlings in L-Form vorgezogen. Damit umgeht man die bei Gussmaterial üblichen Probleme, wie die schwierige Zerspanung der Gusshaut oder Lunker.

2. **Zuschnitt der Segmentrohlinge** Nach dem Zeitpunkt, zu dem bisher die Gussrohlinge bestellt wurden, wird nur selten etwas an der Lage der Stöße geändert. Damit steht auch die Länge der Segmente mit einer ausreichend hohen Wahrscheinlichkeit fest, so dass diese aus den vorgefertigten Segmentprofilen zugesägt werden können. Da die Position der Sägeschnitte von der Mitte des Bohrbildes aus zu messen sind, ist ein Zuschnitt mit den vorhandenen Methoden sehr ungenau. Auch muss auf einer Seite des Segmentes die Breite des Sägeschnittes berücksichtigt werden. Um Fehler zu vermeiden, wird eine in das Bohrbild arretierende Skala mit aufgetragenem Fertigmass erstellt. Diese ermöglicht, wie unter 2 zu sehen, in Verbindung mit einer Laseranzeige einen schnellen und zuverlässigen Zuschnitt.
3. **Vorfertigung an der Hermle 1200** Auf Basis des Konstruktionsstandes nach der bisherigen Gussfreigabe können die Segmentrohlinge auch vorgefräst werden. Die Bearbeitung beinhaltet das Vorfräsen der Stöße mit Aufmaß, das Fräsen der Stossfreimachungen, das Freimachen der Stiftbohrungen und das Einbringen der Abdruckstiftlöcher. Wie unter 3. zu sehen, ermöglicht die fünfsichtige Hermle 1200 eine stirnseitige Bearbeitung aller relevanten Flächen und verringert damit die Fertigungszeiten. Darüber hinaus kann die Fertigung über einen weiten Zeitraum verteilt und damit Engpässe in der Fertigungskapazität vermieden werden. Allerdings kann bis zur „\_“-Freigabe eine Änderung der Beschnittaufteilung notwendig werden, was eine erneute Anfertigung erforderlich macht.
4. **Fertigbearbeitung an der Fidia** Wenn die Konstruktionsdaten auf Basis des „\_“-Datensatz vorliegen, können alle formabhängigen Wirkflächen bearbeitet werden. Dabei handelt es sich um die Formfläche, den Umriss sowie die jeweils zugehörige Freimachung. Um eine hohe Genauigkeit zu gewährleisten, werden in der gleichen Aufspannung auch die Stöße fertig gefräst. Da es sich bei der Fidia um eine Drei-Achsen-Fräsmaschine handelt, müssen alle Bearbeitungen aus Z-Richtung erfolgen. Es können bis zu acht Segmente parallel aufgespannt werden. Für das Validierungsprojekt wurde die unter 4. abgebildete Aufspannmöglichkeit für vier Segmente geschaffen.

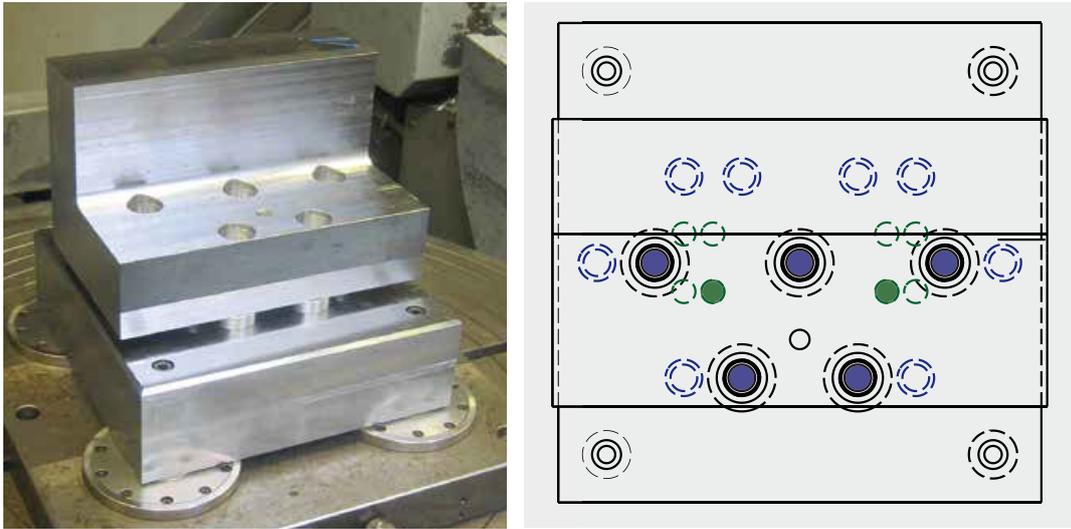


Abbildung C.6: Bohrbild zum Spannkonzzept

Ein nicht unerheblicher Anteil der Fertigungszeit entfällt auf die Rüstzeit. Da bei den Standard-Modulsegmenten nur eine begrenzte Anzahl an Bohrungspositionen definiert und diese sehr günstig angeordnet sind, bietet sich ein einheitliches Spannkonzzept an. Mit dem in der Abbildung C.6 dargestellten Bohrmuster sind alle sechs Varianten auf kleinsten Raum zu spannen. Dass sich dabei die Aufspannrichtung der zwei größten Varianten umkehrt, wird in der Ausrichtung des NC-Achsensystems in der Konstruktion berücksichtigt. Damit können alle Segmente auf einer Spannplatte über das vorhandene Bohrbild abgesteckt, verschraubt und die NC-Programme mit dem gleichen Nullpunkt abgefahren werden. Um mit Radienfräsern bis zur Unterkante der Segmente fräsen zu können, werden selbstzentrierende Distanzscheiben in die jeweils benötigten Gewinde eingesetzt.

# Anhang D

## Statistische Auswertungen

## D.1 Signifikanz berechneter Bearbeitungszeiten

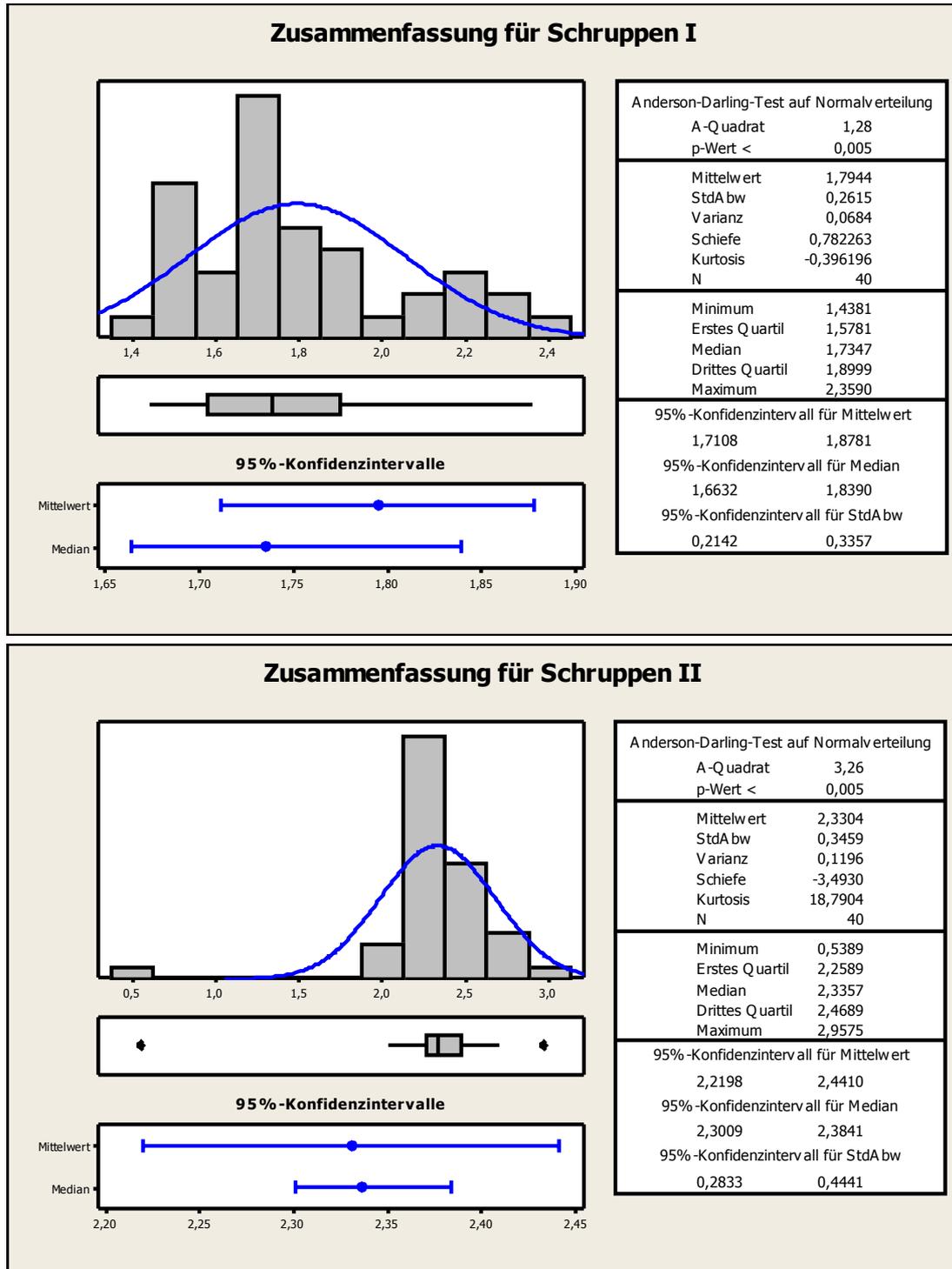


Abbildung D.1: Genauigkeit berechneter Bearbeitungszeiten beim Schruppen

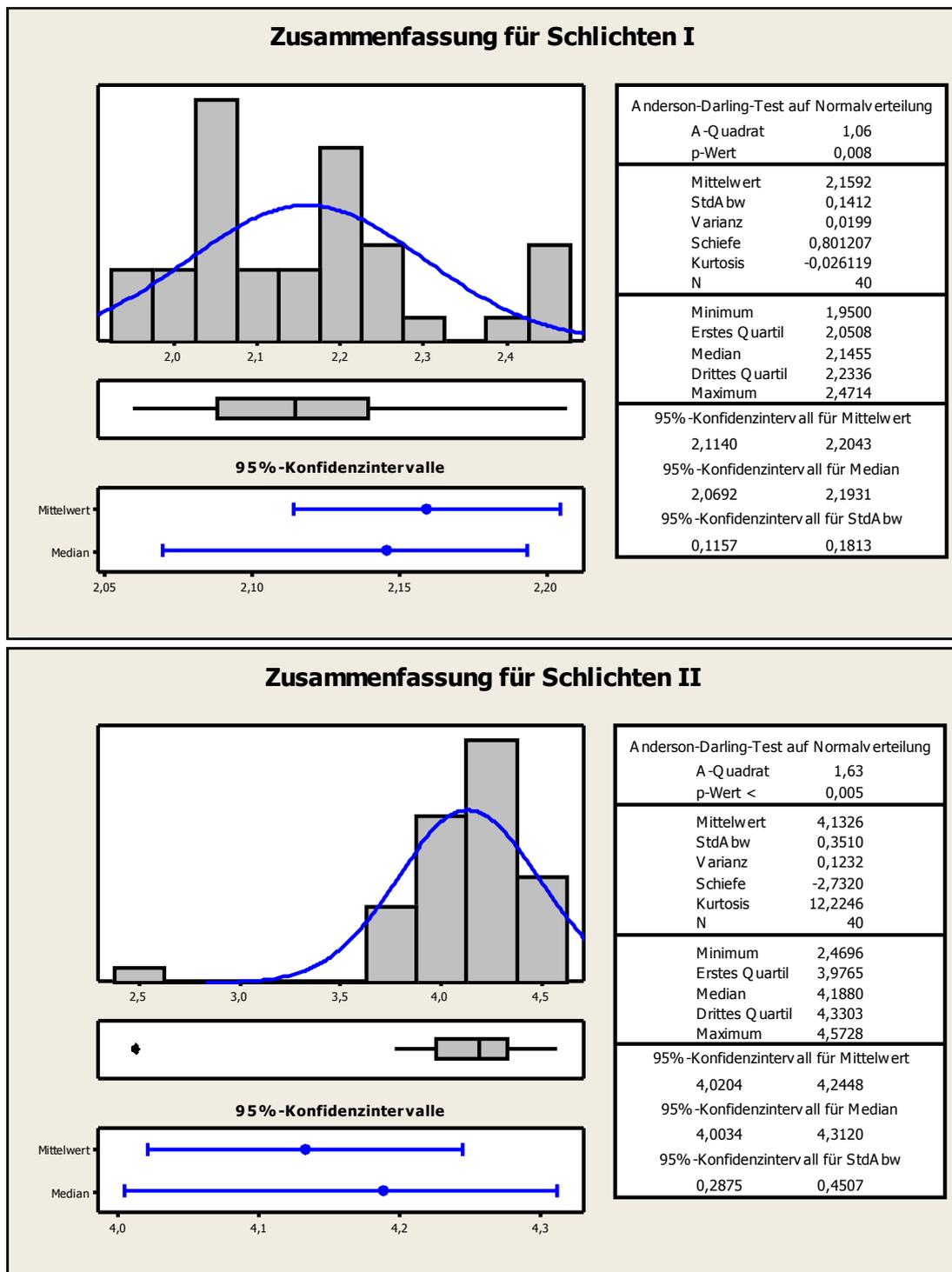


Abbildung D.2: Genauigkeit berechneter Bearbeitungszeiten beim Schichten

## D.2 Signifikanz der quantitativen Gütekriterien

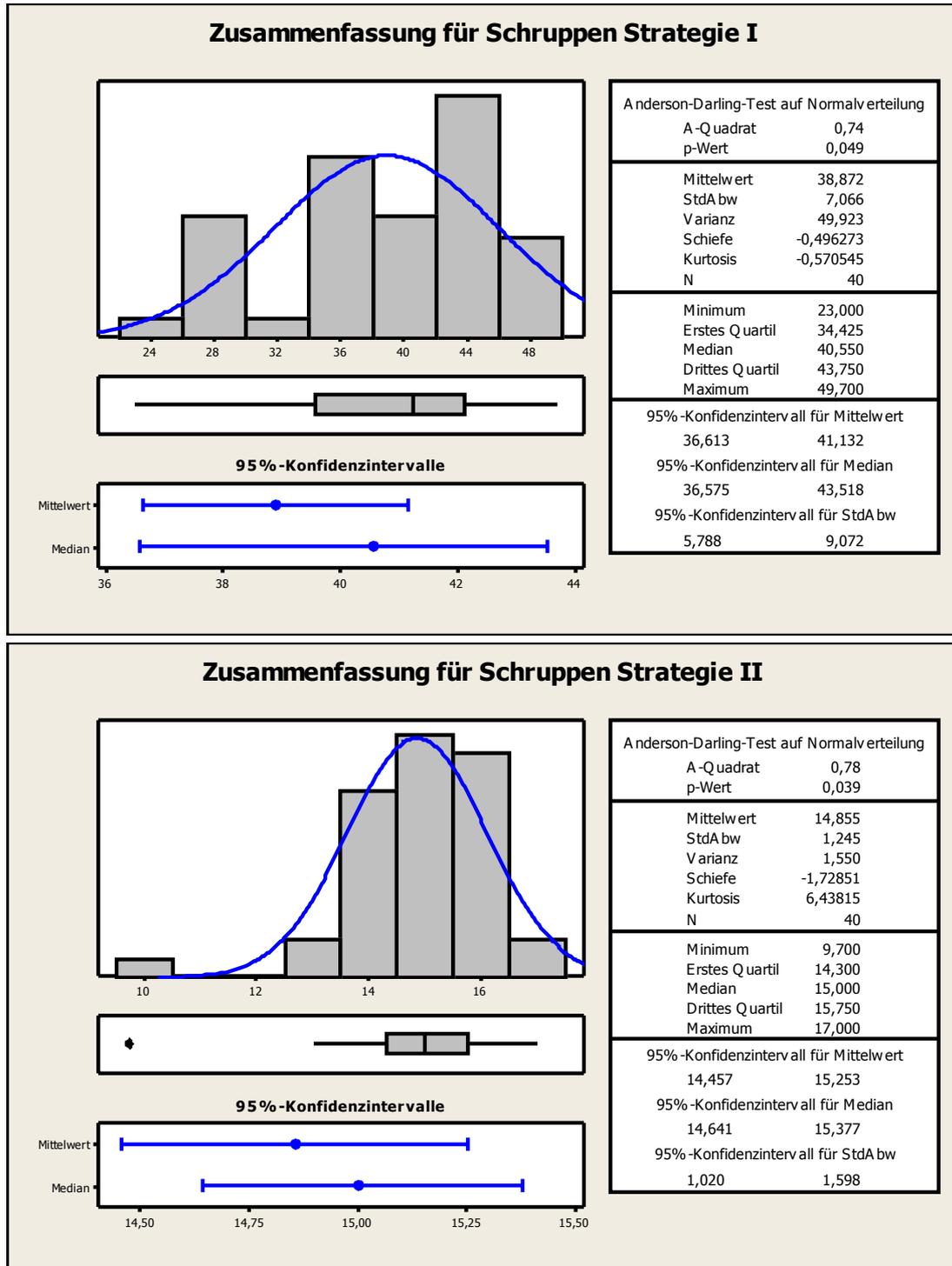


Abbildung D.3: Auswertung - Schruppen I und II aller Segmente

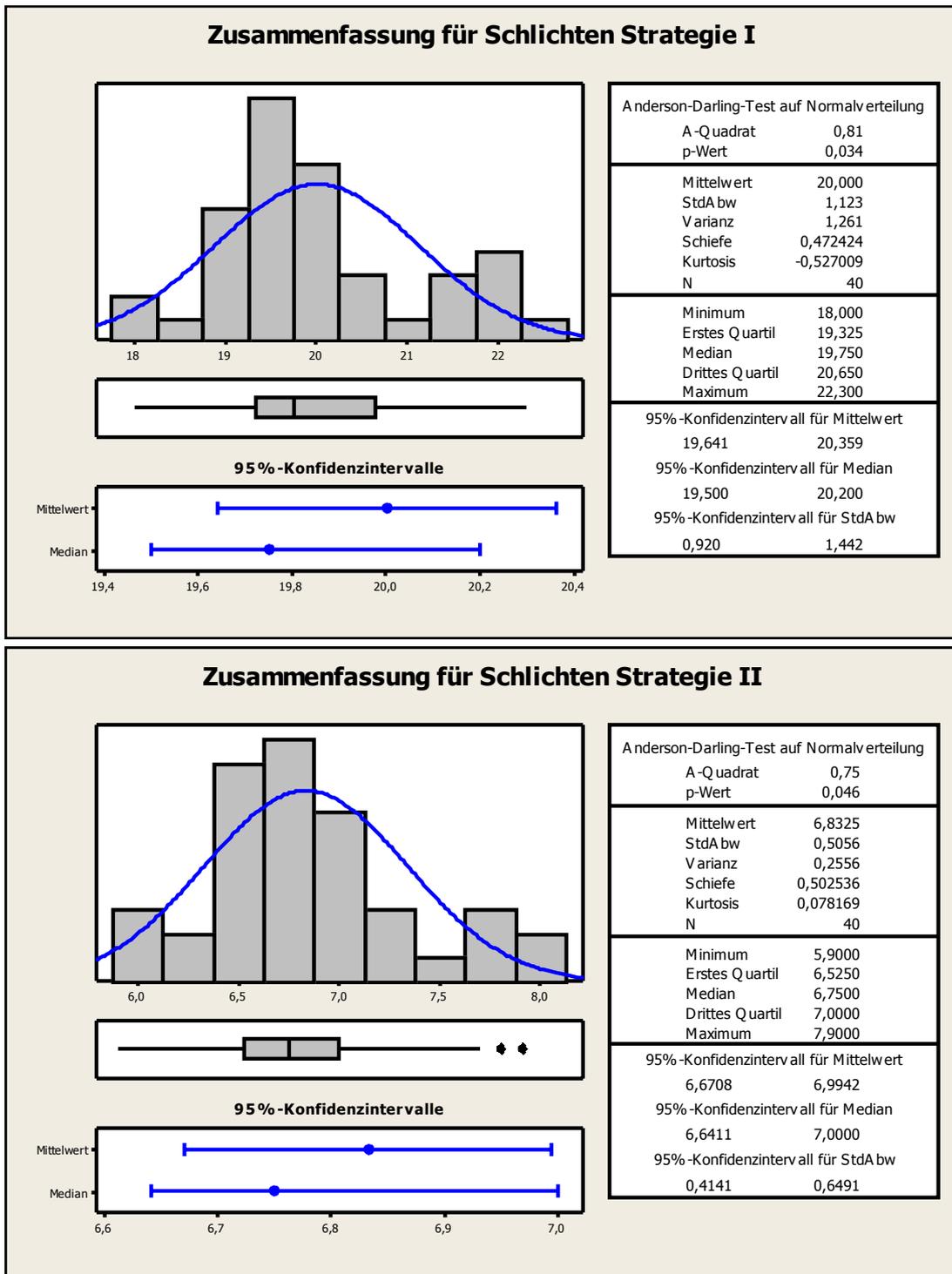


Abbildung D.4: Auswertung - Schichten I und II aller Segmente

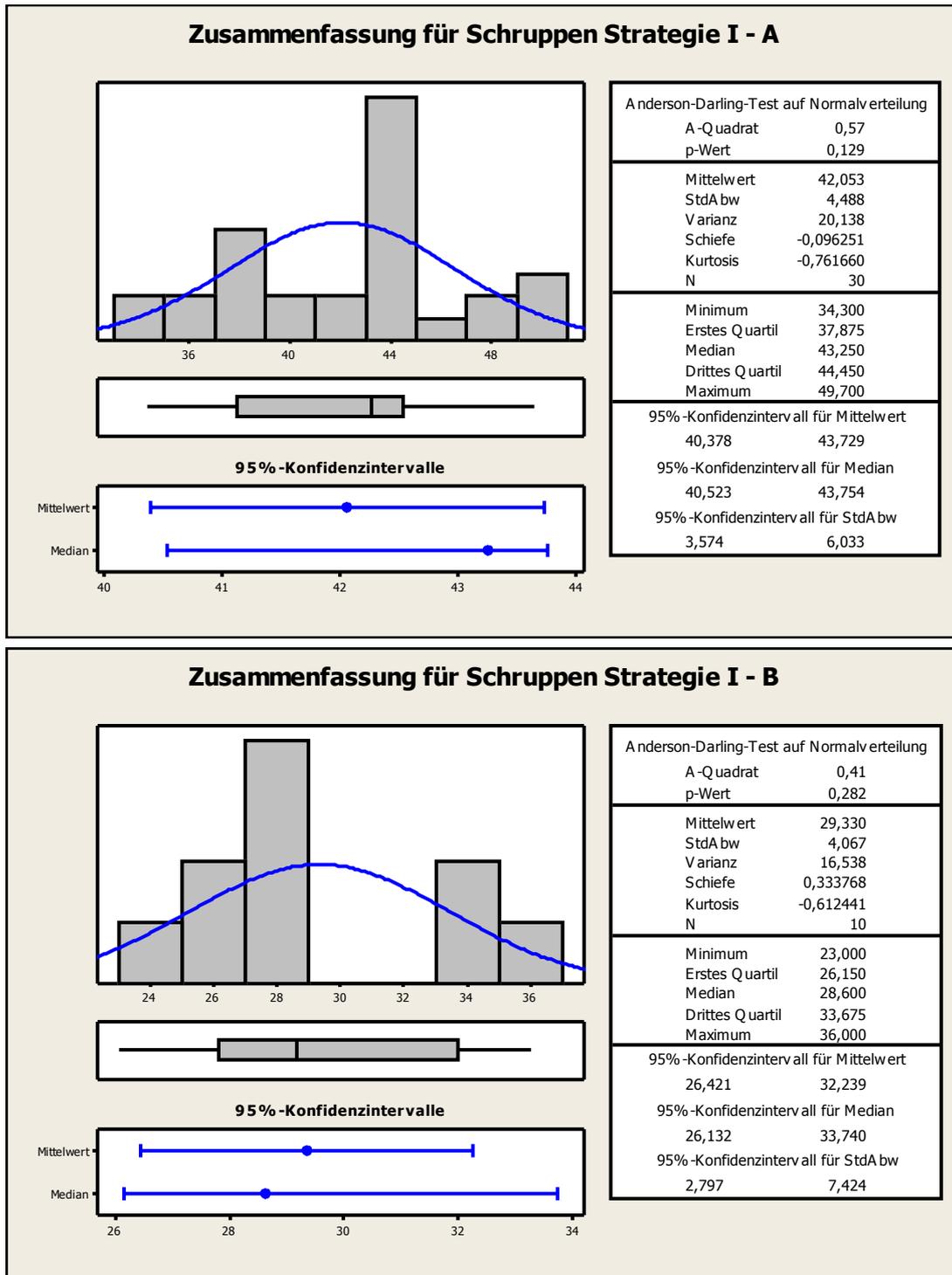


Abbildung D.5: Auswertung - Schruppen I nach Segmentform differenziert

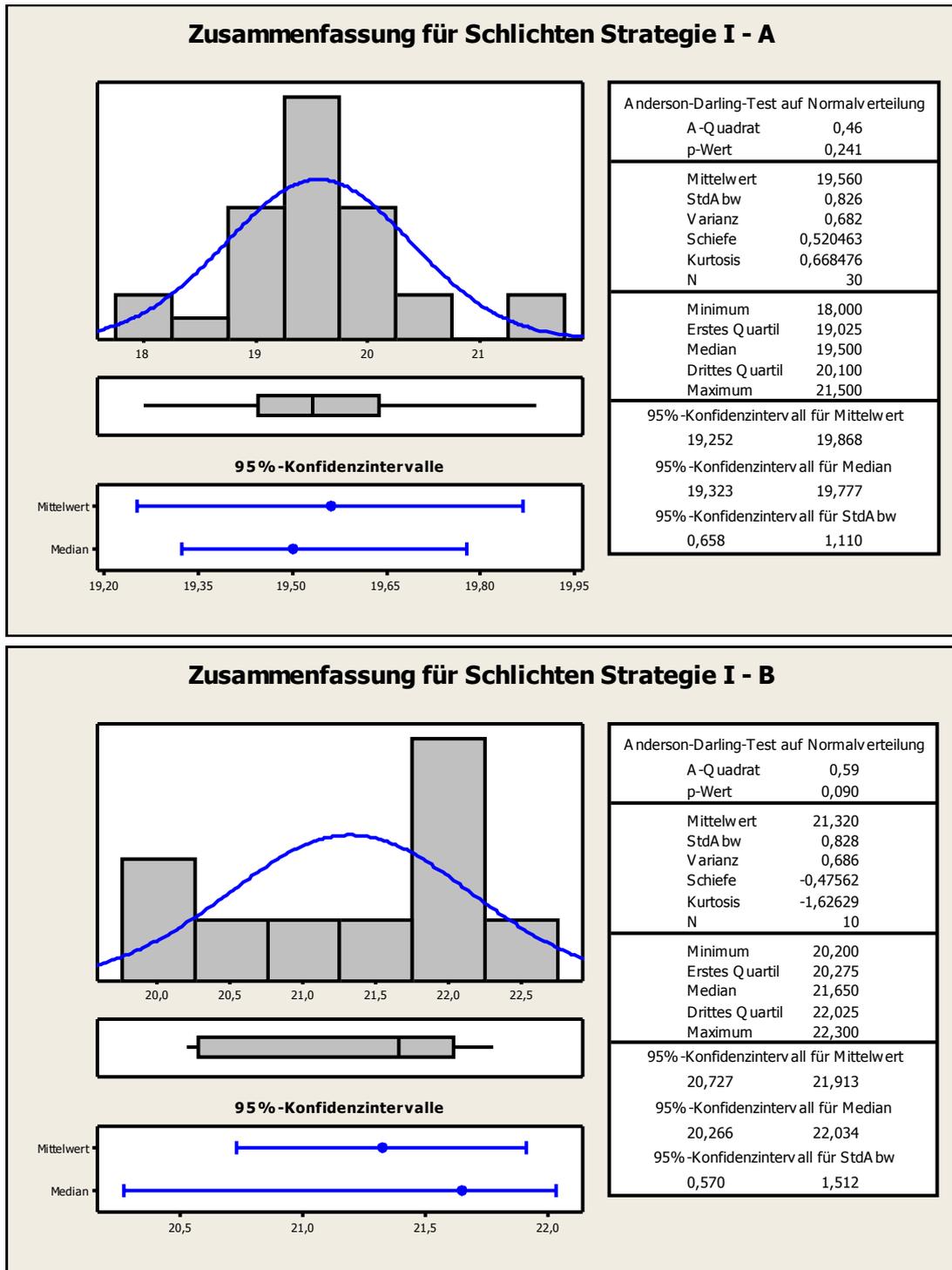


Abbildung D.6: Auswertung - Schichten I nach Segmentform differenziert

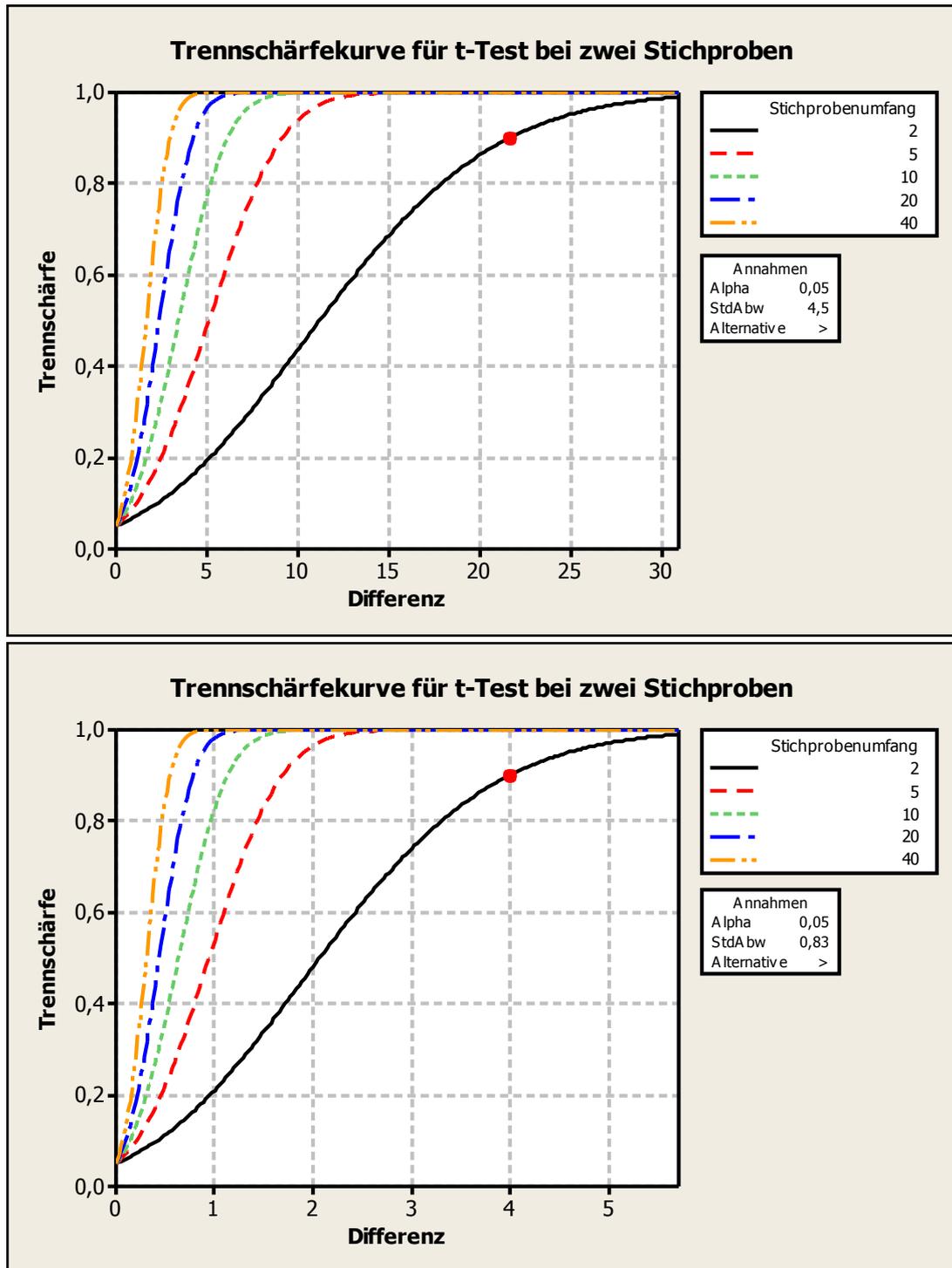


Abbildung D.7: Trennschärfe - Schrupp- und Schlichtbearbeitung I / Form A

### D.3 Messreihen zur Bestimmung von Ra

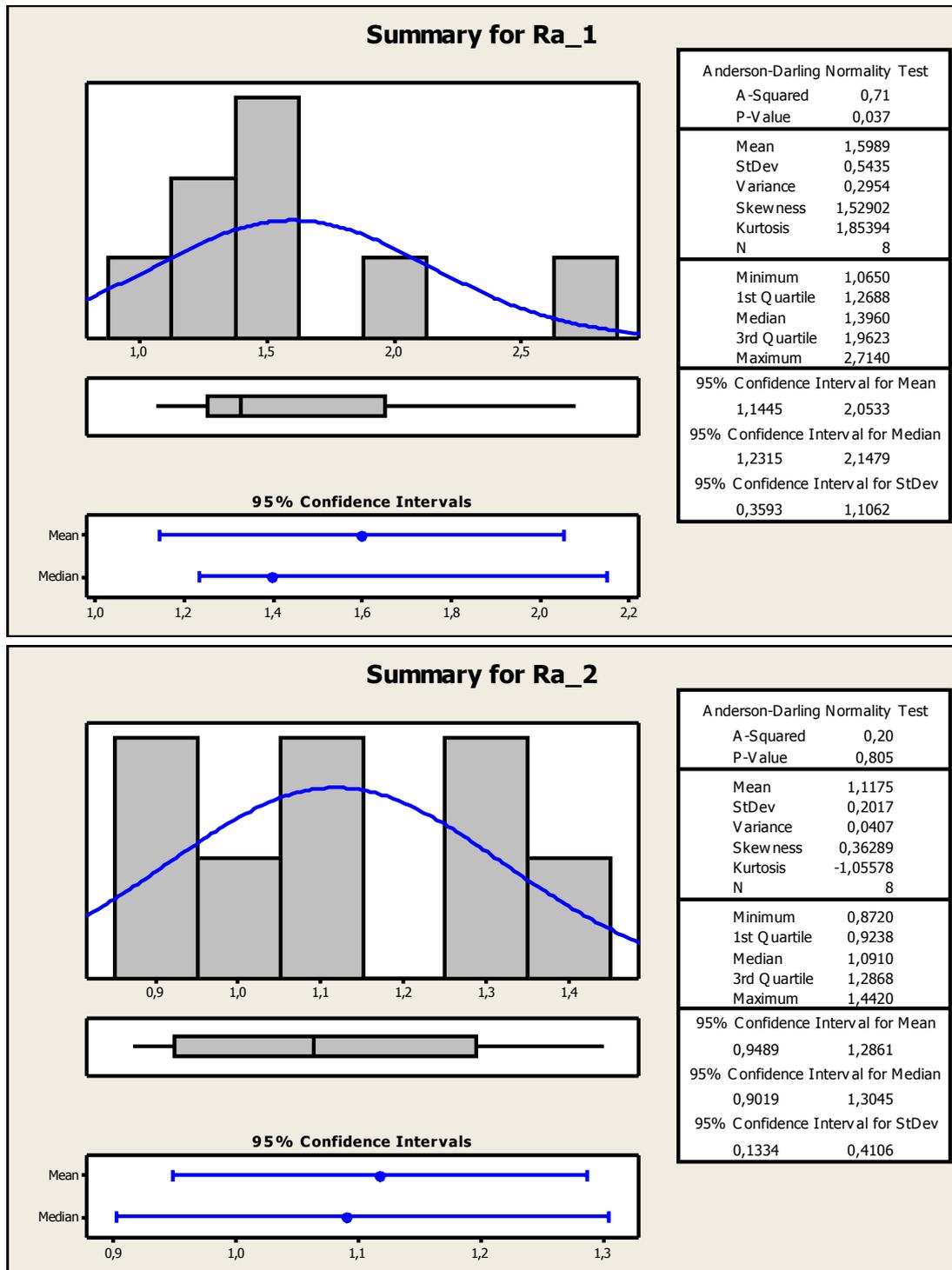


Abbildung D.8: Messreihe zur Bestimmung von Ra der Segmente 1 und 2

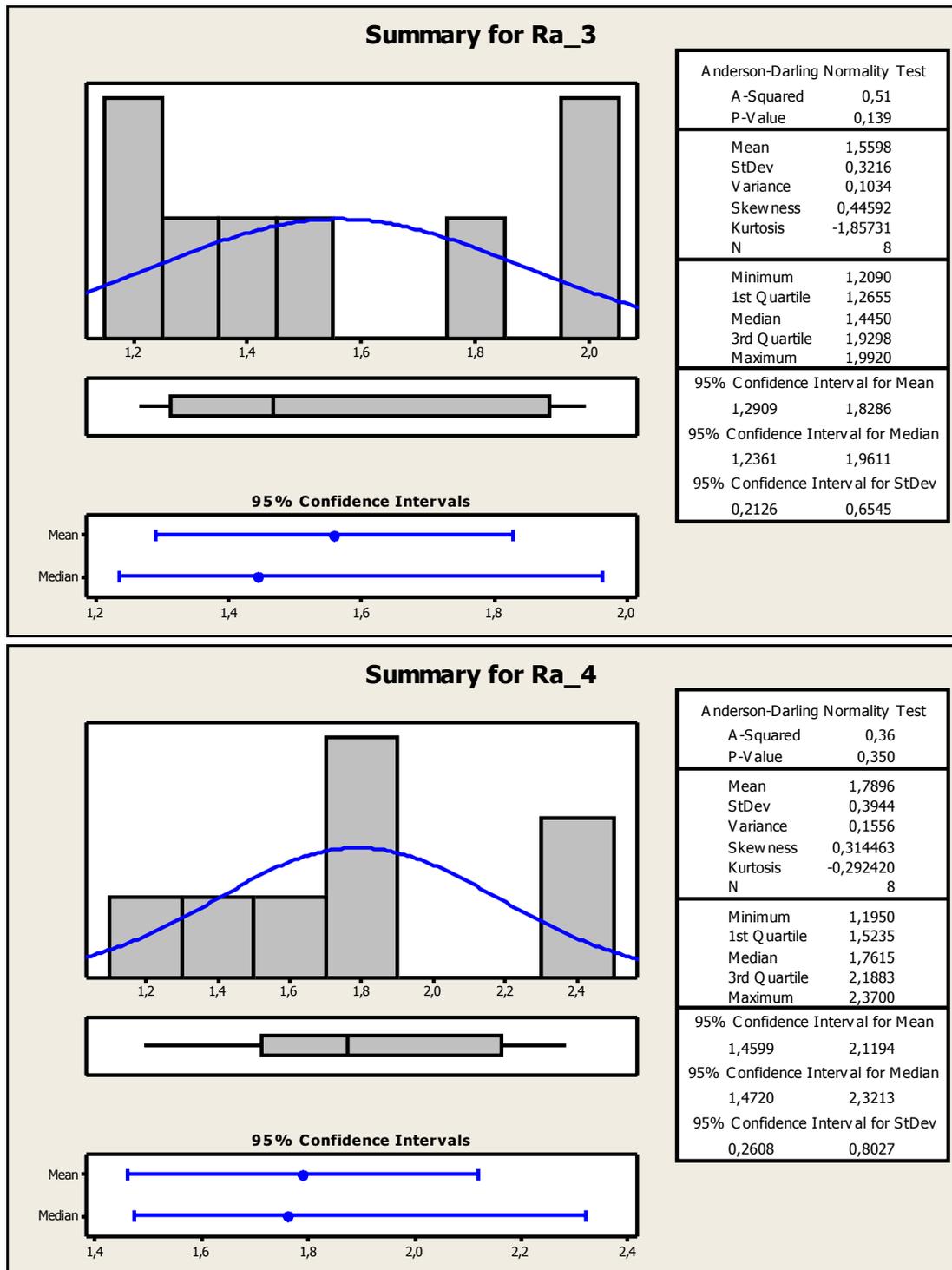


Abbildung D.9: Messerreihe zur Bestimmung von Ra der Segmente 3 und 4

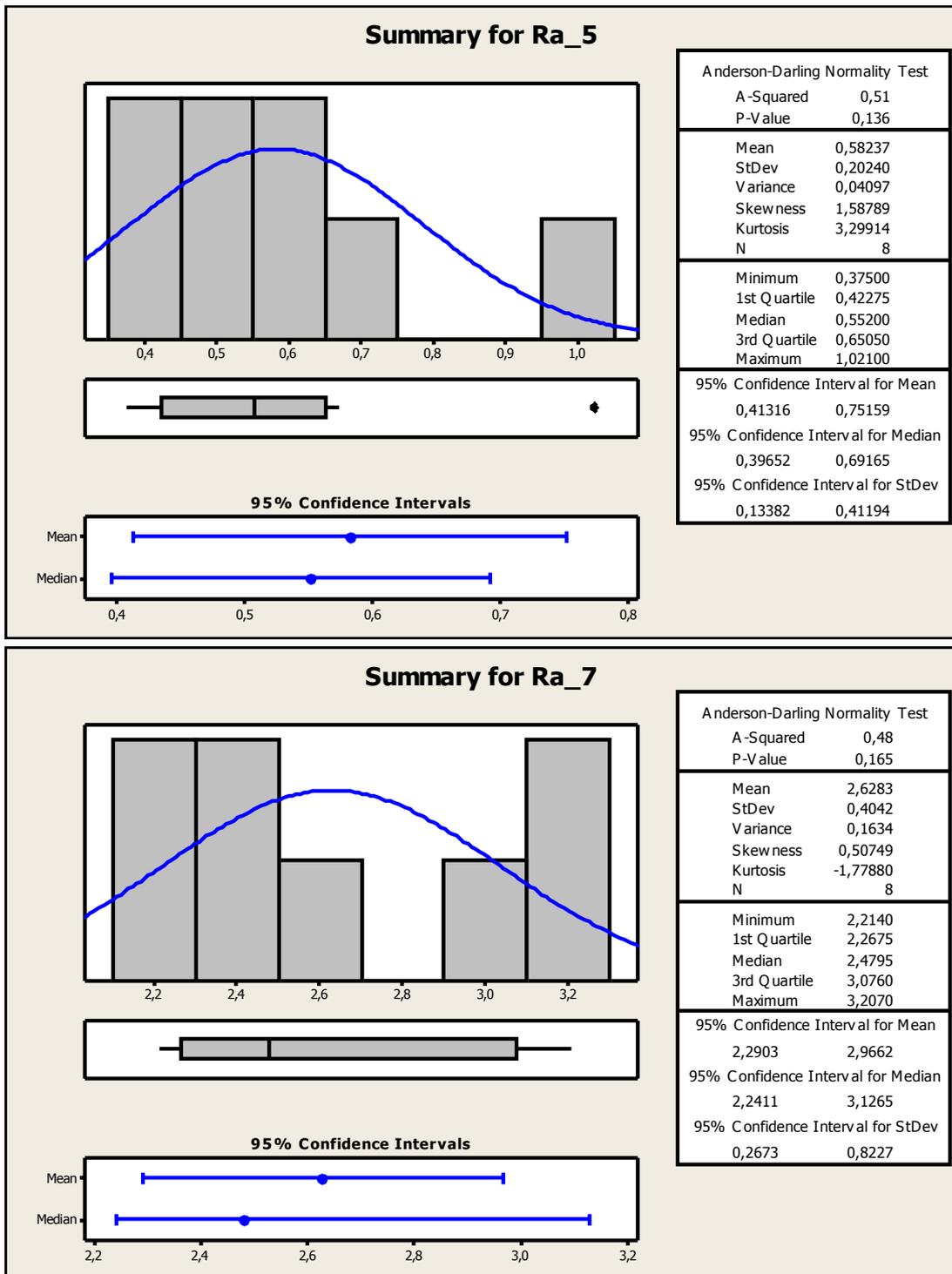


Abbildung D.10: Messerreihe zur Bestimmung von Ra der Segmente 5 und 7

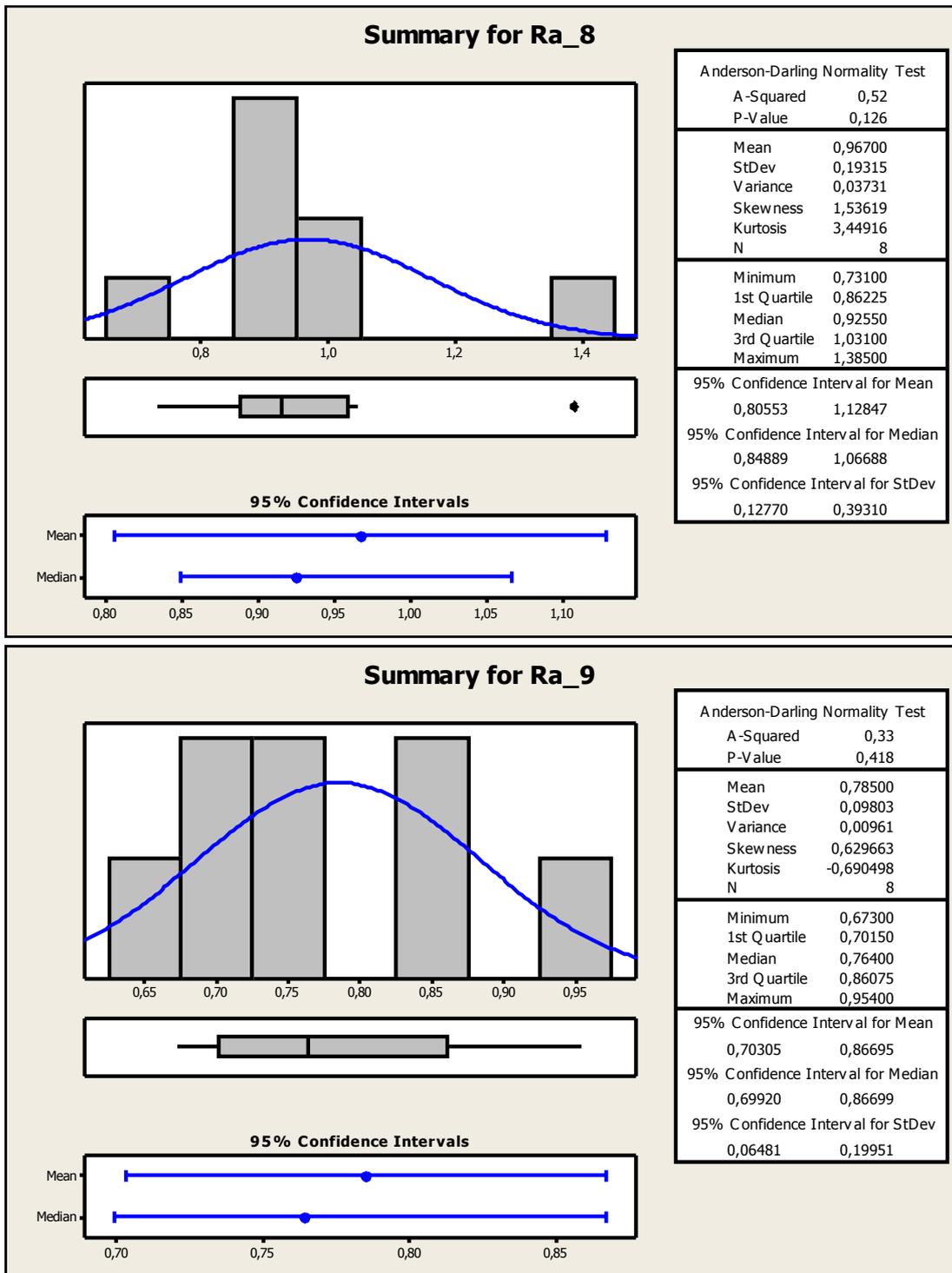


Abbildung D.11: Messerreihe zur Bestimmung von Ra der Segmente 8 und 9

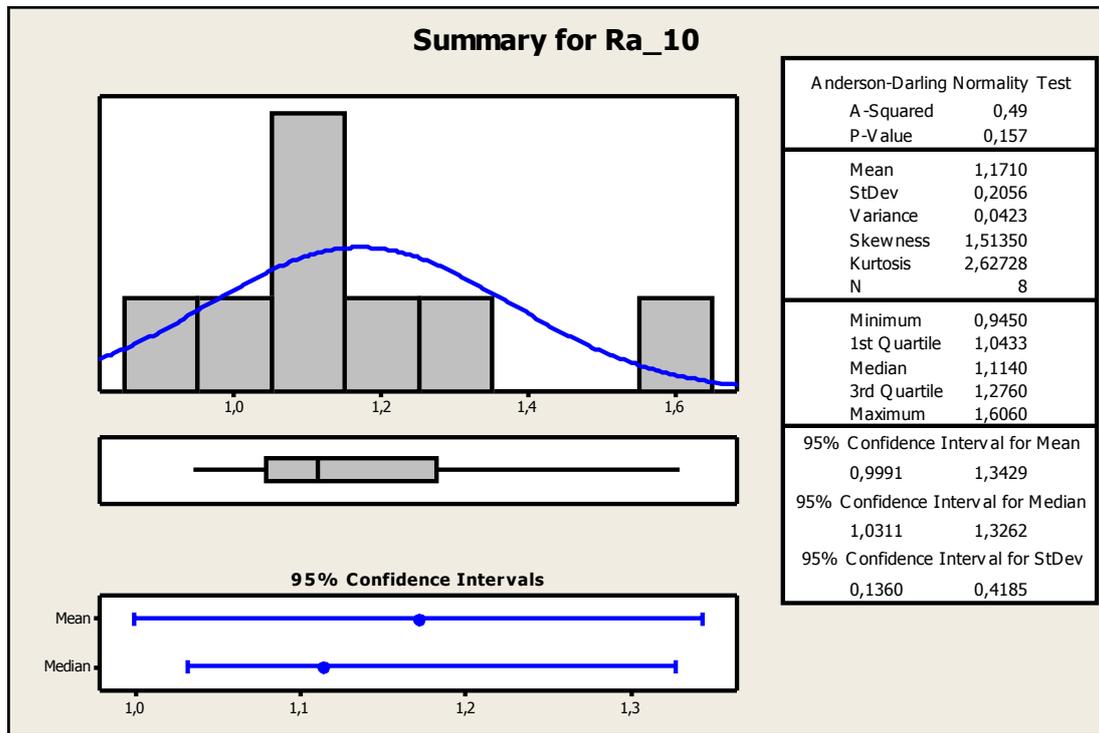


Abbildung D.12: Messerreihe zur Bestimmung von Ra des Segmentes 10



# Literaturverzeichnis

- [1] *Brockhaus - die Enzyklopädie: in 30 Bänden.* Leipzig, Mannheim : Brockhaus, 2006
- [2] *Duden - Deutsche Rechtschreibung.* Berlin : Dudenverlag, 2009
- [3] AL-LAHAM, A.: *Organisationales Wissensmanagement: Eine strategische Perspektive.* München : Vahlen, 2003
- [4] ALTMANN, C.: *Dynamische Prozeßgestaltung in flexiblen Fertigungssystemen durch integrierte Arbeitsvorbereitung,* Technische Universität Berlin, Diss., 1991
- [5] ANDERL, R.: *Grundlagen des CAE / CAD / Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion.* Darmstadt, 2010. – Forschungsbericht
- [6] ASHBY, W. R.: *An Introduction to Cybernetics.* London : Chapman and Hall, 1956
- [7] BEA, F. X. ; GÖBEL, E.: *Organisation: Theorie und Gestaltung.* Stuttgart : UTB, 2006
- [8] BERGMANN, R. ; GARRECHT, M.: *Organisation und Projektmanagement.* Heidelberg : Physica-Verlag, 2008
- [9] BJÖRKSTRAND, R. ; LALLIMO, J.: *Knowledge Intensive Design System - An Attempt for Better Engineering Environment.* In: *1st Nordic Conference of Product Lifecycle Management.* Göteborg, 2006
- [10] BLANKE, T. ; SCHUMANN, M.: *Arbeit in der zivilen Gesellschaft.* In: *Die Zeit* (2000)
- [11] BOND, R.: *Wie verpflichtet man Manager auf Qualität, Einzug von William Edwards Deming auch in Europa.* In: *Neue Züricher Zeitung* (1999)

- [12] BÜHNER, R.: *Betriebswirtschaftliche Organisationslehre*. München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2004
- [13] CAI, J.: *Development of a Reference Feature-based Machining Process Planning Data Model for Web-enabled Exchange in Extended Enterprise*, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Diss., 2007
- [14] DALGAARD, P.: *Introductory statistics with R*. New York : Springer, 2002
- [15] DICK, M. ; WEHNER, T.: Wissensmanagement. In: RAUNER, F. (Hrsg.): *Handbuch Berufsbildungsforschung*. Bielefeld : Bertelsmann, 2005
- [16] EVERSHEIM, W.: *Organisation in der Produktionstechnik: Arbeitsvorbereitung*. Berlin : Springer, 2002
- [17] FONTAINE, M. A. ; MILLEN, D. R.: Understanding the Benefits and Impact of Communities of Practice. In: *Knowledge Networks: Innovation Through Communities of Practice*. Hershey, London, Melbourne, Singapore : IDEA GROUP PUBLISHING, 2004
- [18] GILBRETH, F.B.: *Bricklaying System*. New York, Chicago : The Myron C. Clark Publishing, 1909
- [19] GOLDBERG, M.: Der Schlüssel zu höherer Produktivität: Mit hohem Zeitspannvolumen zu besserer Qualität und geringeren Fertigungskosten. In: *WB Werkstatt und Betrieb* (2009)
- [20] HARDIN, C. D. ; HIGGINS, E. T.: Shared Reality: How Social Verification Makes the Subjektive Objective. In: SORRENTINO, R. M. (Hrsg.) ; HIGGINS, E. T. (Hrsg.): *Handbook of motivation and cognition*. New York : The Guilford Press, 1996
- [21] HARRIS, S. G.: Organizational Culture and Individual Sensemaking: A Schema-Based Perspective. In: *Organization Science* (1994)
- [22] HEHENBERGER, P.: *Computerunterstützte Fertigung: Eine kompakte Einführung*. Heidelberg, Dordrecht, London, New York : Springer, 2011
- [23] HERSEL, R.: Die Kathedrale und der Basar. In: *yalm magazine* (2008)

- [24] HEUSINGER, S.: *STEP-NC-basierter Korrekturkreis für die Schlichtbearbeitung von Freiformflächen*, Universität Stuttgart, Diss., 2005
- [25] HISLOP, D.: THE COMPLEX RELATIONS BETWEEN COMMUNITIES OF PRACTICE AND THE IMPLEMENTATION OF TECHNOLOGICAL INNOVATIONS. In: *International Journal of Innovation Management* (2003)
- [26] HOFFMANN, M.: *CAD/CAM mit CATIA V5: NC-Programmierung, Postprocessing, Simulation*. München : Carl Hanser, 2010
- [27] HÜTTENRAUCH, M. ; BAUM, M.: *Effiziente Vielfalt: Die dritte Revolution in der Automobilindustrie*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2007
- [28] ILGEN, A.: *Wissensmanagement im Großanlagenbau: Ganzheitlicher Ansatz und empirische Prüfung*. Wiesbaden : Deutscher Universitäts-Verlag, 2001
- [29] JACKSON, P.: *Introduction To Expert Systems*. 3. Harlow, England, London, New York, Boston, San Francisco : Addison Wesley, 1998
- [30] KAMINZKY, I.: Automatisieren und Standardisieren. In: *CAD CAM* (2005)
- [31] KIESER, A.: Managementlehre und Taylorismus. In: KIESER, A. (Hrsg.) ; EBERS, M. (Hrsg.): *Organisationstheorien*. Stuttgart : Kohlhammer, 2006
- [32] KINDERMANN, H.: Mitarbeiter sollten modellieren: Abläufe werden durch subjektorientierte Vorgehensweise beschrieben. In: *Computer Zeitung* (2008)
- [33] KRETZSCHMANN, R.: *Entwicklung eines automatisierten CNC-Prozessketten-Generators für spanende Werkzeugmaschinen*, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Diss., 2010
- [34] LAVE, J. ; WENGER, E.: *Situated Learning: Legitimate Peripheral Participation*. Cambridge, Massachusetts : Cambridge University Press, 1991
- [35] LEGNER, C. ; PELLI, D. ; LÖHE, J. ; WALDEN, J. ; FISCHER, T. ; STEIN, O.: Wandel in den Wertschöpfungsstrukturen der Automobilindustrie - Konsequenzen für Prozesse und Informationssysteme / European Business School. Oestrich-Winkel, Deutschland, 2009. – Forschungsbericht
- [36] LIESE, H.: *Wissensbasierte 3D-CAD Repräsentation*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2003

- [37] MCDERMOTT, R.: Why Information Technology Inspired But Cannot Deliver Knowledge Management. In: *California Management Review* (1999)
- [38] MCG-CORE SUB-AP 3.2: *Shopfloorteam Training Standardbegehung Bremen*. 2006. – Interne Schulungsunterlagen der Daimler AG
- [39] MCINERNEY, C.: Knowledge Management and the dynamic Nature of Knowledge. In: *Journal of the American Society for Information Science and Technology* (2002)
- [40] MORGAN, G.: *Images of Organization*. Thousand Oaks, California : Sage Publications, 1986
- [41] NONAKA, I. ; TAKEUCHI, H. ; MADER, F. (Hrsg.): *Die Organisation des Wissens, Wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen*. Frankfurt, New York : Campus, 1997
- [42] NORTH, K.: *Wissensorientierte Unternehmensführung: Wertschöpfung durch Wissen*. 3. Wiesbaden : Gabler, 2002
- [43] NORTH, K. ; GÜLDENBERG, S.: *Produktive Wissensarbeit(er): Antworten auf die Management-Herausforderung des 21. Jahrhundertseispielen*. Wiesbaden : Gabler, 2008
- [44] O'DONNELL, D. ; PORTER, G. ; MCGUIRE, D. ; GARAVAN, T. N. ; HEFFERNAN, M. ; CLEARY, P.: Creating intellectual capital: A Habermasian community of practice (CoP) introduction. In: *Journal of European Industrial Training* (2003)
- [45] PENOYER, J.A. ; BURNETT, G. ; FAWCETT, D.J. ; LIOUC, S.-Y.: Knowledge based product life cycle systems: principles of integration of KBE and C3P. In: *Computer-Aided Design* (2000)
- [46] POLANYI, M.: *The tacit dimension*. New York : Garden City, 1966
- [47] PRATHER, C. W. ; TURRELL, M. C.: MANAGERS AT WORK: INVOLVE EVERYONE IN THE INNOVATION PROCESS. In: *Research Technology Management* (2002)

- [48] PRESTON, S. ; CHAPMAN, C. ; PINFOLD, M. ; SMITH, G.: Knowledge acquisition for knowledge-based engineering system. In: *Int. Journal Information Technologie and Management* (2005)
- [49] PROBST, G. ; RAUB, S. ; ROMHARDT, K.: *Wissen managen: Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen*. Wiesbaden : Gabler, 2006
- [50] RAYMOND, E.: *The Cathedral and the Bazaar*. Sebastopol, California : O'Reilly Media, 2001
- [51] REFA VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION: *Methodenlehre der Planung und Steuerung*. München : Hanser, 1985
- [52] REHÄUSER, J. ; KRCDMAR, H.: Wissensmanagement im Unternehmen. In: SCHREYÖGG, G. (Hrsg.) ; CONRAD, P. (Hrsg.): *Managementforschung 6: Wissensmanagement*. Berlin, New York : Walter de Gruyter, 1996
- [53] SCHMIDT, H.: *Wissensmanagement: Wettbewerbsvorteil oder modernes Märchen? Reflexion über eine Managementmethode am Beispiel der Nahrungsmittelindustrie mit einer Fallstudie Kraft Foods*. Marburg : Metropolis, 2004
- [54] SCHNEIDER, T.: *Automatisierte Akquisition von erfahrungsbasiertem Fertigungswissen im Werkzeug- und Formenbau*, Technische Universität Chemnitz, Diss., 2010
- [55] SCHOEN, S.: *Gestaltung und Unterstützung von Communities of Practice*. München : Herbert Utz, 2001
- [56] SCHREIBER, G. ; AKKERMANS, H. ; ANJEWIERDEN, A. ; HOOG, R. de ; SHADBOLT, N. ; VELDE, W. V. ; WIELINGA, B.: *Knowledge Engineering and Management: The CommonKADS Methodology*. Cambridge, Massachusetts : Massachusetts Institute of Technology, 2000
- [57] SCHREYÖGG, G.: *Organisation: Grundlagen moderner Organisationsgestaltung*. Wiesbaden : Gabler, 2003
- [58] SCHÜPPEL, J.: *Organisatorisches Lernen im Spannungsfeld von Wissens- und Lernbarrieren*. Wiesbaden : Deutscher Universitäts-Verlag, 1996

- [59] SIEMENS PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT SOFTWARE INC.: *Hohe Produktivität bei der Teilefertigung: NX CAM - eine umfassende Lösung für die Fertigung besserer Teile in kürzerer Zeit.* 2011
- [60] SIMON, W.: *Die neue Qualität der Qualität: Grundlagen für den TQM- und KAIZEN-Erfolg.* Offenbach : Gabal, 1996
- [61] SNOWDEN, D.: The ASHEN Model - An enabler of action. In: *Knowledge Management* (2000)
- [62] SNYDER, W. M.: *Communities of Practice: Combining Organizational Learning and Strategy Insights to Create a Bridge to the 21st Century / Social Capital Group.* Cambridge, Massachusetts, 1997. – Forschungsbericht
- [63] SOUKUP, C.: *Wissensmanagement: Wissen zwischen Steuerung und Selbstorganisation.* Wiesbaden : Gabler, 2001
- [64] STAEHLE, W. H.: *Management: Eine verhaltenswissenschaftliche Perspektive.* München : Vahlen, 1991
- [65] STEWART, T.A.: *The Wealth of Knowledge: Intellectual Capital and the Twenty-first Century Organization.* New York : Crown Business, 2003
- [66] SUH, S. H.: *METHOD FOR AUTOMATICALLY GENERATING PART PROGRAM FOR USE IN STEP-NC.* United States Patent, Patent No.: US 6,795,749 B2, 09 2004
- [67] SUH, S. H.: *INTELLIGENT STEP-NC CONTROLLER.* United States Patent, Patent No.: US 7,099,737 B2, 08 2006
- [68] TAYLOR, F. W.: *Die Grundsätze wissenschaftlicher Betriebsführung.* Weinheim : Beltz, 1977
- [69] TEBIS TECHNISCHE INFORMATIONSSYSTEME AG: *Tebis NC-Automation: NC-Programme auf Knopfdruck.* In: *Welt der Fertigung* (2012)
- [70] THOMAS, M. ; MCGARRY, F.: *Top-Down Process vs. Bottom-Up Improvement.* In: *IEEE Software* (1994)
- [71] TURETKEN, O. ; DEMIRORS, O.: *Process Modeling By Process Owners: A Decentralized Approach.* In: *Software Process: Improvement and Practice* (2008)

- [72] VAJNA, S.: Grundlagen und Möglichkeiten der wissensbasierten Produktentwicklung. In: *44. IWK - Interationales Wissenschaftliches Kolloquium*. Ilmenau : TU Ilmenau, 1999
- [73] VDI-FACHBEREICH PRODUKTENTWICKLUNG UND MECHATRONIK: *Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - Feature-Technologie*. Düsseldorf : VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung, 2003
- [74] VON KROGH, G.: The communal resource and information systems. In: *Journal of Strategic Information Systems* (2002)
- [75] VOSS, R.: *BWL kompakt: Grundwissen Betriebswirtschaftslehre*. Rinteln, Deutschland : Merkur, 2007
- [76] WAGNER, K.: *Systematik zur Gestaltung und Optimierung von wissensintensiven, kooperativen Problemlösungsprozessen in der Produktentwicklung*, Universität Stuttgart, Diss., 2008
- [77] WALTER, H. ; CORNELSEN, C.: *Handbuch Führung: Der Werkzeugkasten für Vorgesetzte*. Frankfurt, New York : Campus, 2005
- [78] WENGER, E. C.: *Supporting communities of practice - a survey of community-oriented technologies*. – A online report - Draft, Version 1.3, March 2001
- [79] WENGER, E. C.: Communities of Practice - Learning as a social system. In: *The Systems Thinker* (1998)
- [80] WENGER, E. C. ; SNYDER, W. M.: Communities of Practice - The Organizational Frontier. In: *Harvard Business Review* (2000)
- [81] WILKE, H. ; GNEWEKOW, D.: *Systemische Wissensmanagement*. Stuttgart : Lucius und Lucius, 1998
- [82] WNT DEUTSCHLAND GMBH: Schaftfräser für Stahl. In: *mav* (2011)
- [83] WOLF, J.: *Steuerungsintegrierte, adaptive Programmausführung einer aufgabenorientierten Programmierung in STEP-NC*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Diss., 2009

- [84] ZAHN, E. ; FOSCHIANI, S. ; TILEBEIN, M.: Nachhaltige Wettbewerbsvorteile durch Wissensmanagement. In: KRALLMANN, H. (Hrsg.): *Wettbewerbsvorteile durch Wissensmanagement*. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 2000
- [85] ZBORALSKI, K.: *Wissensmanagement durch Communities of Practice: Eine empirische Untersuchung von Wissensnetzwerken*. Wiesbaden : Deutscher Universitäts-Verlag, 2007
- [86] ZHANG, S. ; WANG, G. ; ZHANG, L. ; FANG, X.: CNC programming system for complex components based on KBE within integrated environment of CAD/CAPP/CAM. In: *Frontiers of Mechanical Engineering in China* (2009)
- [87] ZINK, K. J.: *Business Excellence durch TQM: Erfahrungen europäischer Unternehmen*. München : Hanser, 1994
- [88] ZUPERL, U. ; CUS, F. ; MILFELNER, M.: Fuzzy control strategy for an adaptive force control in end-milling. In: *Journal of Materials Processing Technology* (2005)