

**Wissensbasierte Fertigungsplanung für komplexe Bohrprozesse**

Entwicklung einer 80/20-teilautomatisierten NC-Programmierung

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Andreas Papsch

aus

Mainz

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Peter Köhler

Tag der mündlichen Prüfung: 30. Mai 2011

## **Wissensbasierte Fertigungsplanung für komplexe Bohrprozesse**

### Entwicklung einer 80/20-teilautomatisierten NC-Programmierung

In der vorliegenden Arbeit werden ausgehend von einer Grundlagenarbeit Defizite bestehender NC-Automatisierungen identifiziert. Auf dieser Basis wird die Notwendigkeit einer Teilautomatisierung der NC-Programmierung innerhalb geschlossener CAD/CAM-Prozessketten begründet. Dabei wird herausgearbeitet, dass die NC-Programmierung von komplexen Bohrprozessen ein besonderes Potential bietet, da eine hohe Verwendungshäufigkeit und eine große Variantenvielfalt vorliegen.

Zur genaueren Unterscheidung von Automatisierungsgraden im Umfeld von Unikat- und Kleinserienfertigung, wird eine Klassifizierung dieser Automatisierungsgrade erarbeitet und darauf aufbauend der Grad mit der höchsten relativen Wirtschaftlichkeit berechnet. Bei der Untersuchung kann als Zwischenergebnis bei einem Grad von 80 % die höchste Wirtschaftlichkeit ermittelt werden. Dieses Ergebnis wird durch eine Sensitivitätsanalyse verifiziert.

Im Anschluss wird ein Ansatz zur wechselseitigen Verknüpfung von manuell-kognitiven und computerbasiert-automatisierten Teilprozessen entwickelt. Aufbauend auf methodischen Analysen der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge konnten Ansätze zur strukturierten Wissensakquisition und eine Methodik zur Modellierung der Wissensbasis, sowie der Inferenzmaschine erarbeitet werden. Im Besonderen hatten dabei die erarbeiteten Anforderungen durch die gezielte 80/20-Teilautomatisierung Einfluss. Die Inferenzmaschine wird basierend auf der Feature-Technologie nach dem Prinzip der Rückwärtsverkettung unter Verwendung von Unit Machining Features entwickelt.

Aus den beschriebenen Methoden und Konzepten wird ein Ablaufmodell entwickelt, das in Pre-, In- und Postprozesse unterteilt ist. Dabei sind der kognitiv basierte manuelle und der computerbasierte automatisierte Teilprozess eng miteinander verknüpft. Zusätzlich wird eine Werkzeug- und Schnittwertauswahl entwickelt, die zum einen eine praxisnahe Suche ermöglicht und zum anderen den Mangel an Datenqualität und -quantität innerhalb der Datenbanken gezielt durch manuelle Interaktion im In-Prozess und Pflegekonzepte angeht.

Das beschriebene Ablaufmodell wurde in einem Realisierungsbeispiel bei der Firma Siemens validiert. Das Unikatprodukt Turboverdichter bietet bevorzugte Bedingungen, die durch eine Produkt- und Umfeldanalyse belegt werden. Nachweislich konnte eine optimierte Gesamtwirtschaftlichkeit, verglichen mit dem Standard-CAX-System, erreicht werden.

**Das Ziel der Wissenschaft ist es immer gewesen,  
die Komplexität der Welt auf simple Regeln zu reduzieren.**

Benoît Mandelbrot (1924 – 2010)

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand parallel zu meiner Tätigkeit bei der Siemens AG in Duisburg in Zusammenarbeit mit der Professur Fertigungstechnik vom Institut für Produkt Engineering der Universität Duisburg-Essen.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt möchte ich ganz besonders für die Unterstützung, das große Vertrauen, die Kontakte und die Möglichkeiten in den letzten Jahren und insbesondere während dieser Arbeit danken. Ganz besonders schätze ich an ihm seine stets zeitnahe Verfügbarkeit zur Diskussion wichtiger Fragen.

Ich danke sehr Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Peter Köhler von der Professur „Rechnereinsatz in der Konstruktion“ für die Übernahme des Korreferats, das entgegengebrachte Interesse an und die Unterstützung bei meiner Arbeit.

Mein Dank geht an Herrn Dr. Axel Hoynacki, der meine Dissertation als Betreuer bei Siemens ermöglicht und stets konstruktiv unterstützt hat, sowie an Herrn Daniel Wentzel, der mir hervorragende Bedingungen für die Durchführung der Arbeit bot.

Herzlichen Dank an Silke van Os, Claudia Burgard und Daniela Schuldei für die hilfreichen Korrekturen und Anregungen.

Ich bedanke mich außerdem herzlich für die Unterstützung und gute Zusammenarbeit bei meinen ehemaligen Arbeitskollegen der Siemens AG in Duisburg: Horst Bartsch, Thorsten Bergt, Andreas Bihn, Fabian Dietz, Iradj Feizi, Walter Heiermann, Frederic Janßen, Marco Joeken, Karl-Heinz Kolbe, Wolfgang Kroll, Prof. Dr. Klaus Mecking, Frank Nolden, Thomas Spork, Dr. Alexander Stekolschik, Dennis Visser, Matthias Wald und Andreas Zindel. Die sehr angenehme Atmosphäre hat sicherlich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen und wird dafür sorgen, dass mir die Zeit im Entwicklungsprojekt „Reduce Complexity“ und in der Fertigungstechnologie stets in guter Erinnerung bleiben wird.

Persönlich bedanke ich mich sehr herzlich bei meiner Mutter und meinem Bruder, die es mir erst ermöglicht haben, so weit zu kommen und meinen Weg stets unterstützt haben. Zuletzt, aber sehr von Herzen, danke ich meiner Großmutter. Sie wäre heute sehr stolz über meinen Erfolg, den sie maßgeblich mit ermöglicht hat. Leider konnte sie den Abschluss der Arbeit nicht mehr miterleben; ich hatte die Arbeit gerne für die letzte Zeit mit ihr zur Seite gelegt.

Andreas Papsch

30. Mai 2011

## Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellen- und Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemschilderung .....	1
1.2 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit.....	2
<b>2 Grundlagen.....</b>	<b>4</b>
2.1 Stand der CAD/CAM-Prozesskette .....	4
2.1.1 Wissensbasierte NC-Programmierung in der Prozesskette.....	5
2.1.2 Rolle der Feature-Technologie in einer wissensbasierten CAD/CAM-Kette .....	7
2.1.3 Stand der Fertigungsplanung, im Speziellen der NC-Programmierung.....	10
2.2 Die Fertigungstechnologie des Bohrens und Fräsens .....	12
2.3 Stand der automatisierten NC-Programmierung .....	16
2.3.1 Grundlagen des automatisierten NC-Programmierprozesses.....	16
2.3.2 Untersuchung des Automatisierungsbedarfes der NC-Programmierung .....	18
2.3.3 Ansätze der Wissensintegration bei der Fertigungsplanung .....	19
2.3.4 Stand der Forschung zu wissensbasierten Fertigungsplanungssystemen.....	22
2.3.5 Entwicklungsstand der kommerziellen wissensbasierten Fertigungsplanungssysteme .....	25
2.3.6 Grundlagen der Inferenzmaschine .....	29
2.4 Defizite heutiger NC-Automatisierungen bei komplexen Bohrprozessen .....	30
<b>3 Konzept zur Teilautomatisierung der NC-Programmierung bei komplexen Bohrprozessen .....</b>	<b>35</b>
3.1 Ansatz zur Klassifizierung des Automatisierungsgrades .....	35
3.1.1 Quasi-Vollautomatisierung .....	35
3.1.2 80/20-Automatisierung .....	36
3.1.3 50/50-Automatisierung .....	36
3.1.4 Diskrete Automatisierungen.....	37
3.1.5 Manuelle NC-Programmierung.....	37
3.2 Betrachtung der Gesamtwirtschaftlichkeit abhängig vom Automatisierungsgrad .....	37
3.2.1 Sensitivitätsanalyse zur Berechnung der relativen Wirtschaftlichkeit.....	42
3.2.2 Risiken und weitergehende Überlegungen zur relativen Wirtschaftlichkeit.....	43
3.3 Modellierung der Wissensbasis.....	44
3.3.1 Anforderungen an das Wissensmanagement.....	44
3.3.2 Konzept zur Erarbeitung einer Wissensbasis .....	47
3.3.3 Konzepte für das Wissensmanagement bei menschlichen Blockaden.....	51
3.3.3.1 Probleme bei der Wissensakquisition .....	51

3.3.3.2	Automatisierung muss keine Black Box sein.....	53
3.3.4	Entwurf einer Methodik zur Modellierung der Wissensbasis.....	55
<b>3.4</b>	<b>Anforderungen an die Inferenzmaschine.....</b>	<b>59</b>
<b>4</b>	<b>Ablaufmodell der teilautomatisierten NC-Programmierung.....</b>	<b>63</b>
<b>4.1</b>	<b>Die Teilautomatisierung im Gesamtprozess .....</b>	<b>64</b>
4.1.1	Konzept für den Pre-Prozess .....	65
4.1.2	Konzept des In-Prozesses der Teilautomatisierung .....	66
4.1.2.1	Abschnitt Prozesseinstieg.....	69
4.1.2.2	Abschnitt Gruppierung.....	69
4.1.2.3	Abschnitt fertigungsstrategische Optionen .....	70
4.1.2.3.1	Die Einführung der Hauptfertigungsfolge .....	71
4.1.2.3.2	Das Werkzeug- und Schnittwertsuchkonzept .....	71
4.1.2.3.3	Die Sortierung und Auswahl der Alternativen Fertigungsstrategien .....	79
4.1.2.4	Abschnitt Operationserzeugung und -befüllung .....	82
4.1.2.5	Abschnitt Prozessabschluss.....	83
4.1.3	Konzept für den Post-Prozess .....	84
<b>4.2</b>	<b>Administration der Teilautomatisierung zur Sicherung und Steigerung der Qualität.....</b>	<b>85</b>
4.2.1	Administrative Verarbeitung von Feedback bei einer Teilautomatisierung .....	86
4.2.2	Qualität und Quantität von Datensätzen in Wissensdatenbanken.....	87
4.2.3	Die CAD- und CAM-Methodik .....	89
<b>5</b>	<b>Validierung der Ergebnisse in einer Anwendung .....</b>	<b>92</b>
<b>5.1</b>	<b>Analyse zur Erfassung des Umfeldes.....</b>	<b>92</b>
<b>5.2</b>	<b>Grundstruktur des Anwendungssystems.....</b>	<b>96</b>
<b>5.3</b>	<b>Wissensakquisition, Modellierung der Wissensbasis und Wissensverarbeitung.....</b>	<b>98</b>
<b>5.4</b>	<b>Realisierung des Pre-, In- und Post-Prozesses.....</b>	<b>104</b>
5.4.1	Der Pre-Prozess im Anwendungssystem .....	104
5.4.2	Der In-Prozess im Anwendungssystem .....	107
5.4.3	Der Post-Prozess im Anwendungssystem.....	109
<b>5.5</b>	<b>Implementierte Lösungen zur Sicherung und Steigerung der Qualität .....</b>	<b>111</b>
<b>5.6</b>	<b>Kritische Bewertung der Ergebnisse der Realisierung.....</b>	<b>112</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>116</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>119</b>
	<b>Anhang A1.....</b>	<b>127</b>

## Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1:	Überblick über unterschiedliche Bohrverfahren .....	13
Tabelle 2:	Vergleich von Expertenmeinungen beim Bohren [HAL03] .....	14
Tabelle 3:	Fräsverfahren mit denen Bohrungen (teil-)gefertigt werden können.....	15
Tabelle 4:	Annahmen zum relativen Aufwand und Nutzen .....	38
Tabelle 5:	Annahmen zum relativen Personalaufwand .....	39
Tabelle 6:	Berechnung des relativen Aufwand-Nutzen-Gefüges .....	40
Tabelle 7:	Ansatz zur Gliederung der Wissensbasis .....	58
Tabelle 8:	Mögliche Zustände einer Operation bzgl. Werkzeug und Schnittdaten.....	80
Tabelle 9:	Beispiel zur automatischen Auswahl einer Alternativen Strategie .....	80
Tabelle 10:	Veränderte Anforderungen an Daten in bestehenden Datenbanken .....	87
Tabelle 11:	Umfeldanalyse, Details zum Produkt und zur Fertigung .....	93
Tabelle 12:	Beispiele für Sonder-Features und deren Einflüsse auf den In-Prozess.....	107
Abbildung 1:	Struktur der vorliegenden Arbeit.....	3
Abbildung 2:	Ausschnitt aus dem PLM-Prozessnetz .....	6
Abbildung 3:	Zeichnungsausschnitt einer Modellzeichnung .....	8
Abbildung 4:	Möglichkeiten der NC-Programmierung, ein 6-Stufen-Konzept [KR07].....	10
Abbildung 5:	Zerlegung der Fertigungsaufgabe (Details aus: [WIT06] [SCA03]) .....	11
Abbildung 6:	Bohren - Richtung der Schnitt-, Vorschub- und Wirkbewegungen [WIT06].....	13
Abbildung 7:	Schematische Darstellung des GegenlaufräSENS [WIT06].....	15
Abbildung 8:	Die drei Grundarten beim Fräsen nach DIN 8589-3 [DIN8589] .....	15
Abbildung 9:	Teilgebiete der Prozesstechnik nach Schöne [LAN04].....	17
Abbildung 10:	XPS-Struktur [BK06] .....	22
Abbildung 11:	Übersicht über die ProDrill Form-Tabelle [INT10].....	27
Abbildung 12:	Zerlegung eines Features in Unit Machining Features [CAI07] [VD93].....	29
Abbildung 13:	Rückwärtsverketteter Planungsprozess der Inferenzmaschine .....	30
Abbildung 14:	Darstellung der NC-Automatisierung anhand einer Aufwand-Nutzen- Funktion [KOC04] .....	31
Abbildung 15:	Verlauf der Aufwände über den Automatisierungsgrad .....	39
Abbildung 16:	Relativer Vergleich der Automatisierungsgrade .....	41

Abbildung 17: Ishikawa-Diagramm: Einflussgrößen auf den Inhalt und die Entwicklung der Wissensbasis (Details aus: [LEH08] [LM06] [WEG07]).....	45
Abbildung 18: Prozess der Wissensakquisition .....	48
Abbildung 19: Eine Automatisierung birgt die Gefahr einer Black Box für den Anwender .....	53
Abbildung 20: Übersicht über Maße beim Bohrprozess .....	54
Abbildung 21: Haupteinflüsse auf die Entwicklung der Inferenzmaschine.....	60
Abbildung 22: Übergeordnetes Ablaufmodell der teilautomatisierten NC-Programmierung.....	63
Abbildung 23: Abläufe innerhalb der teilautomatisierten NC-Programmierung.....	64
Abbildung 24: In-Prozess – Verfeinerung von Punkt 301 aus Abbildung 23.....	68
Abbildung 25: Weitere optionale Interaktionen einer Stelle aus Abbildung 24 .....	69
Abbildung 26: Maße bei Bohrer (links) und verstellbarem Spindelwerkzeug (rechts).....	73
Abbildung 27: Spitzenführung von Bohrwerkzeugen.....	74
Abbildung 28: Ordnungsstruktur der Fertigungsreihenfolge .....	83
Abbildung 29: Aufgespannter und NC-programmierter Gehäusedeckel eines Verdichters .....	95
Abbildung 30: Grundstruktur des Systembeispiels .....	96
Abbildung 31: Durchmesser-Tiefen-Grenzen einer Bohrungsstufe.....	100
Abbildung 32: Bedingungen für Alternative Strategien in der FTDB .....	100
Abbildung 33: Mapping von Feature-Attributen mit Standardattributen in der FTDB .....	101
Abbildung 34: Ausschnitt aus der Fertigungstechnologiedatenbank .....	102
Abbildung 35: Datenbankverbindungen und -abfragen .....	103
Abbildung 36: Feature-unabhängiger Anwenderdialog des Pre-Prozesses .....	104
Abbildung 37: Feature-spezifischer Anwenderdialog des Pre-Prozesses .....	106
Abbildung 38: Anwenderdialog zur manuellen Auswahl einer Alternativen Strategie.....	108
Abbildung 39: Anwenderdialog zur manuellen Auswahl eines Werkzeuges .....	109
Abbildung 40: Feedbacksheet zur Unterstützung der Tätigkeiten im Post-Prozess.....	110
Abbildung 41: Anwenderdialog: Supportumgebung.....	111



## Abkürzungsverzeichnis

A	Alternative Fertigungsstrategie; Teil des In-Prozess-Konzeptes dieser Arbeit
ÄÄ	äquivalente Anwender
Admin	<b>Administrator(en)</b>
Anw	<b>Anwender</b>
APT	<b>Automatical Programmed Tool</b>
BF	<b>Bearbeitungsfolge</b>
CAD	<b>Computer Aided Design</b>
CAM	<b>Computer Aided Manufacturing</b>
CA(P)P	<b>Computer Aided Prozess Planning</b>
CAx	Gesamtheit aller CA-Systeme (CAD, CAE, CAM, CAPP, usw.)
CIM	<b>Computer Integrated Manufacturing</b>
CNC	<b>Computerized Numerical Control</b>
D	<b>Durchmesser</b>
E	In-Prozess <b>Ende</b> ; Teil des In-Prozess-Konzeptes dieser Arbeit
FBM	<b>Feature Based Manufacturing</b>
FTDB	<b>Fertigungstechnologiedatenbank</b>
G	Feature- <b>Gruppe</b> ; Teil des In-Prozess-Konzeptes dieser Arbeit
H	<b>Hauptfertigungsfolge</b> ; Teil des In-Prozess-Konzeptes dieser Arbeit
I	<b>Initialisierung</b> , In-Prozess <b>Anfang</b> ; Teil des In-Prozess-Konzeptes dieser Arbeit
KBE	<b>Knowledge Based Engineering</b>
KI	<b>Künstliche Intelligenz</b>
KF	<b>Knowledge Fusion</b>
L	<b>Länge</b> , Bohrungstiefe
MA	<b>Mitarbeiter</b>
MKE	<b>Machine Knowledge Editor</b>
NC	<b>Numerical Control</b>
NX	CAD/CAM-Software von Siemens PLM
O	Fertigungs <b>operation</b> ; Teil des In-Prozess-Konzeptes dieser Arbeit
PDM	<b>Produkt Daten Management</b>
PLM	<b>Produkt Lebenszyklus Management</b>
PP	<b>Postprozessor</b>
QS	<b>Qualitätssicherung</b>
T	Feature- <b>Typ</b> ; Teil des In-Prozess-Konzeptes dieser Arbeit
TDM	<b>Tool Data Management</b> , Software der Firma TDM Systems
UMF	<b>Unit Machining Feature</b>
XPS	<b>Expertensystem</b>



## 1 Einleitung

Computer Aided Design (CAD) und Computer Aided Manufacturing (CAM) Systeme werden seit 1960 in der Konstruktion und Fertigungsplanung eingesetzt. Als eines der ersten 2D-CAD-Systeme sei hier das auf IBM-Großrechnern basierte CADAM (Computer Augmented Design And Manufacturing) von Lockheed, USA benannt. Auch Avions Marcel Dassault startet mit Vorläufern von CATIA (Computer-Aided Three-Dimensional Interactive Application), welches durch Dassault Aviation als eines der ersten Systeme auch vermarktet wurde. [LUP09] Die NC-Technik, eingesetzt in NC-Maschinen der Fahrzeug- und Luftfahrtindustrie, brachte erste einfache CAM-Systeme hervor. 1979 entstanden die ersten CAD/CAM-Kopplungen. Aufgrund steigender Produktkomplexität wurden eine durchgängige Datennutzung und eine schnellere NC-Programmierung erforderlich. [KR09]

In den darauf folgenden Jahrzehnten wurden die CAD- und CAM-Systeme wesentlich weiter entwickelt, näher zusammengeführt und Automatisierungen eingebracht. Eine bis heute stetige Steigerung der Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit der CAD/CAM-Prozesskette setzte ein. Zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsprojekte brachten neue Themen hervor oder optimierten einzelne Schwerpunkte; beispielhaft seien die Parametrik, der 3D-Ansatz, die Feature-Technologie [VDI2218] und das Knowledge Based Engineering benannt.

### 1.1 Problemschilderung

Feldhusen und Lashin stellten 1996 die These auf, dass aufgrund des sinkenden Preisniveaus, dem daraus resultierenden Kostendruck und aufgrund verringerter Ressourcen bei steigendem Erfolgsdruck, zukünftig derjenige auf dem Markt erfolgreich sein wird, der geeignete Strategien und moderne Tools wie CAD und CAM bei der Produktentwicklung hinzuzieht. [FL96] Nach Wendenburg schlummert in der Produktentwicklung ein beträchtliches Potential für die Automatisierung von sich häufig wiederholenden Abläufen. [WEN07]

Im Maschinenbau gehört die Bohrung, als eine geometrische Ausprägung die NC-programmiert wird, zu den am häufigsten verwandten Formelementen. [VS05] Im Vergleich zur konventionellen NC-Programmierung kann mit automatisiert erzeugten standardisierten Bohrprozessen die Dauer der Erzeugung von Tagen auf Stunden reduziert werden. [SIE08c] Für das Automatisieren spricht zudem, dass das Verhältnis der Dauer der NC-Programmierung von Bohrungen zur Bearbeitungszeit deutlich größer ist, als beim Fräsen einer ebenen Fläche oder beim Drehen eines Zylinders. [HAL03] Die NC-Programmierung hat dabei einen sehr entscheidenden Einfluss auf Wirtschaftlichkeit der NC-Fertigung. [KR07] Bei bohrungsintensiven Teilen ergibt sich hieraus ein großes Optimierungspotential.

Erste regelbasierte Systeme für die NC-Automatisierung beim Bohren wurden bereits in den 70er-Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelt. Nachteile waren die nicht vorhandene Assoziativität, sowie die komplizierte Einbindung in bestehende Prozessketten und Systeme. [BHS07] Diese Nachteile ließen sich überwinden, als CAD/CAM- und regelbasiertes System enger miteinander verknüpft wurden, indem sie einen gemeinsamen Geometrie-Modeller nutzten und, als Vorteile der Feature-Technologie und wissensbasierte Systeme zum Einsatz kamen. [SIE08b], [WEN07]

In den darauf folgenden Jahrzehnten wurde vielfach versucht eine Vollautomatisierung des gesamten NC-Programmierprozesses zu erreichen, Computer Integrated Manufacturing (CIM) war hierbei das Schlagwort. [KR07] Der im Ansatz einfache Prozess des Bohrens sollte durch Regelentscheide so weit in einem Computersystem abgebildet werden, dass jede konstruktive Ausprägung erkannt und automatisiert NC-programmiert werden konnte.

Bei der NC-Programmierung von *komplexen* Bohrprozessen zeigt sich jedoch heutzutage, dass die alternativen Fertigungsstrategien und die Anzahl der Einfluss nehmenden Parameter überproportional steigen. Folglich sind eine Abbildung dieser Regeln in Wissensstrukturen und die Administration umso anspruchsvoller. Eine Vollautomatisierung in einem statischen Umfeld bringt dabei bereits große Herausforderungen mit sich; in einem dynamischen und wirtschaftlich arbeitenden Umfeld, wie einer innovativen Fertigung, ist die Vollautomatisierung praktisch nicht mehr möglich – wie diese Arbeit darstellen wird.

## 1.2 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit

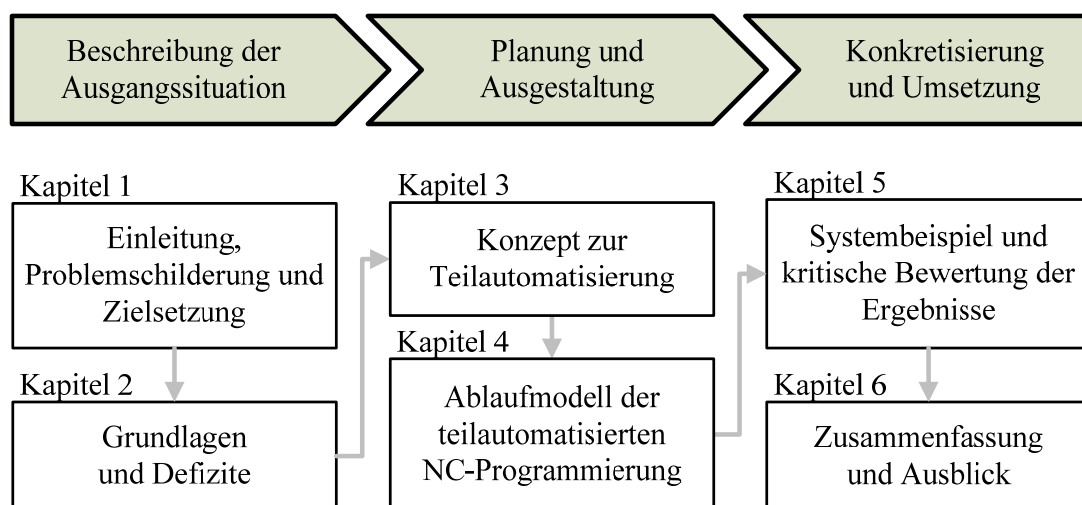
Das Ziel dieser Arbeit ist es, den kognitiv basierten manuellen und den computerbasierten automatisierten NC-Programmierprozess erstmals als eine sich ergänzende Einheit innerhalb des CAD/CAM-Gesamtprozesses zu integrieren. Aufgabe ist es dabei jedoch nicht, eine neue allgemeine Methode zur wissensbasierten NC-Programmierung komplexer Bohrprozesse zu entwickeln. Um das gesetzte Ziel zu erreichen, werden basierend auf bestehenden Grundlagen zur NC-Automatisierung, zunächst Defizite dieser herausgearbeitet. In einem Schluss wird aus diesen gefolgert, dass die Teilautomatisierung der NC-Programmierung komplexer Bohrprozesse sinnvoll ist und erstmals eine gezielte Entwicklung dieser durchgeführt: Anhand einer aufgestellten Klassifizierung werden die unterschiedlichen Automatisierungsgrade dargestellt und bezüglich wesentlicher Merkmale beurteilt; dazu wird eine relative Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und eine Sensitivitätsanalyse der Annahmen durchgeführt. Anhand der Ergebnisse wird der optimale Automatisierungsgrad ausgewählt und ein Konzept zur Modellierung der 80/20-teilautomatisierten NC-Programmierung, das bereits in der Entwicklungsphase

des Expertensystems gezielt die Teilautomatisierung der Inferenzmaschine und der Wissensbasis unterstützt, entwickelt. Hierfür werden bereits bestehende grundlegende Ansätze zur Automatisierung der Fertigungsplanung im Allgemeinen und der NC-Programmierung im Speziellen verwendet, und Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge u. a. des Menschen auf die Teilautomatisierung methodisch herausgearbeitet.

Die entwickelten Methoden und Konzepte kommen in einem Ablaufmodell einer teilautomatisierten NC-Programmierung von komplexen Bohrprozessen zur Anwendung. Um die Automatisierung ist ein manueller Prozess zu entwickeln, so dass sich beide Prozesssteile gegenseitig ergänzen. Nicht automatisierte Strukturen sowie fehlerhafte oder verbesserungswürdige Automatisierungsergebnisse sollen schnell und gezielt für die manuelle Vor- und Nacharbeit identifizierbar sein. Mögliche bestehende Prozesskettenelemente, wie z. B. eine Werkzeugdatenbank, werden hierbei integriert. Administrative Prozesse und Informationsrückflüsse werden zudem definiert, damit Wissensakquisition, Fehlerdiagnose und Systempflege bei wachsenden Regelstrukturen effektiv und effizient möglich sind.

Das entwickelte Ablaufmodell soll in einer industriellen Anwendung validiert werden. Hierzu wird diese Arbeit gezielt auf das Umfeld von Unikat- und Kleinserienfertigern von Großmaschinen, wie z. B. Prozessgasverdichtern, ausgerichtet. In diesem Umfeld laufen Produkte mit einer hohen Produktkomplexität und Variantenvielfalt, diversifiziert an verschiedenen Standorten durch den Produktentwicklungs- und Fertigungsprozess. In der Validierung werden hierzu alle wesentlichen Komponenten einer 80/20-Teilautomatisierung in einem bestehenden CAD/CAM-System implementiert.

Die folgende Abbildung 1 stellt eine Übersicht über die Struktur der vorliegenden Arbeit dar:



**Abbildung 1:** Struktur der vorliegenden Arbeit

## 2 Grundlagen

Dieses Kapitel führt mit Konzentration auf das Zerspanen von Bohrungen, in den aktuellen Stand der CAD/CAM-Prozesskette, in die relevanten Fertigungstechnologien und die Automatisierung der NC-Programmierung ein. Zum Abschluss dieses Kapitels werden Defizite bei der heutigen NC-Automatisierung innerhalb der CAD/CAM-Prozesskette aufgezeigt.

### 2.1 Stand der CAD/CAM-Prozesskette

Die heutige CAD/CAM-Prozesskette, die durchgängige Nutzung von Daten der Konstruktion über die Arbeitsplanung, NC-Programmierung bis hin zur CNC-Maschine, umfasst die Teile des Produktionsbereiches eines Unternehmens, die mittelbar oder unmittelbar an der Erstellung der Steuerdaten für NC-Maschinen beteiligt sind. [EVE94] Da keiner der Prozessbeteiligten alle Zusammenhänge kennt, in zeitoptimierten Entwicklungsprozessen jedoch parallel und disziplinübergreifend optimale Entscheidungen zu treffen sind [TAS05], wird Concurrent Engineering (gleichzeitige Entwicklung unterschiedlicher, aber zusammengehöriger Bauteile) oder Simultaneous Engineering (gleichzeitige Bearbeitung derselben Bauteile an verschiedenen Standorten) eingesetzt. [KR09] Im 21. Jahrhundert entwickelte sich die Fertigung zu einem dezentralisierten Umfeld mit steigender Dynamik. Die Forschung hat sich in den letzten Jahren vermehrt auf die Flexibilisierung, Dynamisierung, Agilität und Produktivität konzentriert. [WS07] Im Folgenden werden Methoden und Ergebnisse relevanter Studien auf diesem Themengebiet vorgestellt:

Die **wissensbasierte Produktentwicklung** (englisch: Knowledge-based Engineering – KBE) gilt als zukunftsweisende Methodik für eine innovative und effiziente Produktentwicklung. Das strategische Ziel von KBE ist die Überführung einer unstrukturierten, zufallsbedingten Wissensnutzung in eine strukturierte und zielführende Nutzung. Lupa [LUP09] hat hierzu Ansätze aufgezeigt, wie die Grobgestalt einer Komponente im Rahmen eines Konfigurationsprozesses automatisiert in das CAD-System übertragen werden kann, um so die Feingestalt zu erhalten. Das Ziel dieser Methode ist vergleichbar mit dem Ansatz der Wissensintegration in CAM-Systemen.

Der **Collaborative-Ansatz** gibt Lösungsansätze für ein sich ständig veränderndes komplexes Umfeld. Multinationale Kooperationen und Dezentralisierung können durch die Nutzung von neuen Kommunikationstechnologien wie dem Internet und durch Bildung von virtuellen Teams ermöglicht werden. Die aktuelle Entwicklung der Informations- und Kommunikationsmedien ermöglicht immer schnellere, einfachere und kostengünstigere Ansätze zur verteilten Arbeit. Concurrent Collaboration ermöglicht es, dass nach Bedarf Forschungs- und Ent-

wicklungs-Teams virtuell aus weltweit verteilten Experten und Kompetenzzentren zusammengesetzt werden. [EAT08] CAD, CAPP und CAM sowie Produktdaten-Management (PDM) etablieren sich hierbei als wichtige lokale IT-Lösungsbausteine. [SCH03], [SC06] In der IT ist es nun möglich, das ehemals Stand-alone-CAD/CAM-Umfeld in räumlich dezentralisierten Netzwerkumgebungen zu entwickeln. Nutzer können gemeinsam und dynamisch an CAD-Geometrien und CAM-Aufgaben arbeiten. [CM09] „*Design-Anywhere-Build-Anywhere*“ (DABA) ist ein Schlagwort von Suh et al. [SCL06]. Sie untersuchen einige wesentliche Datenverteilungsprobleme, wie:

- Inkompatibilität, Heterogenität und Komplexität der Produktdaten
- Fehlende Verbindung zu Produktinformationen
- Sichtbarkeit/Nutzbarkeit der Produktinformationen bei Zulieferern
- Qualität der Daten und Datenintegrität [CM09]

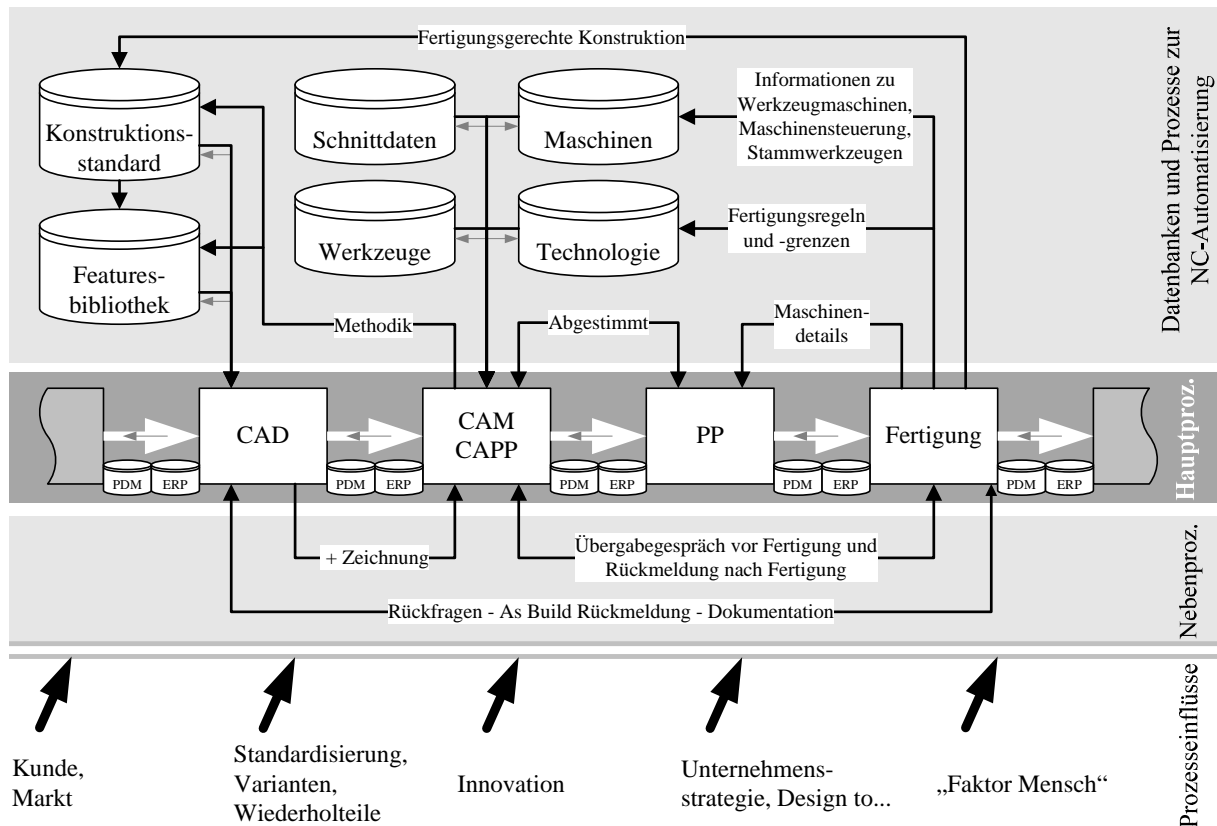
Campos et al. [CM09] erarbeiten in ihrer Arbeit Ansätze, um die Schnittstelle STEP und STEP-NC in diesen Collaborative-Ansatz einzubeziehen. Der Datenaustausch kann so über unterschiedliche CAD- und CAM-Systeme bis zur Maschine ermöglicht werden. Die Autoren entwickeln hierzu einen Ansatz, mit dem Fertigungsinformationen bidirektional rückverfolgbar werden. Die Entwicklung von STEP schreitet dabei, bezogen auf spezifische Anwendungen, immer weiter voran, verschiedenste STEP-Schnittstellen sind: Für das Produktdesign AP-203 (ISO, 1994b), AP-224 (ISO, 2001) oder für CNC AP-238 (ISO, 2005d).

**STEP-NC** ist ein Ansatz, um den bewährten G-Code aufgrund der steigenden Informationsdichte durch eine neue Programmierschnittstelle abzulösen. Das Datenmodell STEP-NC verfügt über eine objektorientierte Datenstruktur und nutzt die Feature-Technologie, hierdurch kann das Schließen der CAD/CAM-Prozesskette bis in die Fertigung erreicht werden. So untersucht z. B. Hyun [HYU08], wie das Erfahrungswissen der Maschinenbediener mit Hilfe von STEP-NC besser in den NC-Programmierprozess eingebracht werden kann.

### **2.1.1 Wissensbasierte NC-Programmierung in der Prozesskette**

Die CAD/CAM-Prozesskette über den Postprozessor (PP) bis in die Fertigung zeigt Abbildung 2; fokussiert auf die Prozesse in der NC-Programmierung, eingegliedert in das PLM-Prozessnetz und die wichtigsten Systemeinflüsse. Mit Blick auf eine automatisierte NC-Programmierung sind dort zudem die wichtigsten Datenbanken und Prozesse innerhalb der CAD/CAM-Prozesskette abgebildet. Die verwendeten CAD- und CAM-Systeme sollten möglichst eng miteinander arbeiten können, um durch eine gemeinsame Datenbasis eine redundanzfreie Datenhaltung gewährleisten zu können. [HHE05]

Allgemein kann gesagt werden, dass sich der entscheidende wirtschaftliche Erfolg von 3D-CAX-Systemen erst bei Ein- bzw. Anbindung möglichst aller Stufen des Produktionsprozesses vom Konzeptentwurf bis zur Fertigung einstellt. [FL96], [HFR03], [SCH07]



**Abbildung 2:** Ausschnitt aus dem PLM-Prozessnetz

Abbildung 2 stellt einen für diese Arbeit wichtigen Ausschnitt aus dem PLM-Prozessnetz dar. In dunklem Grau der Hauptprozess der CAD/CAM-Prozesskette. Der Hauptdatenfluss geht von links nach rechts, unterstützt vom PDM- und ERP-System. Die kleinen grauen Pfeile deuten an, dass neben der Hauptdatenflussrichtung in der Betriebsphase, Feedbackschleifen existieren, die Erfahrungen an die vorgelagerten Prozessteilnehmer zurückmelden, um eine stetige Optimierung zu erreichen. Im Hauptprozess findet im CAD-System die Detailkonstruktion des zu fertigenden Produktes statt, das erstellte Modell wird innerhalb der CAD/CAM-Prozesskette für die weiteren CAX-Systeme verwandt, Nebenprodukt kann zudem eine Zeichnung sein. CAM und CAPP umfassen die computergestützten Fertigungs- und Fertigungsplanungsaufgaben. Der Postprozessor<sup>1</sup> ist ein erforderliches Software-Programm, das die vom CAM-System berechneten Standarddaten in ein maschinenbezogenes NC-Programm

<sup>1</sup> An dieser Stelle sei erwähnt, dass der Postprozessor (PP) und der in dieser Arbeit behandelte Post-Prozess nicht dasselbe sind. Der PP ist eine Software die zum Abschluss der NC-Programmierung eingesetzt wird. Der Post-Prozess ist ein Teil des in dieser Arbeit erarbeiteten Ablaufmodells der 80/20-Teilautomatisierung.



umsetzt. Datenmanagement, Einkauf, Logistik, Kostencontrolling und weitere wichtige Prozesse finden dabei parallel über die gesamte CAD/CAM-Prozesskette hinweg statt.

Oberhalb des Hauptprozess sind die für eine automatisierte NC-Programmierung wichtigsten Peripheriesysteme und die Datenflüsse dargestellt. Wesentlich zu bemerken ist, dass bei *mehreren* Datenbanken notwendige Informationen und Daten zur Automatisierung angefragt werden. Unterhalb des Hauptprozesses sind die wichtigsten Nebenprozesse einer Standard CAD/CAM-Prozesskette aufgetragen. Auf das gesamte Prozessnetz wirken zusätzlich Prozesseinflüsse von Außen ein. In der Konstruktion wird die Produktbeschreibung, geprägt durch die Wünsche des Kunden, sowie durch „design to...“-Strategien des Unternehmens. Standardisierung, Varianten und Wiederholteile, sowie Innovationen haben direkten Einfluss auf Modelle, Baugruppen und/oder Zeichnungen. Der „Faktor Mensch“ spielt nicht zuletzt eine – vielleicht sogar *die* – entscheidende Rolle beim Erfolg oder Misserfolg eines Unternehmens.

### **2.1.2 Rolle der Feature-Technologie in einer wissensbasierten CAD/CAM-Kette**

Die Feature-Technologie spielt in der CAD/CAM-Prozesskette und daher auch für diese Arbeit eine zentrale Rolle. Die Einführung der Feature-basierten Modellierung erfolgte aus der Notwendigkeit heraus, Konstruktions- und Fertigungssysteme innovativer und somit effizienter zu gestalten, um Produkte kostengünstiger zu entwickeln. [HOF01] Diese Technologie und die Methoden zur Feature-Weiterverwendung stellen den ersten und wichtigsten Schritt im Übersetzungsprozess der CAD-Informationen in adäquate Fertigungsanweisungen hin zu einer automatisierten NC-Programmierung dar. [BNM08], [ERV88], [JON92], [SAG07] Durch Standard-Feature-Bibliotheken besteht die Möglichkeit, den Werkzeugpool direkt passend aufzubauen und so Kosten zu verringern. [HFR03] Heutige CAD- und CAM-Systemhersteller setzen in großer Zahl auf diese Technologie: Pro/Engineer & ProNC (PTC) [PTC08], CATIA (Dassault Systems) [DES08], NX (Siemens AG) [SIE10], SolidCAM (SolidCAM GmbH) [SOL08], HyperMill (Open Mind Technologies AG) [OPE08] und Mastercam (CNC Software, Inc., InterCAM-Deutschland GmbH) [INT08] seien hier exemplarisch genannt. Basierend auf der VDI-Richtlinie 2218 [VDI2218], wird im Folgenden in diese Technologie eingeführt.

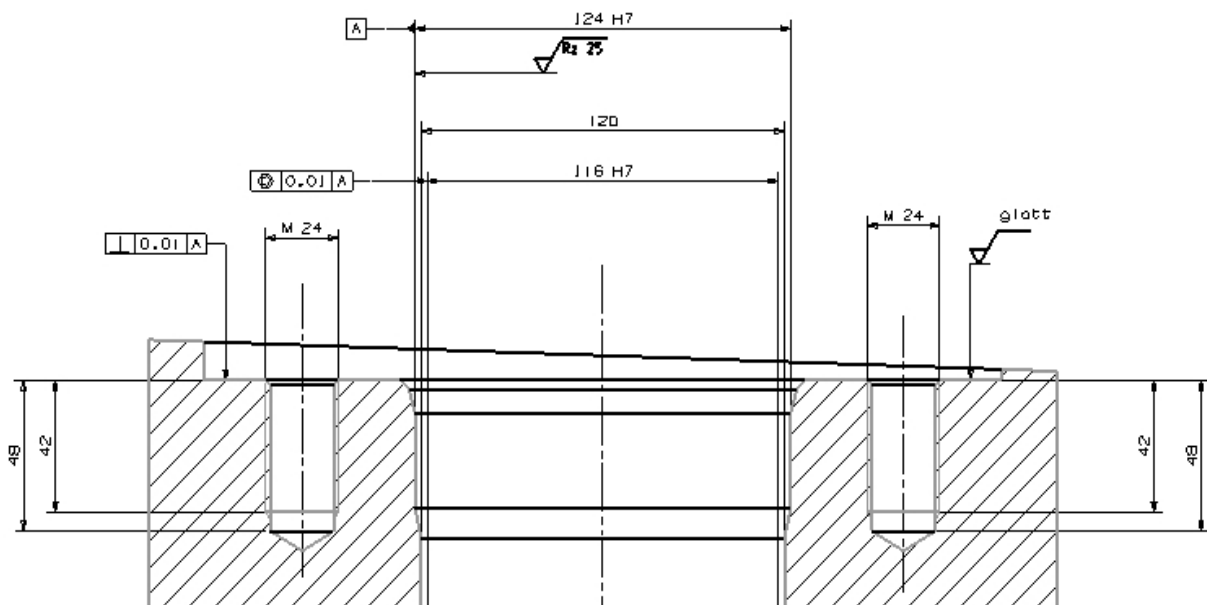
Der Begriff „Feature“ wird in der VDI-Richtlinie 2218 [VDI2218] wie folgt definiert:

*„Features sind informationstechnische Elemente, die Bereiche von besonderem (technischen) Interesse von einzelnen oder mehreren Produkten darstellen.“*

Es sei weiter erwähnt, dass Features in Verbindung mit spezifischen Sichtweisen (Kontext) – Zusammenhang von Eigenschaftsklassen zu(r) Phase(n) im Produktlebenszyklus – definiert sind und in entsprechendem Zusammenhang erst die volle Information entfalten. [BNB03] Features verstehen sich dabei als Semantikträger, die gegebenenfalls mit Geometrieelementen verknüpft sind. [HOF01]

Ein wichtiger Vorteil beim Einsatz von Features innerhalb der rechnergestützten CAx-Prozesskette ist, dass sich Entwicklungszeiten verkürzen lassen, da Concurrent und Simultaneous Engineering möglich sind. [SCH03] Zudem ist die Abstimmung, Ablage und Weiterleitung von Methoden und Informationen (z. B. Expertenwissen) innerhalb von und zwischen Phasen des Produktentwicklungsprozesses möglich, auch wenn Unterschiede in Software, Sprache, Ort oder Zeit bestehen.

Sowohl in der Forschung als auch in kommerziellen Systemen ist die Nutzung in unterschiedlicher Komplexität vertreten, dabei findet die Feature-Technologie im gesamten Produktlebenszyklus Anwendung; vertieft wird diese Thematik bei: [VDI1322], [VDI2218], [HOF01]. Als Beispiel sind in Abbildung 3 drei Bohrungen in einer Flachbohrung mit geometrischen und semantischen Informationen konstruiert worden. Die Feature-Semantik kann darüber hinaus z. B. Kosten, Fertigungsverfahren, Funktions- und Qualitätseigenschaften betreffen.



**Abbildung 3:** Zeichnungsausschnitt einer Modellzeichnung

Die Weiter- bzw. Wiederverwendung von Features wird durch mehrere Möglichkeiten eröffnet. Die Feature-Eigenschaften werden dabei nach Eigenschaftsklassen geordnet und sind über mehrere Phasen des Produktlebenszyklus gültig:

- Feature-basiertes Modellieren (englisch: Design by Feature)

- Feature-Erkennung (englisch: Feature Recognition)
- Feature-Transformation (englisch: Feature Mapping)

Die unterschiedlichen Ansätze erfordern unterschiedliche Methoden im Gesamtprozess, dies ist vor allem beim Zusammenspiel von Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Fertigung zu beachten.

Beim *Feature-basierten Modellieren* wird das Ziel verfolgt, während der Konstruktion des Bauteils alle relevanten Informationen für sämtliche darauf folgende Phasen des Produktlebenszyklus zu generieren. [FVP07] Standard-Features und benutzerdefinierte Features werden dem Konstrukteur in Bibliotheken zur Verfügung gestellt und enthalten bereits befüllte oder zu befüllende Wissensbasen. Die bestehenden Bibliotheken sind grundsätzlich begrenzt, decken meist nicht den vollen Bedarf des Konstrukteurs ab und entwickeln sich stetig weiter (z. B. durch Innovationen in der Konstruktion). Die Features werden in nachfolgenden Phasen beispielsweise anhand des Feature-Namens identifiziert, so dass geometrische Form, Semantik und teilweise spezifische Einsatzbedingungen theoretisch bekannt sind. In der praktischen Anwendung zeigt sich hingegen sehr deutlich, dass nicht alle Verwendungsgrenzen definiert werden können bzw. methodische Gebote und Verbote dem Konstrukteur in der Regel nicht vollständig präsent sind. [FVP07]

Die *Feature-Erkennung* ermöglicht es, in der Konstruktionsphase freier zu arbeiten, da die Erkennung in nachfolgenden Phasen des Produktlebenszyklus anhand geometrischer Konturen und semantischer Parameter durchgeführt wird. Die Feature-Erkennung leistet einen großen Beitrag<sup>2</sup> zu einem voll automatisierten CAPP-System [BNM08]. Um die verschiedensten Modellierungsmethodiken, die in der Konstruktion zum Einsatz kommen können, zu vereinen, gibt es unterschiedliche Ansätze der Feature-Erkennung. Die meisten Systeme nutzen das Boundary Representation Modell [BNM08], [SW07], um ein späteres Feature zu beschreiben. Die Freiheit des Konstrukteurs, eine Vielzahl an Methodiken zur Modellierung einsetzen zu können, bringt einen erhöhten Aufwand auf Seiten der Feature-Weiterverwendung. [FVP07], [PC07] Die Nachteile hierbei sind:

- Das Erkennen von spezifischen Features, wie Sonderbohrungen ist, verglichen mit der Namensidentifizierung beim Feature-basierten Modellieren, nicht so einfach möglich. Als Lösung bietet sich hier die Verwendung von Feature-Bibliotheken oder von Attributen an Kanten und Oberflächen im Konstruktionsmodell an.

---

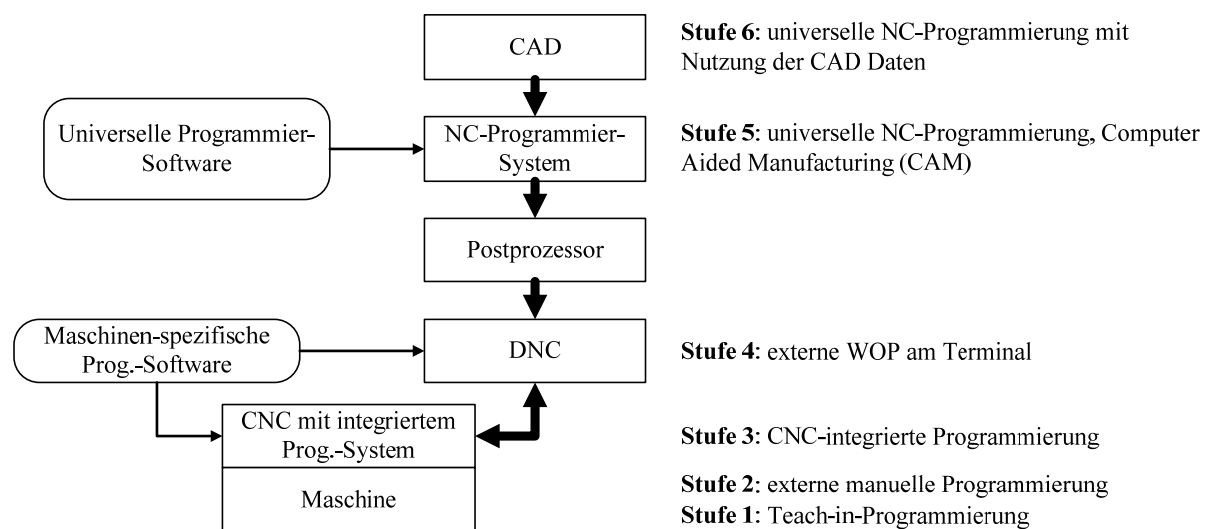
<sup>2</sup> Aus dem Englischen wurde „the greatest contribution“ [BNM08] abgeschwächt eingeführt.

- Die Komplexität des Erkennungsalgorithmus kann speziell bei grenzüberschreitenden Features<sup>3</sup> sehr hoch sein. Dies sind Features, die mit anderen Geometrien zusammen keine eindeutige Kontur ergeben (beispielsweise aufgrund von Schnitten). Als Folge kann entweder die Rechenzeiten hoch oder die Erkennungsqualität niedrig sein.

Bei der *Feature-Transformation* wird eine Modellierung von Features vorausgesetzt. Die Eigenschaften des vorhandenen Features werden unter Hinzunahme oder durch Weglassen von Informationen von einer Eigenschaftsklasse in eine andere überführt. Im Gegensatz zur Feature-Erkennung ist das Auffinden einer Struktur einfacher, da die Möglichkeiten durch den definierten Feature-Pool bei der Modellierung von vornherein eingeschränkt werden. [AP03], [FVP07], [VDI2218]

### 2.1.3 Stand der Fertigungsplanung, im Speziellen der NC-Programmierung

Die Fertigungsplanung stellt ein Schlüsselement in einem Produktentwicklungsprozess dar. Die NC-Programmierung ist dabei eine spezielle Form der Fertigungsplanung für ein bestimmtes Erzeugnis. [BIN03] Sie bildet das Verbindungselement zwischen der Konstruktion und der Fertigung und beinhaltet Auswahl sowie Reihenfolgenplanung von Fertigungsprozessen und Operationen zur Überführung eines Rohteils in das Fertigteil. Diese Aufgabe setzt eine optimale Organisation und Gestaltung der Fertigungsprozesse voraus. Hierbei müssen Forderungen von Kunden nach zunehmend individualisierten Produkten in der Produktionsstruktur berücksichtigt werden, auch über Unternehmensgrenzen hinweg. [BSM06] Hierdurch entsteht oftmals ein iterativer Prozess, da Kompromisse von Konstruktion und Fertigung sowie kurzfristige Änderungen eingebracht werden müssen.



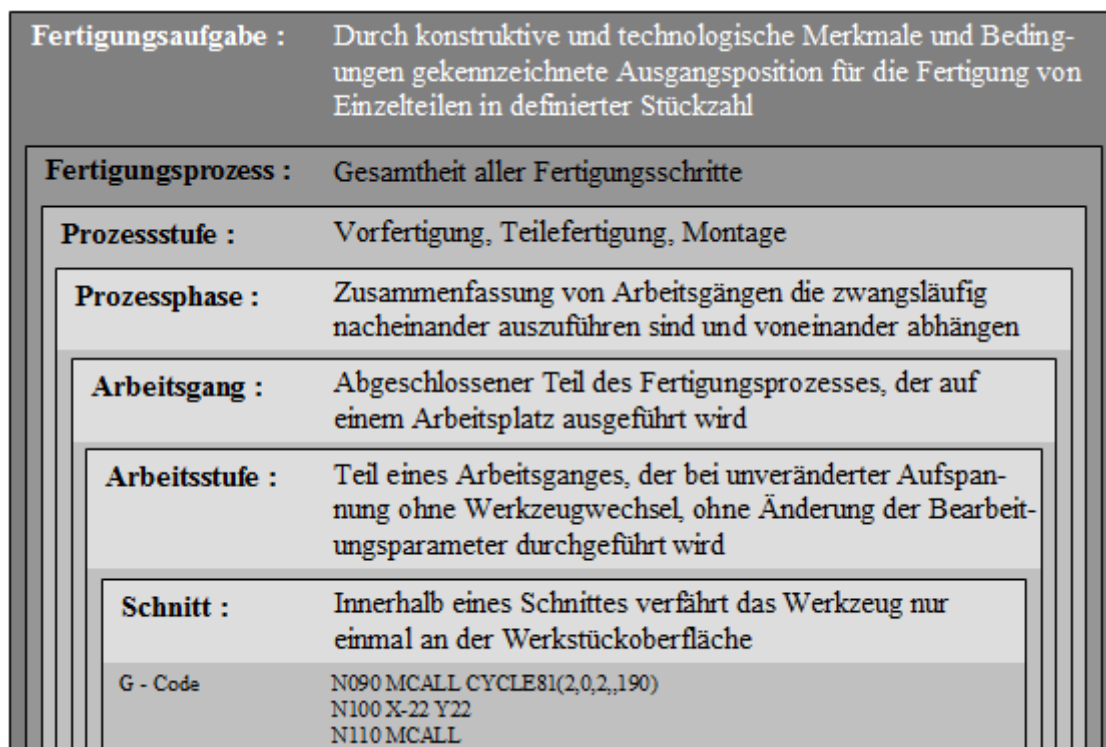
**Abbildung 4:** Möglichkeiten der NC-Programmierung, ein 6-Stufen-Konzept [KR07].

<sup>3</sup> Im Englischen: Intersection Features

Bei der NC-Programmierung können verschiedene Strategien zur Nutzung einer CNC-Maschine verwendet werden, siehe Abbildung 4. Es wird zwischen sechs Stufen unterschieden, der Teach-in-Programmierung, der externen manuellen NC-Programmierung, der CNC-integrierten Programmierung, der externen werkstatorientierten Programmierung (WOP) am Terminal, der universellen NC-Programmierung und der universellen NC-Programmierung mit Nutzung der CAD-Daten.

Für diese Arbeit, bei der über eine direkte (integrierte und universelle Systeme) oder schnittstellenbasierte Kopplung (Hybridsysteme) CAD-Daten assoziativ weiter verwendet werden sollen, muss die Stufe 6 notwendigerweise angewendet werden.

Bei Anwendung der Stufe 6, ebenso wäre dies bei Stufe 5 notwendig, ist zur Steuerung einer CNC-Werkzeugmaschine ein extern erzeugtes maschinenspezifisches Programm erforderlich, das alle notwendigen Fertigungsinformationen enthält. Hierzu wird der nach DIN 66025 genormte NC-Programmcode, der so genannte G-Code, verwendet. [KR07]. Der NC-Code wird aus dem maschinenunabhängigen CAM-Systemoutput im neutralen Automatical Programmed Tool (APT)-Format, durch den Postprozessor maschinenspezifisch erzeugt. Das erzeugte NC-Programm enthält schrittweise alle Informationen in der tatsächlichen Fertigungsreihenfolge zur Bewegung aller Maschinenachsen und zur Betätigung der Schaltfunktionen. Durch die NC-Programmierung werden Reihenfolge der Zerspanung, Einsatz der Werkzeuge und die Auswahl der Bearbeitungsparameter festgelegt. [FVP07], [HHE05], [KR07]



**Abbildung 5:** Zerlegung der Fertigungsaufgabe (Details aus: [WIT06] [SCA03])

Abbildung 5 stellt die Zerlegung der Fertigungsaufgabe nach Witt [WIT06] und Scallan [SCA03] während der NC-Programmierung dar. Diese wird bis hin zum Schnitt eines Werkzeuges am Werkstück zerteilt, jede Stufe der Zerlegung kann bei einer Fertigungsaufgabe mehrfach durchlaufen werden. Die Fertigungsaufgabe zergliedert sich somit jeweils in einen oder mehrere Fertigungsprozess(e), jeder Fertigungsprozess wird in eine oder mehrere Prozessstufe(n) zerlegt; jede Prozessstufe dann in eine oder mehrere Prozessphase(n), usw.

Während der NC-Programmierung müssen dabei folgende Aufgaben manuell oder automatisiert durchgeführt werden [BAN08], [GF07], [HAL03], [SCA03], [WIT06]:

- Interpretation der Fertigungsaufgabe anhand von Zeichnungen und/oder des Modells. Einfluss auf die Planung haben dabei u.a. die Hauptdimensionen, die Allgmeintoleranzen, das Material, das Rohteil (Abmaße, Beschaffenheit, Gewicht, ...), die Stückzahl, die Stückliste und weitere Details (Form, Lage, Toleranz, Oberfläche, ...)
- Auswahl von Fertigungsmaschinen, Suche von Werkzeugen mit den dazugehörigen Fertigungsoperationen, Planung der Aufspannungsreihenfolge, Auswahl und Einsatz von Spannmitteln und Organisation der Fertigungsreihenfolge des Bauteils
- Bestimmung der Arbeitsgang- und Arbeitsstufenfolgen aller Fertigungsoperationen inklusive der Gruppierung von gleichen Strukturen, Festlegen der Inhalte der Fertigungsoperationen, zusätzlicher Steuerungsbefehle und der Schnittdaten
- Werkzeugwegberechnung, Simulation und Optimierung
- Berechnung und Beachtung der Kosten für Planung, Fertigungshaupt- und -nebenzeiten
- Erstellen von NC-Programmen, Aufspannplänen, Werkzeuglisten, Arbeitsplänen

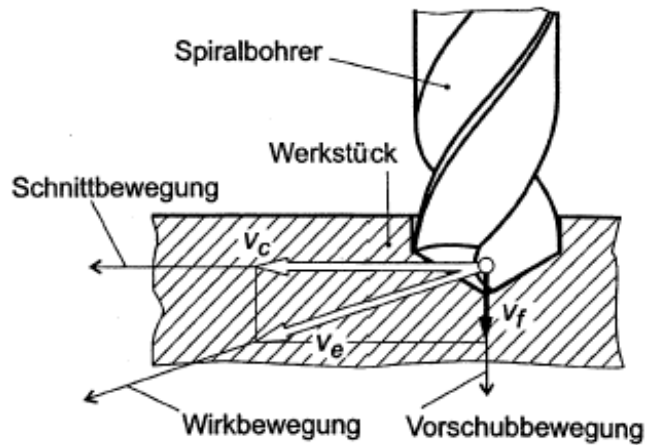
## 2.2 Die Fertigungstechnologie des Bohrens und Fräsens

Um eine NC-Programmierung durchführen zu können, ist fertigungstechnologisches Wissen erforderlich. Im Bereich der trennenden Fertigungsverfahren mit bestimmter Schneide finden sich die Hauptverfahren Drehen, Fräsen und Bohren. Im Folgenden wird vornehmlich nur das Bohren und in Teilbereichen das Fräsen weiter betrachtet.

### Fertigungstechnologie: Bohren

Bohren ist ein spanendes Fertigungsverfahren mit drehender Spindelbewegung (Hauptbewegung), welches in Abbildung 6 skizziert dargestellt ist. Das Werkzeug führt eine Vorschubbewegung in Richtung der Drehachse aus. Durch die Vorschubkraft dringt die Werkzeugschneide in den Werkstoff ein. Die Schnittkraft wird durch die kreisförmige Schnittbewegung erzeugt. Der Vorschub hängt vor allem vom Bohrerdurchmesser und dem genauen Bohrver-

fahren ab, die Schnittgeschwindigkeit ist im Wesentlichen vom Schneidstoff des Bohrers und dem zu bearbeitenden Werkstoff abhängig. Beim Bohrvorgang entsteht Wärme, die durch das Werkzeug, die Späne und eventuell das zuzuführende Kühlmittel abgeführt wird.



Das Bohren ins Volle mit einem meist zweischneidigen Werkzeug stellt eine Schrumpferspannung dar, die weder eine gute Oberfläche noch eine gute Maßhaltigkeit aufweist. Tabelle 1 gibt ein Überblick über weitere Bohrverfahren. Details finden sich hierzu bei: [DIN8589], [FS08], [GF07], [HHE05], [KK02], [RIS06], [SCH97], [WIT06].

**Abbildung 6:** Bohren - Richtung der Schnitt-, Vorschub- und Wirkbewegung [WIT06]

Bohrverfahren	Untergruppen zum Bohrverfahren
Plansenken	Planansenzen, Planeinsenzen
Rundbohren	Bohren ins Volle, Kernbohren, Aufbohren, (Rund-)Reiben
Schraubbohren	Gewinde bohren, Gewinde furchen
Profilbohren	Profilbohren ins Volle, Profilaufbohren, Profilsenzen, Profilreiben
Formbohren	Unrundbohren
Spindeln	
Messschnitt	
Rückwärtssenzen	

**Tabelle 1:** Überblick über unterschiedliche Bohrverfahren

Die aufgelisteten Strategien stehen unter dem Einfluss diverser Randparameter und variieren in Abhängigkeit des Eingriffs, der verwendeten Maschine, der Werkzeugkomponenten (Aufnahme, Kühlmöglichkeiten, Futtertyp), der Steuerung und der nutzbaren Zyklen sowie der jeweiligen Zyklenparameter (mit/ohne Verweilzeit, Spanbruch, Entspänen und die Spindel-drehrichtungsumkehr).

Um den optimalen Fertigungsprozess zu erhalten, muss der NC-Programmierer alle Alternativen, deren Bedingungen und Parameter berücksichtigen. Bei fertigungstechnisch gleichberechtigten Alternativen ist auf Basis der Kosten und Fertigungszeiten eine Gewichtung durch den Planer vorzunehmen. Dies ist aufgrund eines enormen Zeitaufwandes praktisch nicht um-

setzbar; daher ist der Fertigungsplanungsprozess teilweise intuitiv geprägt. [HAL03] Ein Expertensystem kann bei der Problemlösung die komplexesten Bereiche übernehmen und dadurch die Lösungsfindung optimieren. [BHS07] Ein Beispiel nach Halevi zeigt die Alternativenvielfalt anhand einer statistischen Erhebung, siehe Tabelle 2 [HAL03]: Gefertigt werden soll eine Bohrung mit den folgenden Eigenschaften: Durchmesser: 30mm, Tiefe: 30mm, Durchmessertoleranz:  $\pm 0.15\text{mm}$ , Oberflächengüte:  $7.5\mu\text{m Ra}$ . 37 Experten gaben hierzu Fertigungsempfehlungen ab, die alle technologisch durchführbar sind.

Operation(-en)	Experten	Fertigungszeit [min]
Bohren $\varnothing 30$	9	0.13 – 0.58
Bohren $\varnothing 28$ , Spindeln $\varnothing 30$	9	0.22 – 0.65
Bohren $\varnothing 20$ , Bohren $\varnothing 30$	7	0.49 – 0.84
Bohren $\varnothing 15$ , Bohren $\varnothing 30$	1	0.81
Bohren $\varnothing 10$ , Bohren $\varnothing 30$	2	0.78
Bohren $\varnothing 5$ , Bohren $\varnothing 30$	1	0.81
Bohren $\varnothing 8$ , Bohren $\varnothing 28$ , Spindeln $\varnothing 30$	1	0.86
Bohren $\varnothing 8$ , Bohren $\varnothing 18$ , Spindeln $\varnothing 30$	1	0.77
Bohren $\varnothing 10$ , Bohren $\varnothing 20$ , Bohren $\varnothing 30$	2	1.04
Bohren $\varnothing 10$ , Bohren $\varnothing 28.7$ , Reiben $\varnothing 30$	1	1.07
Bohren $\varnothing 10$ , Bohren $\varnothing 20$ , Bohren $\varnothing 28$ , Spindeln $\varnothing 30$	2	1.13
Bohren $\varnothing 5$ , Bohren $\varnothing 13$ , Bohren $\varnothing 22$ , Bohren $\varnothing 30$	1	1.29

**Tabelle 2:** Vergleich von Expertenmeinungen beim Bohren [HAL03]

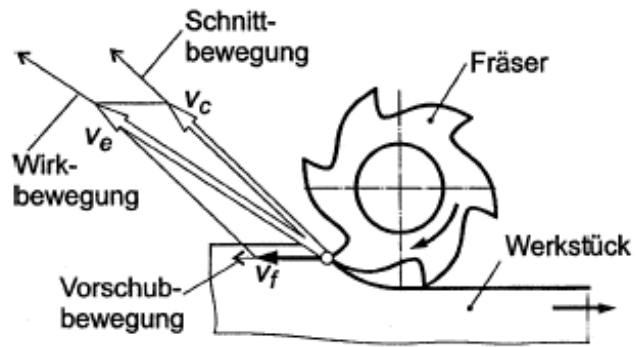
Dieses einfache Bohrungs-Beispiel zeigt die Vielfalt der fertigungstechnologischen Alternativen, bei komplexen Geometrien und Bohrprozessen steigen die kombinatorischen Möglichkeiten überproportional an.

### Fertigungstechnologie: Fräsen

Zylindrische Innenkonturen werden hauptsächlich *gebohrt*, hinzu kommen die Fertigungsvorgänge Fasen, Kanten brechen, Gewinde fertigen, Passungen fertigen und Oberflächenrauheiten fertigen. In vielen Fällen sollten oder müssen diese Konturen jedoch *gefräst* werden, entweder aus technologischer oder aus wirtschaftlicher Notwendigkeit. Diese Technologie wird daher im weiteren Verlauf der Arbeit stets mit betrachtet werden.



Fräsen ist ein spanabhebendes Bearbeitungsverfahren mit rotierendem Werkzeug. Die Schneiden erzeugen durch Drehung um die Werkzeugmittelachse die Schnittbewegung und sind im Gegensatz zum Bohren nicht ständig im Eingriff. Die Vorschubbewegungen können in verschiedenen Richtungen erfolgen. [PAU96]



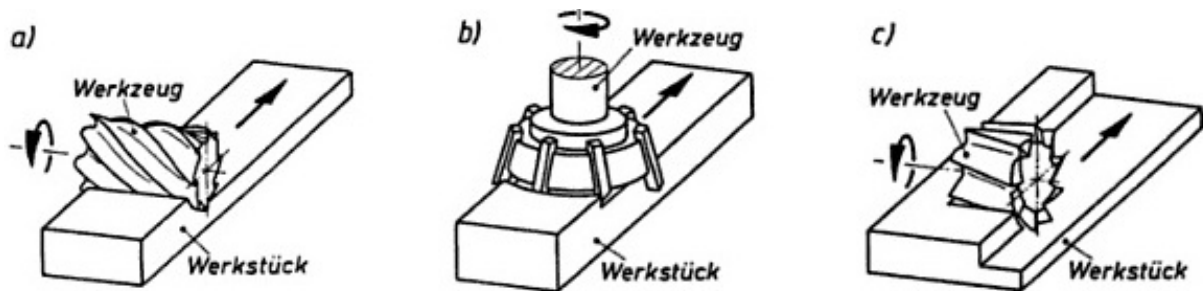
**beim Gegenlauffräsen**

**Abbildung 7:** Schematische Darstellung des GegenlauffräSENS [WIT06]

Abbildung 7 zeigt das Fräsen im Gegenlauf, der Vorschub der

Werkzeugschneide und die Bewegung des Werkstücks sind hierbei gegenläufig. Als weitere Möglichkeit ist das Fräsen im Gleichlauf möglich.

Die DIN 8589 unterscheidet in Teil 3 die Grundarten: Umfangsfräsen, Stirnfräsen und Stirnumfangsfräsen. [DIN8589] (Vgl. Abbildung 8)



**Bild D 1** Die drei Grundarten des FräSENS nach DIN 8589

a) Umfangsfräsen    b) Stirnfräsen    c) Stirnumfangsfräsen

**Abbildung 8:** Die drei Grundarten beim FräSENS nach DIN 8589-3 [DIN8589]

Die in Tabelle 3 aufgelisteten Grundarten des FräSENS können zum Fertigen von Bohrungen und zylindrischen Geometrien angewandt werden, Beispiele sind hierzu aufgeführt. Auf diese Operationen haben zusätzlich Randparameter, wie beim Bohren bereits erwähnt, Einfluss.

FräSENSverfahren	Anwendungsbeispiel bei Bohrbearbeitungen
(Innen-)Rundfräsen	Durchgangsbohrung fräsen
Planfräsen	Planfräsen eines Kreistaschengrundes
Schraubfräsen	Gewindefräsen
Profilfräsen	Fase oder Kantenbruch fräsen

**Tabelle 3:** FräSENSverfahren mit denen Bohrungen (teil-)gefertigt werden können

## 2.3 Stand der automatisierten NC-Programmierung

Die Automatisierung der NC-Programmierung reicht bis in die 70er-Jahre des 20. Jahrhunderts zurück. Anfangs wurden sich wiederholende Strukturen durch Vorlagen ersetzt, später wurden Parameter eingeführt, Makros aufgenommen und wissensbasierte Systeme entwickelt. Die NC-Programmierung wurde in vielen Systemen für eine spanende Bearbeitung automatisiert, insbesondere für das Bohren. Dies liegt an den immer gleichen Regeln und wiederkehrenden Strukturen, die sich bei unterschiedlichen Fertigungsteilen ergeben. Ein grundsätzliches Ziel im industriellen Umfeld ist die Kostenminimierung, z. B. durch reduzierten Arbeitsaufwand. Dies kann erreicht werden, indem einmal getätigte Arbeiten nicht erneut verrichtet werden müssen. Wird nun ein einziger Randparameter nur geringfügig verändert, so bedingt dies etwas anderer Prozessabläufe oder Prozessparameter. Werden diese möglichen Änderungen eines Randparameters mit denen aller anderen Randparameter kombiniert, inklusive Ihrer Bedingungen und Auswirkungen auf den Prozess, so ergibt sich ein Regelwerk. Wird dieses Regelwerk einem Computer derart mitgeteilt, dass er Entscheidungen basierend auf dem Regelwerk selbstständig treffen kann, so ist das NC-Programmieren automatisiert.

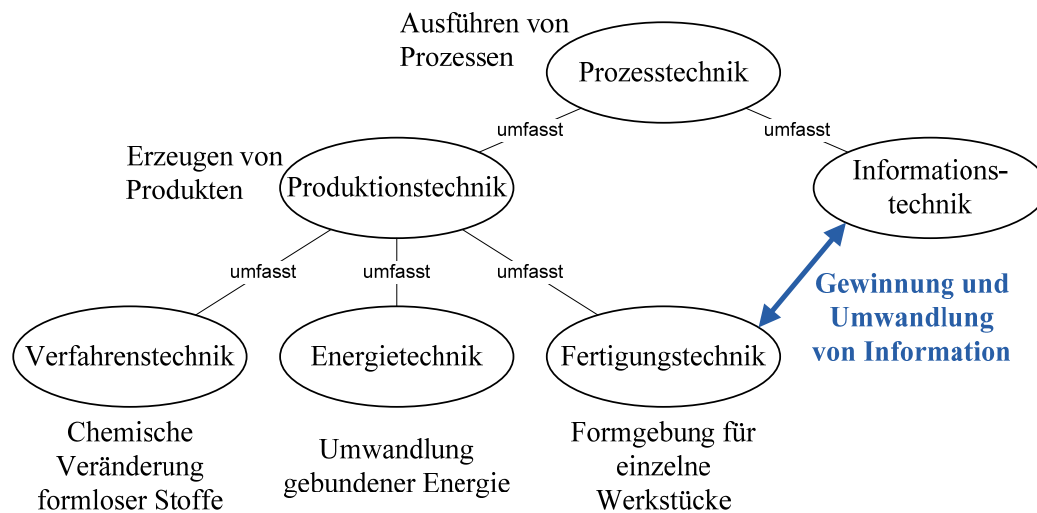
Im Verlauf dieses Kapitels werden bestehende NC-Automatisierungen von Bohr-Features und der im engen Zusammenhang stehende Automatisierungsgrad analysiert. Vor allem die komplexen Systeme mit umfangreichen Regelwerken stehen im Fokus dieser Arbeit.

Fräsen und Drehen unterscheiden sich bei der NC-Automatisierung vom Bohren. Das Regelwerk wird erheblich mehr von konstruierten Konturen beeinflusst als es beim Bohren der Fall ist. Die eindeutige automatisierte Erkennung und Parametrierung dieser Geometrien ist deutlich schwieriger, ebenso wie die Regeldefinition für eine NC-Automatisierung.

### 2.3.1 Grundlagen des automatisierten NC-Programmierprozesses

Nach DIN 19233 bedeutet Automatisieren das Ausrüsten einer Einrichtung, so dass sie ohne Mitwirkung vom Menschen bestimmungsgemäß arbeitet. [DIN19233] Unter einem Prozess wird die Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System verstanden. Innerhalb des Prozesses wird Materie, Energie oder Information umgeformt, transportiert oder gespeichert. [DIN19222]. Die Prozesstechnik befasst sich mit der Durchführung solcher Vorgänge. [LAN04]

Die Automatisierung von Fertigungsprozessen erfordert somit interdisziplinäres Zusammenwirken, das in Abbildung 9 als bidirektionaler Wissenstransport [KK06] zwischen Teilgebieten der Prozesstechnik nach Schöne [LAN04] dargestellt ist. Erweitert wurde die Grafik im Rahmen dieser Arbeit mit einem interdisziplinären Informationsaustausch für eine Automatisierung des NC-Programmierprozesses.



**Abbildung 9:** Teilgebiete der Prozesstechnik nach Schöne [LAN04].

Ziel einer Automatisierung ist es, Prozesse und Aufgaben, die automatisierungsfähig sind, ohne menschliche Einflüsse ablaufen zu lassen. Hierzu gehören Prozesse und Aufgaben [SCH99]:

- Die nicht von Menschen ausgeführt werden sollen.
- Die besser, schneller, präziser oder kostengünstiger von Maschinen ausgeführt werden.
- Die so häufig, ähnlich oder identisch sind, dass sie effizienter von Maschinen ausgeführt werden können.

Die Fertigungsplanung von Bohr- und einigen Fräsprozessen mit den zahllosen fertigungstechnologischen Varianten, Regeln und Ausnahmen eignet sich sehr gut für eine Automatisierung, da eine grundsätzliche Ähnlichkeit bei den meisten Fertigungsprozessschritten – wie im Kapitel zur Fertigungstechnologie dargestellt – festgestellt werden kann.

### Der Automatisierungsgrad

„Den Anteil der automatisierten Funktionen an der Gesamtfunktion einer Anlage bzw. Software nennt man *Automatisierungsgrad*“ [DIN19233]. Der Automatisierungsgrad kann damit zwischen 0 % (vollständig manuell) und 100 % (vollautomatisiert) liegen, Zwischenstufen als Teilautomatisierung sind beliebig möglich. Unter einer vollautomatisierten NC-Programmierung von Bohrungen wird die vollständig automatisierte NC-Programmierung eines Teils mit all seinen Bohrungen verstanden. Es sind keinerlei manuelle Tätigkeiten bei der NC-Programmierung, sei es bei der Gruppierung, der Operationserzeugung, der Parameterbefüllung, der Werkzeugauswahl oder der Optimierung notwendig. Ziel der Vollautomatisierung sollte es dabei sein, nicht nur eine fertigungstechnisch *richtige* Lösung zu finden, son-

dern vor allem eine *optimale* Lösung, mit Blick auf die Gesamtwirtschaftlichkeit der CAD/CAM/PP/Fertigungs-Prozesskette.

### 2.3.2 Untersuchung des Automatisierungsbedarfes der NC-Programmierung

Auf dem freien Markt ist der Bedarf (Automatisierungsbedarf) durch das Angebot (Automatisierungsfähigkeit) und den Preis (Kosten-Nutzen-Verhältnis einer Automatisierung / eines Automatisierungsgrades) geregelt. Der Bedarf unterliegt einigen Rahmenbedingungen, wie Einsatzland, Lohnkostenniveau und technologischen Möglichkeiten. Hinzu kommen moralischen Restriktionen – wie gesellschaftliche Verantwortung als Grund gegen eine Automatisierung bzw. Gründe für eine Automatisierung wie gefährliche oder schädigende Umgebung –, Routinetätigkeiten – die z. B. Flüchtigkeitsfehler hervorrufen –, unzugängliche und abgelegene Orte und Wettbewerbsfähigkeit. [KK06], [SAR00]

Dieses Kapitel untersucht zunächst das Angebot und den Bedarf für eine Automatisierung der NC-Programmierung, in Kapitel 3.2 folgt der Faktor Preis der Automatisierung: Für das Regelwerk einer Automatisierung hat jedes Unternehmen und jeder Anwender eigene Vorstellungen über die richtige Strategie, die Alternativen und deren Priorität. Die Herausforderungen wachsen insbesondere bei Unikaten, variantenreichen Produkten, bei vielen verschiedenen Werkzeugen, Maschinen, Werkstoffen oder Schneidstoffen an. Die angewandten Fertigungstechnologien unterscheiden sich oft und es wird nahezu unmöglich, die Übersicht im Hinblick auf die Fertigungsmöglichkeiten und die optimale Wirtschaftlichkeit zu behalten. Je mehr Informationen dank IT – theoretisch – zugänglich sind, desto schwieriger wird es, wichtige Informationen zu finden. [LM06] Speziell für die NC-Programmierung sind daher sichere und zuverlässige Prozesse von großer Bedeutung, um stets die besten Antworten auf die sich verändernden Bedingungen bieten zu können. Flexibilität ist stets gefordert, unter anderem, um die Wettbewerbsfähigkeit erhalten und ausbauen zu können. Innerhalb eines manuellen Prozesses kann dabei schnell die menschliche Leistungsgrenze erreicht werden, weil der schnelle analytische Überblick über eine Vielzahl von Kriterien – die sich teils oft, teils selten ändern – kaum möglich ist. [WP07]

Das Bohren bietet zusätzliche Herausforderungen beim NC-Programmieren und Simulieren: Bohren erscheint auf den ersten Blick sehr einfach, es existieren jedoch eine große Anzahl von Werkzeugen und alternativen Fertigungsstrategien, die Kosten und Fertigungszeiten stark beeinflussen. [GF07] Die Maschinensimulation des Bohrens ist schwierig, da aufgrund der axialen Fertigungsrichtung die stirnseitige Hauptschneide kontinuierlich im vollen Eingriff ist und für die visuelle Überprüfung durch den Schaft verdeckt wird. Zudem sind Schnittparameter und Teile von Bohrzyklen, wie z. B. Verweilzeiten und Reversieren in einer Simulation

kaum darstellbar. Die Kollisions- und Fertigungsprozesssicherheit kann durch den geringen Überblick nur eingeschränkt bestätigt werden oder würde sehr viel Zeit erfordern. Der Anwender muss sich daher auf die automatisierten Kontrollmechanismen der Software verlassen. Genau hier bildet die Automatisierung der NC-Programmierung für komplexe Bohr-Features eine gute Möglichkeit, diese vielen manuellen Aufgaben direkt bei der Parameterbefüllung zu übernehmen. Integrierte Konzepte zur Unterstützung von manuellen Tätigkeiten verbessern zusätzlich die Qualität des NC-Programms.

Als Ergebnis zur Untersuchung von Angebot und Bedarf lässt sich zusammenfassend feststellen, dass sowohl genügend Angebot als auch Bedarf bestehen.

### 2.3.3 Ansätze der Wissensintegration bei der Fertigungsplanung

Die Fertigungsplanung kann durch unterschiedliche Technologien automatisiert werden. Wissen wird dabei über verschiedene Wege im CAM-System integriert und durch Softwareprozesse in konkrete Situationen eingebracht. Die Grenze zwischen Unterstützung der manuellen Arbeit und einer tatsächlichen Automatisierung ist jedoch fließend. Die wichtigsten Strategien werden an dieser Stelle kurz vorgestellt – eine Kombination der einzelnen ist möglich:

**Vorlageoperationen** werden für konkrete Situationen vorbereitet oder nach der ersten Anwendung als Vorlage gespeichert. Es bildet sich eine Bibliothek von Operationen, aus denen zu konkreten geometrischen Fällen Operationen ausgewählt und wiederverwendet werden können. Mit den Vorlageoperationen können weitere Prozessparameter verknüpft sein, wie beispielsweise Werkzeuge oder Zyklen.

Vor- und Nachteile: Konkrete Fertigungsfälle müssen stets vorgedacht werden und falls neue hinzu kommen, so müssen diese als neue Vorlagen zusätzlich aufgenommen werden. Es besteht die Möglichkeit, dass zu individuelle oder sich wiederholende Vorlagen aufgebaut werden. Das komfortable Wiederfinden von Vorlageoperationen ist stark von der Anzahl der Operationen abhängig. Nicht mehr benötigte Vorlagen werden nicht zwangsläufig aussortiert; es entsteht eine stetig wachsende Bibliothek. Grundsätzliche Veränderungen müssen redundant eingearbeitet werden, wenn beispielsweise ein Werkzeug ausgesondert wird, muss dies in jeder Vorlage nachgearbeitet werden. Diese Automatisierungsstrategie eignet sich besonders für konkrete Automatisierungsprojekte und solche von geringem Umfang. Sie dient zur Unterstützung der manuellen Arbeit und kann gezielt wiederkehrende Routinetätigkeiten erleichtern.

**Operationsfolgen** werden aus Vorlageoperationen kombiniert und können so spezifische Operationsfolgen oder teilespezifische Lösungen vorgeben. Dies kann soweit weitergeführt

werden, dass gesamte Gruppen von Geometrien mit vielen Operationen vorgedacht abgearbeitet werden können.

Vor- und Nachteile ergeben sich hierbei wie bei den Vorlageoperationen. Durch die Gruppierung der Vorlageoperationen besteht jedoch eine bessere Übersicht. Andererseits besteht bei der Gruppierung eine größere Gefahr, dass in mehreren Gruppen wiederholt ähnliche Vorlageoperationen vorkommen, die redundanten Entwicklungsaufwand und Administration erfordern.

**Makros** beinhalten eine genau definierte Folge von Befehlen, Mausklicks und Tastatureingaben und ermöglichen durch abspielen der Folge eine Automatisierung.

Vor- und Nachteile: Makros können beim Automatisieren der NC-Programmierung nur gezielt eingesetzt werden, um routinemäßige Eingaben durchführen zu lassen. Die fehlende Flexibilität setzt dem Automatisierungsgrad dabei starke Grenzen. Makros sind relativ intransparent und fehleranfällig, bezüglich einprogrammierter Funktionen, da lediglich beschreibende Möglichkeiten zur Verfügung stehen. Komplexe oder vielfältige Aufgaben sind daher schwierig in Makrobibliotheken abbildbar und wieder auffindbar.

**Konfiguratoren** können gezielt Vorlagenoperationen nach Eingaben auswählen und diese in definierte Reihenfolgen setzen. Die Auswahlregeln können dabei so ausgefeilt sein, dass ein ganzer Pool an Geometriefragmenten automatisiert werden kann.

Vor- und Nachteile: Mit dieser Methode müssen die vorkommenden Geometrien immer noch bekannt sein, allerdings ist die Flexibilität größer. Dennoch müssen auftretende Situationen vorgedacht werden.

**Ablegen von fertigungstechnologisch relevantem Wissen in der Konstruktion:** Durch eine fertigungsgerechte Konstruktion kann eine automatisierte NC-Programmierung gefördert oder ermöglicht werden. Hierzu bestehen mehrere Möglichkeiten:

- Wissen, das den konkreten Fertigungsprozess betrifft, wird direkt im Modell bzw. Feature abgelegt. Eine Bohrung erhält z. B. die volle Fertigungsfolge einbeschrieben inklusive der notwendigen Werkzeuge und Operationsparameter.
- Wissen zu Fertigungsstufen wird in Modellschritten abgebildet. Eine Bohrung kann z. B. in Stufen zerlegt werden oder die Fertigungsreihenfolge von Bohrabschnitten in mehreren Bauteilen abgebildet werden. Durch diese Maßnahme wird der Aufwand für die Fertigungsplanung reduziert, da der Fertigungsprozess bereits vorgeplant ist.
- Wissen wird nicht direkt, sondern indirekt über Marker im Modell bzw. Feature abgelegt. Eine Bohrung erhält z. B. einen Kenner zur Oberflächengüte oder für einen bestimmten

Fertigungsprozess. Wie tatsächlich gefertigt wird, legt aber erst das Regelwerk in der NC-Programmierung fest.

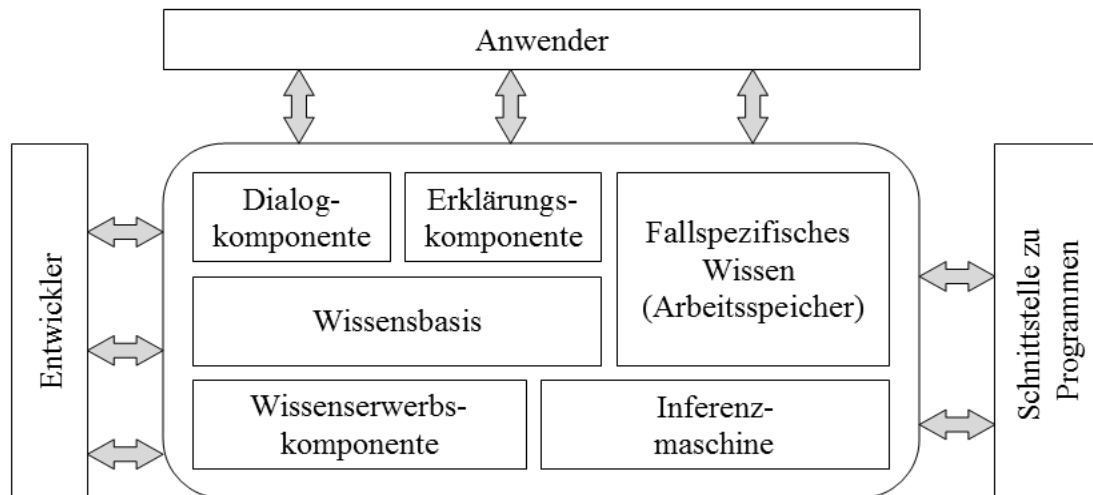
Vor- und Nachteile: Grundsätzlich ist es sinnvoll, eine automatisierte NC-Programmierung zu unterstützen; um die Flexibilität jedoch nicht zu sehr einzuschränken, sollten keine festen Wissensinformationen, wie in Punkt 1 und 2 vorgestellt, in die Konstruktion eingebracht werden. Wird der vorgedachte Weg verlassen, sei es wegen einer einmaligen oder einer dauerhaften Veränderung, so ist die Prozesskette unterbrochen. Aufwändige manuelle Eingriffe werden in der Konstruktion und/oder Fertigungsplanung erforderlich.

Marker, wie in Punkt 3 können dies eingeschränkt umgehen, da das Feature gleich bleibt, aber der Effekt auf den Fertigungsprozess verändert werden kann. Umfangreiche Prozessveränderungen können diese Marker jedoch auch nicht leisten.

Die **Künstliche Intelligenz** (KI) als Informatikdisziplin strebt nach intelligenteren Computersystemen. Sie zielt darauf ab Software mit Problemlösungsfähigkeiten zu entwickeln, als Ergänzung der natürlichen Intelligenz; dabei spielt es keine Rolle, ob dies nach den Mechanismen der natürlichen Intelligenz erreicht wird. Ein Arbeitsgebiet der KI sind **wissensbasierte Systeme**, wie z. B. **Expertensysteme** (XPS). Expertensysteme sind spezielle wissensbasierte Systeme zur Lösung eines klar definierten Problemkreises, bei denen das Wissen von Experten<sup>4</sup> stammt; dabei ist die Herkunft der Wissensbasis entscheidend. Ein XPS ist ein Computerprogramm, das Wissen, Regeln, Methoden und/oder Vorgehensweisen eines begrenzten technischen Bereiches verarbeitet, mit dem Ziel, hieraus Entscheidungen und/oder Problemlösungen zu finden. [KR07], [LAN04] Ein XPS soll einen menschlichen Experten nicht vollständig ersetzen, sondern diesen unterstützen und entlasten. [LEH08] Die eigentliche Leistung des regelbasierten Systems zeigt sich in seiner Fähigkeit, komplexe Informationen durch die Verkettung von Regeln zu verarbeiten. Die Inferenzmaschine des XPS kann dabei auf unterschiedlichen Verarbeitungstechniken basieren, eine Möglichkeit ist die Aussagenlogik. [BK06], [SD07] Expertensysteme lassen sich wie folgt klassifizieren: Diagnose-, Beratungs-, Vorhersage-, Planungs- und Ausbildungssysteme. [VWS94], [ZOE07]

---

<sup>4</sup> Als Experte wird eine Person bezeichnet, die über ein bestimmtes Themengebiet mehr Wissen besitzt als die Mehrzahl aller anderen Menschen. [ZOE07]



**Abbildung 10:** XPS-Struktur [BK06]

Wie in Abbildung 10 dargestellt, besteht der XPS-Kern aus der Wissensbasis, der Inferenzmaschine und weiteren Software-Modulen. Die Inferenzmaschine (auch Wissensinterpretier oder Schlussfolgerungsmaschine) ist stets getrennt von der Wissensbasis [WTW02], [BK06], [SOM95], [JON92] und besitzt folgende Funktionen:

- Eingabe von Benutzeranfragen und der aktuellen Randbedingungen für die Aufgabenlösung
- Erstellung der Problemlösung durch das Zusammenwirken mit der Wissensbasis
- Erklärung des Ablaufs der Aufgabenlösung für den Benutzer

Das XPS besitzt außerdem einen Arbeitsspeicher, Schnittstellen zur Kommunikation mit der Umgebung (Anwender, andere Programme) und eine Wissenserwerbskomponente. [BK06], [LAN04], [HGJ07], [ZOE07]

Vor- und Nachteile: Anhand von Expertensystemen kann computerunterstützt, repetierbar, verglichen mit einem Experten schneller und unter Beachtung *aller* benannten Randbedingungen nach Lösungen komplexer Probleme gesucht werden. Verglichen mit einem Menschen ist es zudem parallel mehrfach nutzbar und es ist unabhängig von Häufigkeit, Ort und Zeit stets verfügbar. Nachteil ist, dass der Aufbau der IT, Daten- und Wissensstruktur anfangs, verglichen mit dem Verpflichten eines Experten, deutlich umfangreicher ist. Ein Expertensystem kann bei häufiger und langfristiger Nutzung jedoch günstiger sein.

### 2.3.4 Stand der Forschung zu wissensbasierten Fertigungsplanungssystemen

Eine auf einem Expertensystem basierende automatisierte NC-Programmierung oder Fertigungsplanung – Diese Arbeit konzentriert sich im speziellen auf Expertensysteme, daher wird im Folgenden nur der Stand der wissenschaftlichen Forschung bei diesem Automatisierungs-



typ dargestellt – lässt sich in zwei grundsätzliche Verfahren untergliedern: Variantenorientiert und generativ. Im variantenorientierten System werden die Fertigungsdokumente von einer oder mehreren Standard- oder Typenvorlagen abgeleitet. Sie sind wie Vorlageoperationen und Operationsfolgen zu bewerten. Im generativen Verfahren werden alle Dokumente stets neu erzeugt. [HAL03], [KK06] In dieser Arbeit werden nur die generativen Verfahren weiter betrachtet, da diese eine deutlich größere Flexibilität aufweisen.

In der Vergangenheit sind bereits einige Forschungssysteme zur automatisierten Fertigungsplanung und NC-Programmierung entwickelt worden. Bis 1988 wurden 127 Low-End-Systeme erfasst. Diese Systeme weisen teilweise eine Inkompatibilität von Programmen und Hardware auf. Die Darstellung der Modelle auch zwischen den einzelnen Computer Aided (CAx)-Bereichen ist uneinheitlich, so dass sich der Datenaustausch schwierig gestaltet. [CAI07] In den folgenden Abschnitten werden einige CAPP-Systeme vorgestellt:

**TOM** (Technostructure of Machining) war Anfang der 80er-Jahre des 20. Jahrhunderts eines der ersten Systeme, in dem die Idee von CAPP umgesetzt wurde. Es war in der Lage, aus alternativen Operationen auszuwählen und anhand der Fertigungszeiten zu gewichten. Dieses frühe System war bereits in der Lage Schnittwerte zu planen, bei vielen anderen späteren Systemen wurde dieser Punkt oftmals nicht umgesetzt. Auch der objektorientierte Ansatz mit Klassen und Instanzen sowie die Idee von anwenderfreundlichen Schnittstellen sind bis heute aktuell. Allerdings fehlen wichtige Elemente, z. B. Wissen wird noch hart verdrahtet in ASCII-Strukturen abgelegt, so dass eine Systempflege bei komplexeren Systemen zunehmend schwieriger wird. Außerdem können alternative Fertigungsabfolgen nicht definiert werden und das System ist nicht an ein CAx-System angebunden. [VD93] **XPLANE** nutzte 1988 bereits eine Art Feature-Erkennung und umfasste eine Vielzahl von grundsätzlichen Funktionen zur Operations- und Werkzeugauswahl beim Fräsen. Es bildet einen Wegbereiter für spätere Entwicklungen, um die vielen offenen Details zu vertiefen. Es bleibt jedoch ein Forschungssystem, da weiterhin keine umfangreichen Wissensstrukturen aus der Praxis verwendet werden. [ERV88] **PRESS** ist ein CAPP-System für die Blechbearbeitung und ist vorwiegend 2D-orientiert. Durch seine eingeschränkte Planungsaufgabe kann der Automatisierungsgrad aber bereits beachtlich erhöht werden. [BT91] **PART** ist die Weiterentwicklung der Ergebnisse von XPLANE. Die Werkzeugauswahl wurde verbessert und Aufspannungen werden in Abhängigkeit von der Maschine geplant. Es zeigt sich, dass nach und nach alle Aufgaben der Fertigungsplanung automatisiert werden sollen, allerdings wird nicht hinterfragt, ob dies in der Praxis möglich ist. [JON92] Des Weiteren sei auf die frühen Systeme FRAPP, HAPPI, DCLASS und SIPPS [VD93] verwiesen, sowie ab 1998 auf QTC, KAPLAN; XTURN und

GPPE [CAI07], [WFC07]. Auf diese Systeme wird hier nicht eingegangen, da diese ähnlich zu den oben vorgestellten sind.

Bis 1994 wurden bereits 187 Systeme aufgebaut. Diese Systeme haben sich deutlich weiterentwickelt und profitierten zu diesem Zeitpunkt von höheren Programmiersprachen, neuen Möglichkeiten bei Anwenderschnittstellen und Datenbankmethoden. [ZA94], [CAI07] Weitere Entwicklungen brachten immer speziellere CAPP-Systeme hervor; allgemeine Lösungen wurden nun weniger angestrebt, da die Gesamtkomplexität und die Wissensmenge durch die stetige Weiterentwicklung aller Bereiche (Fertigungstechnik, Werkzeugmaschinen, Informatik, PLM-Prozess, ...) stetig zunahm. Exemplarisch sei hierbei ein CAPP-System zur automatisierten NC-Programmierung von Leiterplatten im zweidimensionalen Raum genannt. **Sommer** [SOM95] beschreibt in seiner Arbeit bereits den industriellen Einsatz dieser Software.

Bis zu diesem Entwicklungsstand bleibt jedoch das grundsätzliche Problem bestehen, dass die Kommunikation zwischen Softwarekomponenten und CAPP-Systemen komplex ist und sich aufgrund deutlicher Systemunterschiede vielfach als schwierig darstellt, wie in der Arbeit von Baykasoglu et al. [BAY04] beschrieben wurde. Ein Ansatz, um diese Kommunikationshürde zwischen den Systemen zu nehmen, sind Web-basierte Lösungen. **WBPS** ist ein Web-basiertes Portalsystem, welches auf Fuzzy-Logik zur Parameteroptimierung aufgebaut ist. Es ist für die Fertigungsplanung beim Polieren entwickelt worden [TNH07]. **Cai** [CAI07] stellt 2007 ein Web-basiertes CAPP-Datenaustausch-System vor. Im Ergebnis lässt sich zusammenfassend auf Cai verweisen, der die Entwicklung von web-basierten Systemen als ein Studium von Prototypen darstellt. Er bewertet web-basierte Systeme als nicht geeignet für die Fertigungsplanung aufgrund der schlechten Performance bei der Geometriemodellverrechnung und bei großen Datenmengen.

Als Alternative zu webbasierten Systemen entwickelten sich Feature-basierte Systeme, die deutlich umfangreichere Planungsaufgaben bewältigen konnten, einige Systembeispiele folgen:

**Ko** et al. [KKK03] entwickelten einen CAPP-Ansatz für das Fräsen innerhalb von Z-Leveln im Formenbau. **Wang** et al. [WFC07] splitten die Fertigungsplanung in zwei Bereiche auf: Supervisory Planning (Über-/Vorplanung) und Operation Planning (Fertigungsoperationsplanung). Die Autoren versprechen sich dadurch mehr Flexibilität und agileres Reagieren auf Veränderungen im gesamten Fertigungsplanungsprozess. Der erste Bereich umfasst dabei die Produktdatenanalyse, UMF-Aufschlüsselung, Maschinenauswahl, Planung von Aufspannungen, Spannmitteln und Bearbeitungsfolge. Der zweite Bereich plant die Details, wie Operationsauswahl, -befüllung, Werkzeugauswahl, Schnittdatenbestimmung, Werkzeugwegberech-

nung und NC-Code-Kontrolle. Dieses System jedoch ist eine Stand-Alone-Lösung. **IMPlaner** [SAG07] arbeitet mit einem virtuellen Berechnungsmodell, das die Prozessdaten und das Geometriemodell verwendet, um den Volumenabtrag innerhalb des CAPP-Prozesses zu überprüfen, Kollisionen aufzuspüren und Zwischenmodelle für weitere Aufspannsituationen zu erzeugen. Regeln und Formeln werden im XML-Format abgelegt. **CyberCut** [SW07] ist sowohl CAD- als auch CAPP-Tool im Bereich des Formenbaus. Das Hauptziel hierbei ist es, Konstruktion und Fertigung näher zusammenzubringen, indem das Konstruktionsmodell von Zeit zu Zeit auf Fertigbarkeit auf einer 3-Achs-Fräse durchgerechnet wird. Das CAPP-System arbeitet in zwei Stufen, dem Macro- und dem Micro-Planer, vergleichbar mit dem Ansatz von Wang et al. [WFC07]. **Dean** et al. [DTX07] setzen innerhalb der variantenreichen Massenfertigung an, in der jedes Teil für sich einzigartig ist. Die Arbeit hat im Besonderen den ökonomischen Ansatz im Fokus, mit dem Ziel, genauso günstig zu sein wie ein Standardprodukt. Die Fertigungsplanung findet für Fertigungssysteme statt, der Planungsprozess wird dabei in einen langfristigen und einen kurzfristigen Planungsprozess unterteilt. Besonders der langfristige Planungsprozess ist bei großem Durchsatz notwendig, um Zulieferer koordinieren zu können und den Fertigungsstrom innerhalb eines one-piece-flows<sup>5</sup> nicht abreißen zu lassen. **Collaborative process planning**<sup>6</sup> (CPP) and **Collaborative process manufacturing**<sup>7</sup> (CPM) (gemeinschaftliche Fertigungsplanung und Fertigung) [MYW08] ist ein Ansatz im Rahmen einer product lifecycle collaboration. Ziel ist eine bessere Abbildung des Lebenszyklus und der Produktentwicklungsprozesse. CAPP und CAM sollen durch CPP und CPM ersetzt werden und in stetiger Interaktion mit dem Anwender Lösungen erarbeiten. [MYW08] Mit einem **Dreh-CAPP-System** verfolgen Peng et al. [PC07] einen Ansatz beim Drehen. Die zentrale Idee ist neben einer voll integrierten Umgebung eine Visualisierung des Gesamtsystems.

In diesem Kapitel wurden Forschungssysteme aus dem Umfeld der automatisierten Fertigungsplanung vorgestellt, das folgende Kapitel untersucht zusätzlich kommerzielle Systeme, die in etablierten CAx-Produkten in der Industrie bereits zum Einsatz kommen.

### 2.3.5 Entwicklungsstand der kommerziellen wissensbasierten Fertigungsplanungssysteme

Bei kommerziellen Systemen ist die funktionale Detaillösung meist nicht so weitgehend entwickelt wie bei Forschungssystemen, allerdings sind sie für die Praxis deutlich durchdachter,

---

<sup>5</sup> Auf Deutsch: ein Teil gleichzeitig

<sup>6</sup> Auf Deutsch: gemeinschaftliche Fertigungsplanung

<sup>7</sup> Auf Deutsch: gemeinschaftliche Fertigung

da ein wirtschaftlicher Einsatz von den Kunden gefordert wird. Automatisierte Strukturen werden eingesetzt, um geringere Personalkosten, weniger Fehler, bessere Produktionsergebnisse und geringere Durchlaufzeiten zu erreichen.

Alle nachfolgend genannten Systeme haben gemeinsam, dass sie im Umfeld einer Feature-basierten CAD/CAM-Kette integriert sind. Fertigungswissen kann in vorgegebenen Strukturen abgelegt und regelbasiert angewandt werden. Von den führenden am Markt etablierten wissensbasierten Fertigungsplanungssystemen werden im Folgenden ausgewählte CAM-Systeme und deren NC-Automatisierungen beschrieben, wesentliche Konzeptunterschiede herausgestellt und die Systeme bezüglich der Einsatzmöglichkeiten bewertet. Bei der Systemanalyse wird auf folgende Fragen eingegangen:

- Welchen maximalen Automatisierungsgrad kann das System erreichen?
- Wie werden der manuelle NC-Programmierprozess und der automatisierte verknüpft?
- Wie werden die Administratoren bei der Wissensakquisition und bei der Systempflege unterstützt?

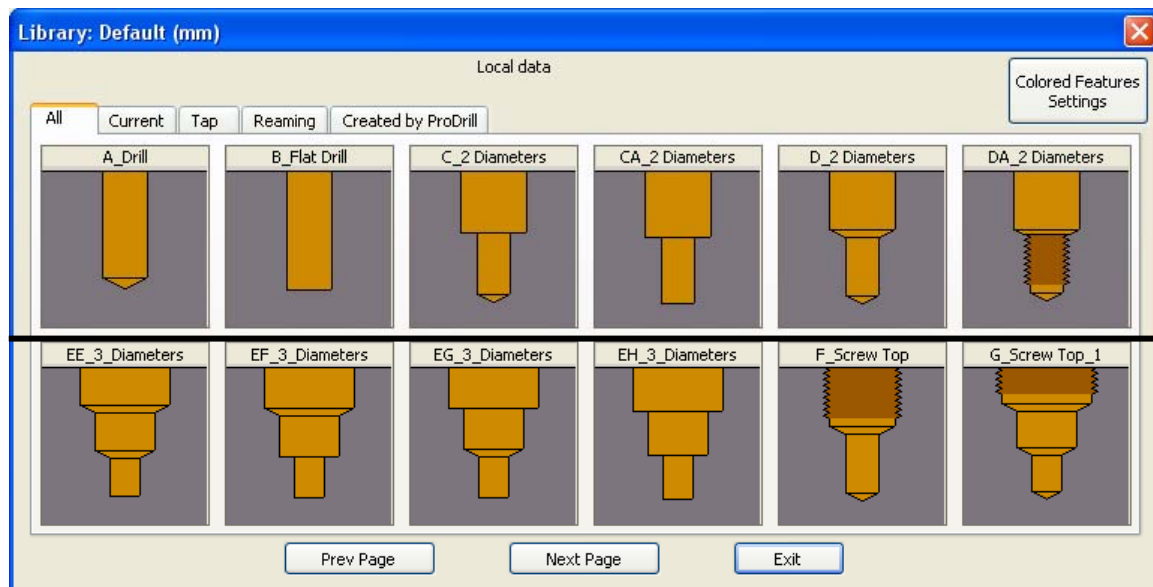
Informationen für die Analyse leiten sich aus Herstellerangaben der Software, Schulungsunterlagen zur Software sowie Messevorführungen ab. Die Auswertung zusätzlicher Informationen auf Basis persönlicher Angaben der Softwarehersteller ist jedoch nicht möglich.<sup>8</sup> Das Analyseergebnis ist daher nicht im Detail belastbar, jedoch können grundsätzliche Aussagen zur Beurteilung getroffen werden.

MasterCam ist das „weltweit meistverkaufte CAM-System“ [INT10]. Es bietet zur NC-Automatisierung das System ProDrill an. Das Unternehmen stellt dieses wie folgt dar: „ProDrill vereinfacht das Erstellen von Bohrwerkzeugwegen [...] enorm. Gerade bei großen Datenmengen reduziert diese Zusatzapplikation den Zeitaufwand von vielen Stunden auf wenige Minuten. Bohroperationen werden automatisch erkannt, unabhängig vom CAD-System, auf dem die Geometrie erstellt wurde. [...] Komplexe Bohrgeometrie und -operationen können automatisch erzeugt und eingefügt werden.“ [INT10] Ergänzend ist zu erwähnen, dass die Feature-Erkennung verwendet wird und das ProDrill die Programmierung fester Zyklen wie Bohren, Gewindebohren, Reiben und Zentrierbohren automatisieren kann. Das System ist sehr Anwender orientiert und besitzt keine unabhängige Wissensbasis. Es wird eine umfangreiche Prozesskonfiguration mitgeliefert, allerdings mit festgesetzten Regeln, ohne die Möglichkeit mit Formeditoren variablen-basierte Regeln aufzustellen. Die Feature-Bibliothek

---

<sup>8</sup> Für die Analyse anhand eines Fragenkataloges konnte keiner der Softwarehersteller gewonnen werden, da (vermutlich) Nachteile im Wettbewerb befürchtet werden, wenn zu viele funktionale Details offen gelegt werden würden.

erwartet konkrete Gesamt-Feature-Definitionen, so dass lediglich vorab definierte Formen verarbeitet werden können. Manuelle Arbeiten werden an den Operationen direkt, ohne strukturiert angeleitetes Vorgehen und ohne Ergebnisbewertung durchgeführt. Die Systemadministration wird durch die normale Systemoberfläche unterstützt, wobei eine Teilautomatisierung nicht explizit angestrebt wird.



**Abbildung 11:** Übersicht über die ProDrill Form-Tabelle [INT10]

Fazit: Das System ProDrill von MasterCam ist geeignet, um eine NC-Automatisierung von wiederkehrenden Features durchzuführen. Erforderliche administrative Konzepte, Methoden oder Aufwände werden nicht angesprochen.

NX CAM Feature Based Machining (FBM) ist der weltweite Marktführer in CAM<sup>9</sup> [SIE10]. Das Unternehmen stellt dieses wie folgt dar: Die Automatisierung macht das Programmieren schneller, besser wiederholbar und erfordert weniger NC-Programmiererfahrung um gute Ergebnisse zu erhalten.<sup>10</sup> [SIE10]. Darüber hinaus werden bis zu 90 % Einsparung verglichen mit traditionellen Methoden versprochen.

Bei NX CAM FBM muss zwischen zwei möglichen Technologien unterschieden werden. Zum einen „NX Knowledge Fusion (KF) enabled Feature Based Machining“ und zum anderen “NX Machine Knowledge Editor” (MKE). Inhaltlich unterscheiden sich diese deutlich, daher werden diese auch getrennt voneinander vorgestellt:

<sup>9</sup> Aus dem Englischen übersetzt: “The world leader in computer-aided manufacturing.” [SIE10].

<sup>10</sup> Aus dem Englischen übersetzt: “Automation makes programming faster, more repeatable and it requires less programming expertise to get good results.” [SIE10].

Seit der NX2 bietet Siemens PLM, vormals Unigraphics „KF enabled FBM“, eine Automatisierung der NC-Programmierung beim Bohren an. Das technologische Konzept basiert auf der bidirektionalen vollständigen CAD/CAM-Integration der Programmiersprache Knowledge Fusion, in der eine Inferenzmaschine aufgebaut werden kann. Das System bringt allerdings nur wenige Funktionen bzw. Programmcode bei der Standardinstallation mit, so dass nur mit größerem Programmier- und Konfigurationsaufwand umfangreiche Automatisierungslösungen realisiert werden können. Administrationskonzepte, Methoden und Aufwände können weitestgehend nur durch Berater erlernt werden, da kaum Dokumentation vorliegt. Grundsätzlich kann mit gehobenem Aufwand mittels dieser Technologie aber die umfangreichste Automatisierungslösung realisiert werden. Die Verknüpfung des manuellen und automatisierten NC-Programmierprozesses und die Unterstützung der Administration obliegen dabei weitestgehend der individuellen Programmierung.

Fazit: Kleine Automatisierungslösungen sollten mit dieser Technologie nicht realisiert werden, da der finanzielle Aufwand für die Erstimplementierung sehr hoch ist. Bei umfangreichen Ansätzen bietet sich aber ein weites Feld an Möglichkeiten, so dass eine Automatisierungslösung in beliebigem Umfang aufgebaut werden kann.

Seit der NX6 wird der Machine Knowledge Editor (MKE) als feature-basierte Automatisierungslösung der NC-Programmierung für Bohr- und Fräsprozesse durch Siemens PLM vertrieben. Das System befindet sich noch in der Entwicklungsphase, erste Ansätze zeigen, dass die Automatisierungsmöglichkeiten sehr umfangreich sind. Durch die Nutzung der Feature-Erkennung, der UMF-Technologie und einer vollständigen NX-Integration sind hohe Automatisierungsgrade möglich. Grundsätzlich fehlen dem System jedoch eine angemessene Kopplung zum manuellen Prozess, eine Unterstützung der Wissensintegration und der Administration. Das System bietet die Möglichkeit auch komplexe Automatisierungen aufzubauen, jedoch sind die Regelwiederfindung und die Transparenz von Lösungswegen nach Anwendung dieser gering.

Fazit: Der MKE ist derzeit die am weitesten entwickelte kommerzielle Standard-NC-Automatisierung, jedoch werden auch hier der manuelle NC-Programmierprozess, die Wissensintegration und die Systempflege nur mangelhaft unterstützt.

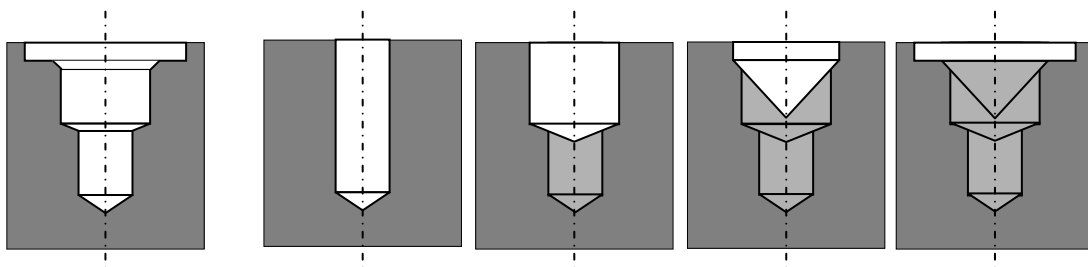
Mit hyperMILL Feature Technologie lässt sich die NC-Programmierung „*Standardisieren und Automatisieren*“ [OPE10]. Der Programmieraufwand kann insgesamt reduziert werden. Es können im CAD vorhandene Geometrieinformationen für die CAM-Programmierung genutzt und auch typische und wiederkehrende Geometrien als Feature definiert werden. Fea-

tures enthalten neben der zugeordneten Geometrie auch alle fertigungsrelevanten Informationen wie Oberfläche, Tiefe oder Startpunkt. Diese werden einmal definiert und lassen sich der Bearbeitungsstrategie zuweisen. [OPE10] Das System ist sehr anwenderorientiert, besitzt jedoch keine unabhängige Wissensbasis. Die manuellen Prozesse werden ebenso wenig methodisch unterstützt, wie die Administration.

Fazit: Das System ist für viele Produkte mit wiederkehrenden Features als diskrete Automatisierung gut geeignet, bei einer variantenreichen Feature-Bibliothek mit einem hohen Automatisierungsgrad ist die Regelverwaltung jedoch komplex und aufwendig.

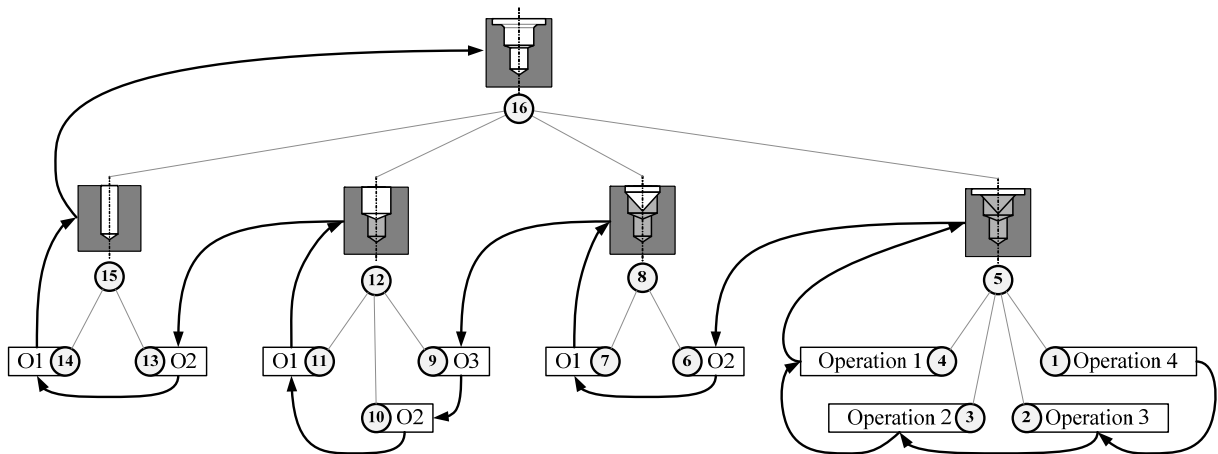
### 2.3.6 Grundlagen der Inferenzmaschine

Unabhängig von dem Weg, wie das Feature erkannt wird, ergibt sich für die Fertigungsplanung die Herausforderung, das konstruierte Feature so genau wie möglich zu fertigen. Im Fertigungsprozess können jedoch nicht alle Features gleichzeitig und in einem Schritt bearbeitet werden. Die Inferenzmaschine geht hierzu in einem häufig genutzten Ansatz die Planungsaufgabe strukturiert, unter Nutzung der Breitensuche, an und zergliedert anhand von logischen Bedingungen aus der Wissensbasis, die Features zunächst nach Typen und weiter nach vergleichbaren Feature-Gruppen. Jede Feature-Gruppe wird weiter in einfache Komponenten, in sogenannte Unit Machining Features (UMF), zergliedert, die sich in einer Arbeitsstufe abarbeiten lassen. [CAI07], [VD93], [WIT06] Bei einem UMF-basierten automatisierten NC-Programmiersystem wird ein konstruiertes Feature in so vielen Fertigungsschritten wie nötig gefertigt, bis die tatsächliche Geometrie der konstruierten Geometrie, unter Beachtung der definierten Toleranzen, gleicht. Abbildung 12 verdeutlicht dies. Konstruiert wird das linke Feature, gefertigt wird es in den vier abgebildeten Schritten von links nach rechts, jeweils der weiße Teil wird in dem dargestellten Schritt zerspant. Die Zerlegung und Fertigungsplanung findet dabei rückwärts, bei einer Teilautomatisierung mit manueller Eingriffsmöglichkeit, von rechts nach links statt. Das UMF dient in den Zwischenschritten der Rückwärtsverkettung dazu, die konkrete geometrische und semantische Situation für die Regelauswertung bereit zu stellen und zum Schluss dazu, um sicher zu stellen, dass alles vollständig zerspant wurde.



**Abbildung 12:** Zerlegung eines Features in Unit Machining Features [CAI07] [VD93]

Die Inferenzmaschine plant ausgehend vom konstruierten Feature als Planungsziel mit Hilfe der UMFs in den Zwischenschritten und der gegebenen Randparameter, wie Fertigungsmaschine und Werkzeuge, die Fertigungsaufgabe. Es wird dabei stets vom Konsequenzteil der Regel ausgegangen, für die passende Antezedenzen gesucht werden. Vorteil gegenüber einer Vorwärtsverkettung ist dabei, dass ausschließlich Regeln zum Einsatz kommen, die direkten Einfluss auf die gesuchte Lösung haben.



**Abbildung 13:** Rückwärtsverketteter Planungsprozess der Inferenzmaschine

Abbildung 13 zeigt das Prinzip der Rückwärtsverkettung zusammen mit der UMF-Methodik. Es wird dabei entlang der gelben Punkte von ① rückwärts bis zum fertigen Feature in Punkt 16 nach einer Fertigungsstrategie gesucht. Diese Zerlegung stellt dabei ein Beispiel dar, dasselbe Feature könnte ebenso in eine andere Zahl an UMFs oder in anders ausgeprägte UMFs zerlegt werden, falls sich die Randbedingungen verändern. [LUP09], [KÖH02], [VD93], [PC07]

## 2.4 Defizite heutiger NC-Automatisierungen bei komplexen Bohrprozessen

Im voran gegangenen Kapitel wurden wissensbasierte Fertigungsplanungssysteme mit hohem Automatisierungsgrad untersucht. Es zeigt sich, dass die meisten Systeme keine manuellen NC-Arbeiten gezielt vorsehen oder in den automatisierten Prozess integrieren. Zum Teil wird auch eine Vollautomatisierung angestrebt, bzw. diese implizit zum Ziel genommen, da die manuelle Interaktion als notwendige Restarbeit eingesetzt wird.

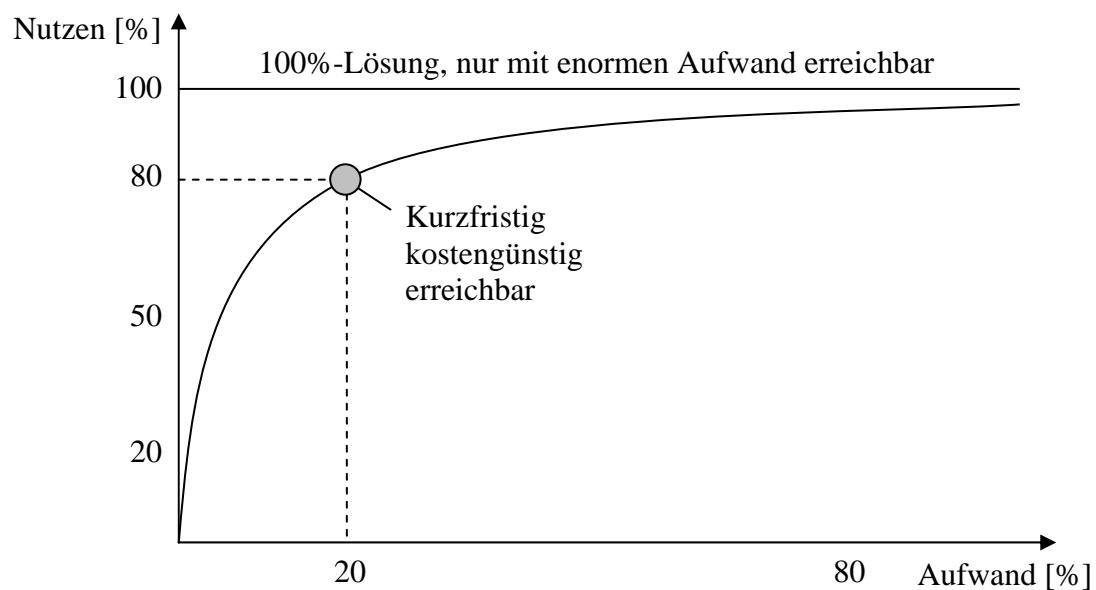
Im Folgenden werden konkrete Gründe erarbeitet, wieso keine Vollautomatisierung möglich ist und eine manuelle NC-Programmierung zu integrieren ist. Darüber hinaus werden Punkte aufgeführt, die heutige Expertensysteme nicht beachten, für eine praxisnahe Teilautomatisierung aber notwendig sind. Die einzelnen Punkte können jedoch zeitlich versetzt mehrfach oder



parallel auftreten und haben untereinander Einfluss, so dass sich die Effekte verstärken können.

### Keine 100 %-Automatisierung innerhalb der Erstimplementierung

Während der Erstentwicklungszeit der Wissensbasis und der Inferenzmaschine steigt der Automatisierungsgrad über die Entwicklungszeit mit dem eingebrachten Aufwand an. Nach Koch [KOC04] ist zur Erreichung des 100 %-Automatisierungsgrades eine gegen unendlich strebende Entwicklungszeit notwendig. Es ergibt sich ein Automatisierungsgrad (Nutzen) über die Entwicklungs- und Betriebskosten (Aufwand) nach Abbildung 14.



**Abbildung 14:** Darstellung der NC-Automatisierung anhand einer Aufwand-Nutzen-Funktion [KOC04]

### Keine 100 %-Automatisierung aufgrund von Fehlern und mangelnder Wartbarkeit

Unter *Wartbarkeit* wird die Einfachheit mit der ein Softwaresystem oder eine Komponente modifiziert werden kann verstanden. Dies wird durchgeführt, um Fehler zu beheben, Performance oder andere Attribute zu verbessern oder um Anpassungen aufgrund einer veränderten Umgebung vorzunehmen. [BSB08] Für eine langfristige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist die Möglichkeit zur Softwarepflege eine kritische Größe. Grundsätzlich lässt sich daraus allerdings auch ableiten, dass Fehler zumindest in der Zeit der Erstimplementierung und in der ersten Anwendungsphase vorkommen werden, eine 100 %-Automatisierung ist daher mindestens zu Beginn ausgeschlossen: „Der Kunde ist es gewohnt, dass Software nach der Auslieferung nicht funktioniert.“ [RIC03]

Mit Softwarewartung und -erweiterung sind in der Weltwirtschaft im Gegensatz zur Neuentwicklung mehr als die Hälfte aller Programmierer beschäftigt. [BSB08], [MCC93] Die Aussage von Langmann, dass 58 % aller Fehler erst in der Nutzungsphase entdeckt und damit auch erst in dieser Phase – mit hohem Aufwand – beseitigt werden können, ist insbesondere aus automatisierungstechnischer Sicht nachteilig. Wie wichtig dieser Aspekt ist, zeigt sich darin, dass die Kosten für Softwarepflege in der Nutzungsphase gegenüber den Kosten der Herstellungsphase mit über 200 % angegeben werden. [LAN04] Henning et al. heben die Strahlungswirkung von Entwurfsentscheidungen ebenfalls hervor, Fehler in der Entwurfsphase werden dort sogar mit bis zu 10.000fachen Kosten bei der Wartung angegeben. [HGJ07]

### **Keine 100 %-Automatisierung aufgrund stetiger Innovationen**

Die Fertigung wird in Hochlohnländern – dort wo auch die Automatisierung implementiert werden soll – oftmals in vielen kleinen Details ständig verbessert, so dass auch kleinste wirtschaftliche Potentiale ausgenutzt werden können. Aufgrund dieser fortwährenden technischen Evolution bzw. der Innovation von Prozessbereichen ist eine Automatisierung von Fertigungsprozessen stetigen Veränderungen unterworfen. [SCH99] Eine 100%ige Automatisierung kann, solange die Entwicklungsabteilungen innovativ arbeiten, nicht erreicht werden, da eine vollständige Umsetzung aller Innovationen praktisch nie erreicht werden wird – es kommen stets Neue nach. Viel grundlegender ist die Erkenntnis aus diesem Punkt, dass die Anwender- und Administratorübersicht gewahrt bleiben muss. Das Regelwerk, die Systempflege, die Nachvollziehbarkeit der Automatisierung müssen für alle Prozessbeteiligten transparent bleiben, um die Fertigungsqualität, -kosten und -zeit gewährleisten zu können. Die Abbildung aller Sonderlösungen innerhalb einer Automatisierung sollte somit hinterfragt werden.

### **Keine 100 %-Automatisierung aufgrund von kurzfristigen Veränderungen**

Im Gegensatz zur Dynamik aufgrund von Innovationen erfordern aktuelle Veränderungen ein gewisses Improvisationsvermögen, Flexibilität und/oder ein umfangreiches redundantes Verhalten von Ersatzteilen und Experten, um den Automatisierungsgrad halten zu können. Vorgezogene Bauteile, Werkzeugbruch oder Maschinenausfall müssen bei der NC-Programmierung vor allem im Unikatbau oder bei Kleinserien beachtet werden. Eine Abbildung aller denkbaren und auch unbekannteren Szenarien im Regelwerk ist nicht möglich, eine Vollautomatisierung daher nur in dem Fall, dass von der Planung nicht abgewichen wird.

**Keine 100 %-Automatisierung aufgrund von fehlenden Daten im Modell**

Feature- oder Modellinformationen können fehlen, weil Daten durch Schnittstellen verloren gehen, CAD-Systeme nicht alle benötigten Informationen einem Feature an der richtigen Stelle anhängen können oder weil Informationen nicht im Modell, sondern in der Zeichnung eingebracht wurden.

**Keine 100 %-Automatisierung aufgrund von falschen Daten im Modell**

Falsche Informationen im Modell können tatsächlich oder auch relativ vorliegen. Tatsächlich liegen diese vor, wenn der Konstrukteur nicht fertigungstechnisch konstruiert hat, da dies seine Aufgabe ist. Relativ gesehen kann das Modellverständnis und die Sichtweise von Konstrukteur und Fertigungsplaner aber unterschiedlich sein. Der Konstrukteur kann alles richtig konstruiert haben, der Modellaufbau ist jedoch nicht automatisiert verarbeitbar.

**Keine 100 %-Automatisierung aufgrund zu vieler Daten und Informationen**

Neuste CAx-Systeme bieten bei jedem Feature die Möglichkeit, hunderte Attribute zu verwenden. Sowohl bei der Erstimplementierung des Regelwerkes als auch im Betriebszustand ist es fraglich, ob alle Attribute (Oberflächenrauheiten jeder einzelnen Fläche, Toleranzen zu jedem Maß, Fasen und Schrägen an den Kanten, außerdem Kostenfunktionen, Fertigungsverfahren, Funktions- und Qualitätseigenschaften) ausgewertet werden können, müssen oder sollen. Es bestehen daher grundsätzliche Fragen zur Beherrschbarkeit dieser Informationsmenge in einem Regelwerk:

1. Soll eine Auswahlmöglichkeit bzw. Regel automatisiert ausgewertet werden können? – Ist dieser Fall besonders beachtenswert oder eher ein Sonderfall?
2. Sind alle möglichen Fälle, Ereignisse und Ergebnisse beachtet und abgebildet worden? – Gibt es Wechselwirkungen mit anderen Fällen oder Attributen?
3. Ist ein unbelegter Wert in einem Modell bewusst unbelegt, wenn er ausgewertet wird oder ist dieser Wert unbeabsichtigt leer gelassen worden? – Wurde also eine Regel nicht erkannt oder eingepflegt?

Es ergibt sich hieraus die zentrale Frage für die Informationsfülle heutiger Systeme gekreuzt mit der Komplexität heutiger Produkte und Fertigungen: Ist es überhaupt möglich alle Werte in einem Regelwerk zu beachten?

**Keine 100 %-Automatisierung aufgrund von nicht in Regeln abbildbaren Einflüssen**

Wenn Schwingungen in der Fertigungsmaschine auftreten, die Prozessbeteiligte und Qualität

gefährden könnten, ist nach wie vor der Mensch als kurzfristiger Entscheidungsträger gefragt und ein automatisiertes Arbeitsplanungssystem kann daher nur Vorschläge liefern. [WIT06]

### **Zusätzliche Absenkung des Automatisierungsgrades aufgrund des Faktors *Mensch***

Solange keine mannlöse Automatisierung für die NC-Programmierung existiert, wird der Anwender selbst zusätzlich das System beeinflussen und den Automatisierungsgrad absenken. Neben sinnvollen Optimierungen sind hierbei auch Eingriffe möglich, die nicht unbedingt erforderlich oder sogar kontraproduktiv sind. Gründe hierfür können Schulungsmangel oder Vergessen sein, aber auch Eingriffe aufgrund einer falsch interpretierten Situation wegen zu komplexer Regelergebnisse sind möglich (Black Box). Ebenso sind Fehler aufgrund menschlichen Versagens denkbar. Ein Beispiel in Kapitel 3.3.3.2 verdeutlicht diesen Punkt.

### **Fazit aus der Analysephase zum Stand der Technik:**

Die in diesem Kapitel durchgeführten Untersuchungen der bestehenden, wissensbasierten Fertigungsplanungssysteme mit hohem Automatisierungsgrad zeigen, dass die manuellen Tätigkeiten nicht oder nur wenig durch Ergebnisse der Automatisierung unterstützt werden. Es handelt sich vielmehr um eine notwendige Pflicht, die Automatisierungsergebnisse zu überprüfen und zu verbessern. Heutige Systeme arbeiten bei manuellen Prozessen vor und nach dem automatisierten NC-Prozess vor allem unsystematisch; strukturierte Computerunterstützte manuelle Prozesse, die mit dem automatisierten Prozess eng verkettet sind, fehlen vielfach.

Anhand der aufgeführten Punkte konnte schlüssig dargelegt werden, dass eine Vollautomatisierung der NC-Programmierung von komplexen Bohrprozessen im realen Umfeld von Unikat- oder Kleinserienbauern im Maschinenbau nicht möglich ist – Die Wissensbasis und die Inferenzmaschine kann grundsätzlich nicht *fertig*, also für einen 100 % Automatisierungsgrad, entwickelt werden. Es ist daher absolut erforderlich, dass ein Automatisierungsprozess entwickelt wird, der bewusst die Teilautomatisierung – Der Grad der Teilautomatisierung ist noch zu untersuchen – anstrebt, so dass das gesamtwirtschaftliche Ergebnis über die Prozesskette optimiert werden kann. Insbesondere die enge Verknüpfung von manuellen und automatisierten NC-Programmierprozessen und die Unterstützung der Administration bei Wissensakquisition, Fehlerdiagnose und Systempflege sind hier besonders wichtig, um die Wirtschaftlichkeit zu optimieren.

### **3 Konzept zur Teilautomatisierung der NC-Programmierung bei komplexen Bohrprozessen**

Wie in Kapitel 2 gezeigt, sollte eine automatisierte NC-Programmierung einen Automatisierungsgrad von weniger als 100 % verfolgen. Um diesen teilautomatisierten Prozess bezüglich seiner Wirtschaftlichkeit maximieren zu können, ist das Expertensystem, d. h. sowohl die Inferenzmaschine als auch die Wissensbasis, auf diese Teilautomatisierung hin auszulegen. Dieses Kapitel geht gezielt auf die identifizierten Defizite ein und stellt ein Konzept zur Teilautomatisierung der NC-Programmierung vor. Im ersten Unterkapitel werden mögliche Automatisierungsgrade aufgestellt, die bei einer NC-Automatisierung je nach Randparameter ein Entwicklungsziel bilden können. Die einzelnen Konzepte werden im zweiten Unterkapitel auf relative Wirtschaftlichkeit untersucht, um anhand der Ergebnisse, den optimalen Automatisierungsgrad der Teilautomatisierung zu identifizieren und ein Konzept zur Automatisierung aufzubauen.

#### **3.1 Ansatz zur Klassifizierung des Automatisierungsgrades**

In diesem Kapitel wird eine Klassifizierung aufgestellt, nach der sich Automatisierungsgrade unterscheiden lassen. Es werden die wesentlichen Anforderungen an die Automatisierung und die Teilgebiete Qualitätssicherung, Konstruktionsmethodik, Fertigungsmethodik und Flexibilität zur Unterscheidung angeführt.

##### **3.1.1 Quasi-Vollautomatisierung**

Im Rahmen einer Quasi-Vollautomatisierung, die etwa einem Automatisierungsgrad von 95 % entspricht, sind alle Arbeitsschritte der NC-Programmierung, die in Kapitel 2.1 aufgeführt wurden, in Regeln abzubilden. Systemtechnische Unzulänglichkeiten sind durch Zusatzprogrammierungen zu umgehen. Eine Quasi-Vollautomatisierung liegt vor, wenn bei der NC-Programmierung für einen konkreten Auftrag keine individuellen Arbeiten durchgeführt werden müssen, sondern ein NC-Programm ohne manuelle Tätigkeiten vom System geliefert wird. Der Anwender der Automatisierung hat lediglich die Aufgabe, bei Fehlern einzugreifen und den Prozess erneut zum Laufen zu bringen. Die Qualitätssicherung ist bei einem quasi-vollautomatisierten System besonders wichtig und muss ebenfalls mit in die automatisierten Strukturen eingebracht werden. Eine Selbstüberwachung aller Automatisierungsergebnisse ist unumgänglich, um eine Prozesssicherheit gewährleisten zu können. Auch hier greift der Anwender nur dann ein, wenn die automatisierte Qualitätssicherung einen Fehler identifiziert hat und dieser gelöst werden muss. An die Konstruktion müssen stark einschränkende Anforderungen gestellt werden. Wenige Varianten, viele sich wiederholende Strukturen und klare

Konstruktionsrichtlinien müssen angestrebt werden, um den Regelumfang bei der NC-Automatisierung möglichst gering zu halten. Es sollten ein einheitlicher Maschinenpark, ein kleiner Werkzeugpool, keine fertigungstechnischen Sonderlösungen, klare Fertigungsvorschriften in der Fertigung und wenige Innovationen in der Technologie angestrebt werden.

### **3.1.2 80/20-Automatisierung**

Bei der 80/20-Automatisierung werden die wesentlichen Teile der Arbeitsschritte der NC-Programmierung automatisiert. Die 20 % nicht automatisierten Strukturen sind dabei nicht auf grobe Raster, wie einzelne Features, verteilt, sondern über alle Parameter und Details. Die manuelle NC-Programmierung wird genau dann angestrebt, wenn die Flexibilität zu sehr eingeschränkt werden würde oder systembedingt eine Automatisierung nur schwierig umgesetzt werden könnte. Die Anforderungen an eine automatisierte Qualitätssicherung und Ergebnisanalyse sind sehr hoch, jedoch kann der NC-Programmierer gezielt durch Systemoutputs auf fehlerhafte oder nachzuarbeitende Stellen hingewiesen werden, so dass eine umfangreiche Verknüpfung von manuellem und automatisiertem Prozess ermöglicht wird. Sowohl die Konstruktions- als auch die Fertigungsmethodik müssen gezielt auf diesen hohen Automatisierungsgrad hinwirken, um das Regelwerk kompakt zu halten. Dies kann durch Standardisierung der Fertigungstechnologie, Wiederverwendung von konstruktiven Strukturen und Produktstandardisierung erfolgen. Besonders individuelle Arbeiten oder solche mit hoher Flexibilität können, ebenso wie eigentlich aufwändige Anprogrammierungen bei Systemunzulänglichkeiten, auf den NC-Programmierer übertragen werden. Sowohl der Erstaufwand als auch die Pflege und die Systemkomplexität können so erfolgreich reduziert werden.

### **3.1.3 50/50-Automatisierung**

Bei der 50/50-Automatisierung werden nur gesicherte Parameter und routinemäßige Aufgaben in Regelstrukturen umgesetzt. Ziel soll es vor allem sein, den Anwender von einfältigen, immer wiederkehrenden Aufgaben zu entlasten und somit Fehler zu vermeiden. Die Anforderungen an Konstruktions- und Fertigungsmethodik sinken entsprechend, allerdings nicht mehr so deutlich wie bei der vorherigen Abstufung. Der Grund liegt vor allem darin, dass auch die manuelle NC-Programmierung eine Methodik erfordert, um die Fertigung zu ermöglichen. Die Flexibilität vergrößert sich erneut, jedoch ist diese aufgrund von individuellen Wissensgrenzen des NC-Programmierers begrenzt. Der Vorteil bei diesem Automatisierungsgrad ist vor allem, dass nur gesichert zu automatisierende Strukturen in Regeln abgebildet werden und so Automatisierungsfehler umfangreich vermieden werden können. Das Vertrauen in das Automatisierungsergebnis wird besonders stark sein. Der NC-Programmierer selbst hat jedoch

deutlich mehr Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses, somit fallen seine Fehler auch stärker ins Gewicht. Es steigt daher der Aufwand für die manuelle Qualitätssicherung, wie beispielsweise durch Simulationsanwendungen.

#### **3.1.4 Diskrete Automatisierungen**

Bei der diskreten Automatisierung, die etwa einem Automatisierungsgrad von 20 % entspricht, werden ausgewählte konkrete Fälle, wie einzelne Parameter oder wiederholt auftretende gleiche Fertigungssituationen, vollständig bzw. so weit wie möglich erfasst. Vergleichbar ist dieser Ansatz mit der Makro-Technologie, da bei der diskreten Automatisierung auch keine komplexen formelbasierten Regelstrukturen aufgebaut werden sollten. Der wesentliche Unterschied zur 50/50-Automatisierung ist, dass lediglich einfache gleich bleibende Zusammenhänge in der Wissensbasis gespeichert werden. Die Anforderungen an Konstruktion und Fertigungstechnologie sind gering, aber dennoch auf einem Basisniveau vorhanden, um die manuelle CAD/CAM-Kette zu schließen. Die Automatisierung steht kaum im Vordergrund, sondern sie wird nur angewandt, wenn das Konstruktionsmodell eine wiederkehrende Struktur aufweist. Erstinvestitions- und Pflegekosten für die Automatisierung entstehen in geringem Umfang, da manuelle Programmierungen aufgespeichert werden und die Fälle kaum Veränderung aufweisen sollten. Die Flexibilität wird, verglichen mit der einer manuellen NC-Programmierung, auch nicht weiter eingeschränkt.

#### **3.1.5 Manuelle NC-Programmierung**

Die manuelle NC-Programmierung verwendet keine Automatisierung. Es bestehen dennoch Mindestanforderungen gegenüber Konstruktions- und Fertigungsmethodik, die auch zur Einschränkung der Flexibilität führen. Die Qualitätssicherung findet ausschließlich manuell statt.

### **3.2 Betrachtung der Gesamtwirtschaftlichkeit abhängig vom Automatisierungsgrad**

In diesem Kapitel werden die aufgestellten Strategien zur Automatisierung miteinander verglichen. Es soll eine qualitative Untersuchung der relativen Aufwände und des Nutzens durchgeführt werden, mit dem Ziel die Notwendigkeit der Teilautomatisierung auch wirtschaftlich zu belegen und einen optimalen Automatisierungsgrad zu ermitteln. Es wird für die Berechnungen von einer automatisierten NC-Programmierung mit komplexen Bohr-Features im Umfeld eines Kleinserien- und Unikatfertigers ausgegangen. Im Folgenden werden Annahmen für den relativen Aufwand und Nutzen in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad für die Gesamtwirtschaftlichkeitsberechnung getroffen. Die Annahmen beruhen auf praxisnahen Werten, die vom Autor dieser Arbeit erfahrungsbasiert ermittelt wurden. Vertiefend wird

in Kapitel 3.2.1 und in Kapitel 3.2.2 diskutiert, wie sich veränderte Ausgangsbedingungen auf die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auswirken. Hierzu wird u.a. eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt (siehe Anhang A1), um die Plausibilität der gezogenen Schlüsse zu belegen.

	manuell	Diskret	50/50	80/20	quasi
<b>Anteil</b> Automatisierung	0 %	20 %	50 %	80 %	95 %
<b>Anteil</b> manuell	100 %	80 %	50 %	20 %	5 %
<b>Rel. Aufwand</b> Erstinvestition	0 %	~0 %	2 %	28 %	100 %
<b>Rel. Aufwand</b> QS automatisiert	0 %	21 %	53 %	84 %	100 %
<b>Rel. Aufwand</b> QS manuell	100 %	80 %	50 %	20 %	5 %
<b>Rel. Aufwand</b> Konstruktionsmethodik	25 %	~25 %	27 %	46 %	100 %
<b>Rel. Aufwand</b> Fertigungstechnologie/-methodik	25 %	~25 %	27 %	46 %	100 %
<b>Rel. Aufwand</b> Systemadministration	0 %	~0 %	2 %	28 %	100 %
<b>Rel. Nutzen</b> der Automatisierung	0 %	20 %	50 %	80 %	95 %

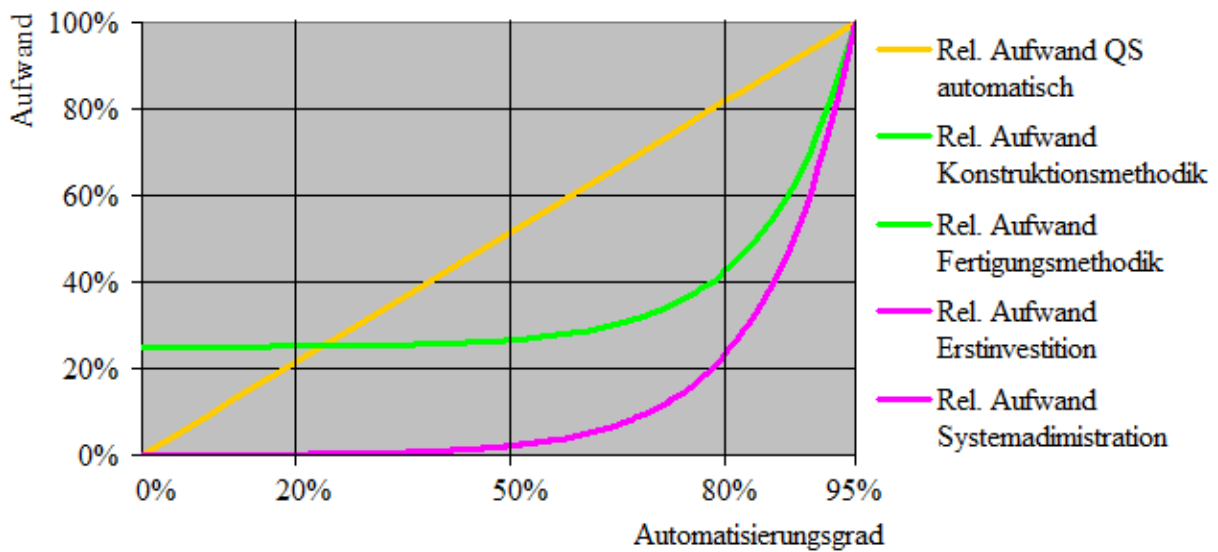
**Tabelle 4:** Annahmen zum relativen Aufwand und Nutzen

In Tabelle 4 werden Annahmen bezüglich folgender Aspekte getroffen (Abbildung 15 stellt diese zudem graphisch dar): Der „Anteil Automatisierung“ stellt den Automatisierungsgrad der einzelnen Konzepte dar. Der „Anteil manuell“ stellt den zusätzlichen manuellen Aufwand bei der NC-Programmierung dar. Die Werte leiten sich aus der Klassifizierung der Automatisierungsgrade ab. Bei dem Aufwand für die Qualitätssicherung (QS) wird zwischen automatisiertem und manuellem unterschieden. Aufgrund der Verteilung von manueller und automatisierter NC-Programmierarbeit in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad verlaufen die Aufwände hierzu gegenläufig. Es wird erwartet, dass bei einem hohen Automatisierungsgrad viele qualitätssichernde Maßnahmen auch automatisiert durchgeführt werden. Bei der manuellen QS wird angenommen, dass der Aufwand von 100 % bis auf 5 % linear zusammen mit dem manuellen Anteil der NC-Programmierung fällt. Die Werte für den „Aufwand Qualitätssicherung (QS) automatisiert“<sup>11</sup> dagegen basieren auf der Annahme, dass die Aufwände exponentiell von 0 % Aufwand bis zu 100 % in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad steigen. Der exponentielle Charakter, auch der nun folgenden Verläufe, basiert auf Untersuchungen von Koch [KOC04]. Der „Aufwand Konstruktionsmethodik“ und der „Aufwand Fertigungstechnologie“ basieren auf der Annahme eines exponentiellen Verlaufes von 25 % bis zu 100 % in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad. Es wird erwartet, dass eine Quasi-Vollautomatisierung deutlich mehr Aufwand für diese Aspekte erfordert als andere Automati-

<sup>11</sup> Die Aufwände für die QS des automatisierten Prozessteils müssen nicht notwendigerweise automatisiert sein, eine computer-unterstützte Qualitätssicherung bietet sich durch das wissensbasierte System jedoch an.



sierungsgrade. Eine manuelle NC-Programmierung erfordert am wenigsten, aber dennoch einen Mindestaufwand, der mit 25 % angesetzt wird. Für den „Aufwand Erstinventierung“ und den „Aufwand Systempflege“ wurden ebenfalls ein exponentieller Verlauf von 0 % bis zu 100 % in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad angenommen. Es wird erwartet, dass eine Quasi-Vollautomatisierung deutlich mehr Aufwand bei diesen Themen erfordert. Eine diskrete Automatisierung kann bei gut gewähltem Regelwerk und wenigen zu automatisierenden Fällen weitestgehend ohne Aufwand langfristig genutzt werden. Eine manuelle NC-Programmierung erfordert keinen Systempflegeaufwand, da kein System vorhanden ist.



**Abbildung 15:** Verlauf der Aufwände über den Automatisierungsgrad

Anhand der relativen Aufwände für Erstinvestition und Betrieb der einzelnen Teilbereiche der CAD/CAM-Kette kann unter Hinzunahme des Aufwandes für Mitarbeiter (MA) je Teilbereich ein relativer Aufwandsvergleich der Gesamtaufwände durchgeführt werden. Hierzu werden folgende Werte für den Personaleinsatz angesetzt:

	MA	Einheit	Faktor	ÄÄ	Einheit
<b>Aufwand</b> Erstinvestition	20	Adminjahre	1,5	30,0	Anwjahre
<b>Aufwand</b> QS automatisiert	2	Admins	1,5	3,0	Anw/a
<b>Aufwand</b> QS manuell	4	Anwender	1,0	4,0	Anw/a
<b>Aufwand</b> Konstruktionsmethodik	1	Admins	1,5	1,5	Anw/a
<b>Aufwand</b> Fertigungsmethodik	1	Admins	1,5	1,5	Anw/a
<b>Aufwand</b> Systemadministration	5	Admins	1,5	7,5	Anw/a
<b>Nutzen</b> der Automatisierung	20	Anwender	-1,0	-20,0	Anw/a

**Tabelle 5:** Annahmen zum relativen Personalaufwand

In Bezug auf Tabelle 5 sind, basierend auf den Erfahrungen des Autors mit teilautomatisierten NC-Programmierungen, folgende Annahmen getroffen worden: Ausgehend von einer manuellen NC-Programmierung mit 20 NC-Programmierern (Anwendern) wird der maximale erzielbare Nutzen bei einer theoretischen Vollautomatisierung mit 100 % angenommen, in diesem Fall arbeitet kein Anwender mehr in der NC-Programmierung. Für Anwender und Administratoren wird ein Kostenverhältnis von 1:1,5 unterstellt, da das Lohnniveau beider Gruppen unterschiedlich ist. Im Folgenden wird dieses Verhältnis für die Umrechnung der Anzahl an Administratoren in sogenannte äquivalente Anwender (ÄÄ) verwendet.

Für den weiteren Personalaufwand wird basierend auf den 20 Mitarbeitern in der NC-Programmierung angenommen, dass vier Mitarbeiter für die manuelle Qualitätssicherung arbeiten. Diese fallen bei einer Vollautomatisierung ebenfalls weg. Im Falle einer Quasi-Vollautomatisierung wird erwartet, dass der Aufwand für die Erstimplementierung bei 20 Administratoren-Mannjahren liegt. Der Aufwand pro Jahr für die Systemadministration wird mit fünf Administratoren, der für die automatisierte Qualitätssicherung mit zwei, der für die Konstruktionsmethodik und Fertigungsmethodik je mit einem Administrator angenommen.

Es ergibt sich folgendes relatives Aufwand-Nutzen-Gefüge:

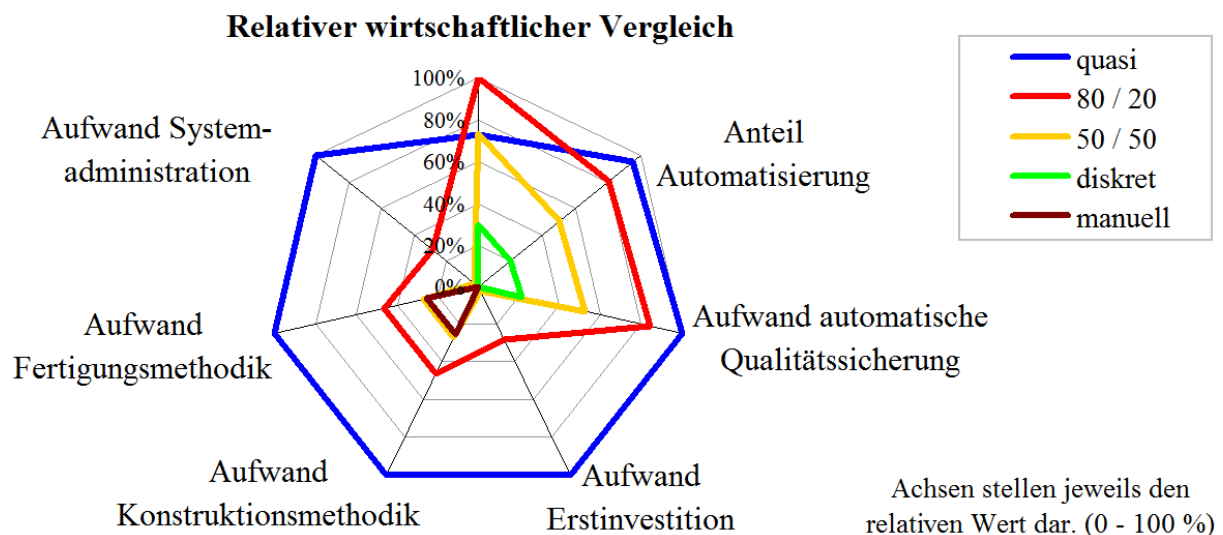
	Einheit	manuell	diskret	50/50	80/20	Quasi
<b>Aufwand</b> Erstinvestition	Anw/a	0,0	0,1	0,7	8,5	30,0
<b>Aufwand</b> QS automatisiert	Anw/a	0,0	0,6	1,6	2,5	3,0
<b>Aufwand</b> QS manuell	Anw/a	4,0	3,2	1,9	0,6	0,0
<b>Aufwand</b> Konstruktionsmethodik	Anw/a	0,4	0,4	0,4	0,7	1,5
<b>Aufwand</b> Fertigungstechnologie/-methodik	Anw/a	0,4	0,4	0,4	0,7	1,5
<b>Aufwand</b> Systemadministration	Anw/a	0,0	0,0	0,2	2,1	7,5
<b>Nutzen</b> der Automatisierung	Anw/a	0,0	-4,0	-10,0	-16,0	-19,0
Summe laufende Aufwände und Nutzen	Anw/a	4,8	0,6	-5,6	-9,3	-5,5
<b>Relative Wirtschaftlichkeit laufender Aufwände und Nutzen</b>	%	<b>-51</b>	<b>-6</b>	<b>60</b>	<b>100</b>	<b>59</b>
<b>Rel. Vergleich der Automatisierungsgrade</b>	%	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>73</b>	<b>100</b>	<b>73</b>

**Tabelle 6:** Berechnung des relativen Aufwand-Nutzen-Gefüges

In Tabelle 6 wird das Produkt der jeweils zusammengehörigen Werte aus Tabelle 4 und Tabelle 5 dargestellt. Aufwände und Nutzen wurden summiert und zueinander in Relation gesetzt. Dabei zeigt das Ergebnis, die relative Wirtschaftlichkeit laufender Aufwände und Nutzen, deutlich, dass der wirtschaftlichste Automatisierungsgrad bei 80 % zu finden ist.

In einer weiteren Rechnung werden die Ergebnisse der relativen Wirtschaftlichkeit auf den Bereich von 0 % bis 100 % normiert, dies dient vornehmlich dazu, die Werte in Abbildung 16 in einer gemeinsamen Skala darstellen zu können. Diese Abbildung zeigt im Überblick das relative Gefüge an Aufwand in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad und das Ergebnis der Berechnung, den relativen Vergleich der Automatisierungsgrade basierend auf der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Es ist zu sehen, dass nur die Kurve des Automatisierungsgrades von 80 % den Verlauf der Quasi-Vollautomatisierung im relativen Vergleich der Automatisierungsgrade schneidet. Damit kann gezeigt werden, dass das Maximum der Gesamtwirtschaftlichkeit zwischen den beiden Extremen 0 % und 100 % liegt.

Durch eine Extremwertberechnung (Details siehe Anhang A1) auf Basis der vorgestellten Annahmen konnte ein Automatisierungsgrad von 78,84 % als wirtschaftliches Maximum ermittelt werden. Die Gesamtwirtschaftlichkeit kann bezogen auf den 80 %-Automatisierungsgrad auf rechnerische 100,13 % gesteigert werden.



**Abbildung 16:** Relativer Vergleich der Automatisierungsgrade

Anhand der hier erstmalig durchgeführten relativen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine automatisierte NC-Programmierung zeigt sich, dass eine (Quasi-) Vollautomatisierung in der Praxis nicht angestrebt werden sollte; dieses Ergebnis stützt die theoretischen Überlegungen aus Kapitel 2.4. Aufgrund der nur geringen Abweichungen zwischen dem rechnerischen Maximum und dem 80 %-Automatisierungsgrad – welcher in der Praxis nicht nachweisbar ist – wird im Folgenden dieses Maximum als „Automatisierung nach dem 80/20-Prinzip“ [WAS99] benannt. Allgemeine Literatur zu dieser Theorie stützt diese Überlegungen und for-

dert in der Praxis zielorientierte Maßnahmen die den „Löwenanteil“ [WAS99] des theoretisch erreichbaren Nutzens zügig realisieren.

### 3.2.1 Sensitivitätsanalyse zur Berechnung der relativen Wirtschaftlichkeit

In diesem Kapitel werden die getroffenen Annahmen zur Berechnung der relativen Wirtschaftlichkeit mittels einer Sensitivitätsanalyse eingehender untersucht. Ziel ist es die angenommenen Werte und die daraus gezogenen Schlüsse auf Plausibilität zu überprüfen. Dies soll durch eine Analyse der Auswirkungen von Veränderungen der angenommenen Werte auf die relative Wirtschaftlichkeit geschehen. Zum Abschluss werden zudem die Grenzen ermittelt, bei deren Überschreitung sich ein anderes wirtschaftliches Optimum, als das in Kapitel 3.2 ermittelte einstellt.

In Anhang A1 werden hierzu die relevanten Rechnungen und Grafiken aufgeführt. Auf Seite 127 findet sich zunächst die Kalkulation, die im vorherigen Kapitel bereits vorgestellt wurde. Auf Seite 128 wird die Berechnung für die um 20 % reduzierten Werte und auf Seite 129 für die um 20 % erhöhten Werte dargestellt. Zu erwähnen ist, dass Aufwände kleiner 0 % nicht zugelassen werden und das Kostenverhältnis zwischen Administrator und Anwender ebenfalls reduziert bzw. erhöht wird. Die Veränderung der Annahmen um 20 % sollen zunächst die Tendenzen verdeutlichen.

Eine Kalkulation gliedert sich in drei bereits eingeführte Abschnitte. Abschnitt 1 stellt die getroffenen relativen Annahmen für die Aufwände und den Nutzen dar, Abschnitt 2 die angenommenen absoluten Personalaufwände und in Abschnitt 3 wird aus Abschnitt 1 und Abschnitt 2 das Produkt der jeweils zusammengehörigen Werte berechnet. Durch Aufsummierung der Einzelwerte lassen sich so die Summe der einmaligen Aufwände und die Summe der laufenden Aufwände und des Nutzens berechnen. Letztere werden zueinander in Relation gesetzt, um die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Automatisierungsgrade untereinander vergleichen zu können. Der Automatisierungsgrad mit der höchsten Wirtschaftlichkeit dient als Referenz und wird mit 100 % angesetzt. Abschließend wird die Amortisationszeit berechnet.

Auf Seite 130 werden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse in vier Grafiken dargestellt, wobei in den ersten drei Grafiken die Verläufe aus Abbildung 15 erneut angetragen werden. In der vierten Abbildung werden die Verläufe der relativen Wirtschaftlichkeit aller drei Kalkulationen über die Automatisierungsgrade dargestellt. Als wesentliches Ergebnis der Sensitivitätsanalyse lässt sich dabei herausstellen, dass bei einer Veränderung des Aufwandes um 20 % der optimale Automatisierungsgrad weiterhin bei etwa 80 % liegt. Die Berechnungen der maximalen Automatisierungsgrade – durch iterative Berechnung der maximalen relativen Wirtschaftlichkeit – in den Kalkulationen belegen dies (Spalte MAX: mittlerer Aufwand:

78,84 %, reduzierter Aufwand: 81,85 %, erhöhter Aufwand: 76,79 %). Werden die Aufwände weiter reduziert bzw. erhöht, so stellt sich nur bei einer Reduzierung kleiner -42,954 % ein anderes Automatisierungsmodell als wirtschaftlicher heraus. Diese Grenze ist in der vierten Grafik für den reduzierten und auch den erhöhten Verlauf abgebildet.

Mit der Sensitivitätsanalyse in diesem Unterkapitel konnte somit gezeigt werden, dass die getroffenen Annahmen in einem relativ großen Wertebereich schwanken dürften, ohne das Ergebnis und die daraus gezogenen Schlüsse zu verändern.

### **3.2.2 Risiken und weitergehende Überlegungen zur relativen Wirtschaftlichkeit**

Die weiteren Kapitel dieser Arbeit werden sich, basierend auf der vorgestellten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, auf die Entwicklung einer automatisierten NC-Programmierung mit einem Automatisierungsgrad von 80 % konzentrieren. Alle getroffenen Annahmen stehen jedoch unter dem Einfluss von Risiken, die den erreichten Automatisierungsgrad schmälern oder verzögern, sowie die Kosten der Implementierung oder des Betriebs erhöhen können. Diese Risiken bestehen neben denen aus Kapitel 2.4 und können z. B. Fehler in der Implementierungsphase sein, die die Pflegeaufwände deutlich steigen lassen oder zu viele kurzfristige Änderungen, die flexiblere alternative Lösungen erfordern, wodurch die Automatisierung nicht eingesetzt werden kann.

Wie veränderte Randbedingungen auf die Berechnung des relativen Vergleichs der Automatisierungsgrade und auf den optimalen Automatisierungsgrad einwirken, wird im Folgenden im Ansatz analysiert:

- Wird die Anzahl der Anwender in der NC-Programmierung besonders klein, so kann die Administration besonders teuer werden, da die Kosten für die Erstimplementierung und die Systempflege nicht proportional mit den Anwendern sinken. Zudem sind Einspareffekte z. B. durch standardisiertes Wissen kaum noch relevant, da der Wissensaustausch zwischen einigen wenigen NC-Programmierern „per Zuruf“ gut funktionieren kann.
- Bei Großserienfertigern wird vielfach ein NC-Programm bis ins letzte Detail mit viel manuellem Aufwand optimiert, um aufgrund der hohen Stückzahl die Wirtschaftlichkeit zu optimieren. Umfangreiche Automatisierungslösungen bei der NC-Programmierung sind weniger gefragt, da die Kosten der manuellen NC-Programmierung relativ zum Einsparpotential sehr klein ausfallen. In dem Fall haben individuelle menschliche Detaillösungen einen besseren Effekt auf die Gesamtwirtschaftlichkeit.

### **3.3 Modellierung der Wissensbasis**

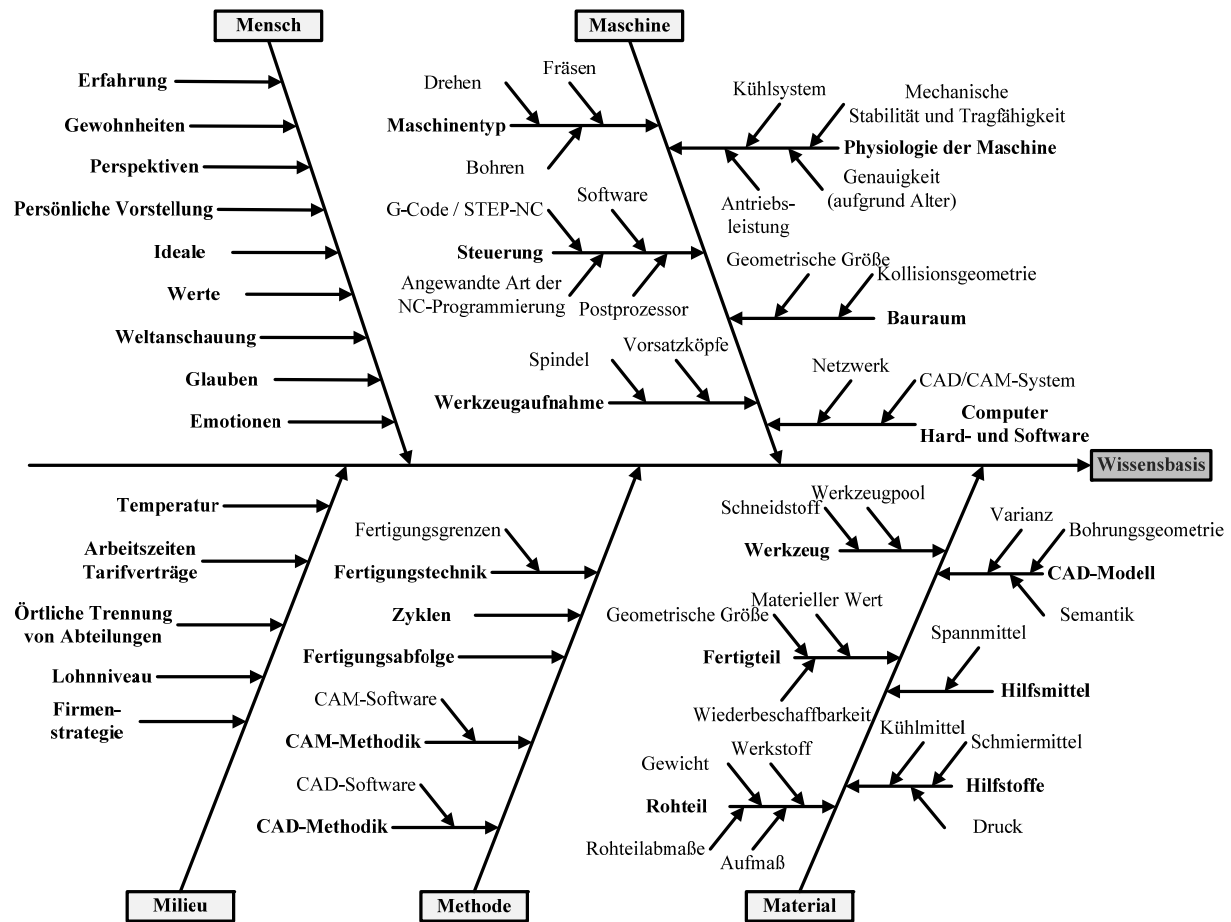
In den beiden voran gegangenen Unterkapiteln wurde der Grad der Teilautomatisierung im Detail untersucht. In diesem Unterkapitel soll nun allgemein eine Methode zur Modellierung der Wissensbasis für eine 80/20-Teilautomatisierung erarbeitet werden. Im ersten Schritt sind Anforderungen aufzustellen und Konzepte zu erarbeiten, um fachliches Wissen als schwer erfassbares menschliches Gut zu externalisieren. Hierzu wird im Detail auf den Faktor Mensch beim Systemaufbau, bei der Erarbeitung der Wissensbasis und während der Betriebsphase eingegangen. Die Ergebnisse werden im Anschluss für die Entwicklung einer Methodik zur Modellierung einer Wissensbasis weiterverwendet. Diese unterstützt erstmals gezielt das Zusammenwirken beider Prozessteile, so dass ein eng verkoppeltes Arbeiten von computerbasiertem automatisiertem und kognitiv basiertem manuellem Teilprozess erreicht wird. Darüber hinaus sind die Ergebnisse relevant für die Anforderungen an die Inferenzmaschine, die in Kapitel 3.4 diskutiert werden.

#### **3.3.1 Anforderungen an das Wissensmanagement**

Das Sammeln von Expertenwissen für eine automatisierte NC-Programmierung ist ein schwieriger, unter Umständen auch langwieriger Prozess, da das Wissen zur Entscheidungsfindung nicht nur aus Fakten besteht, sondern auch durch Erfahrung, Intuition, Erfolge, Misserfolge und entsprechende Kombinationen beeinflusst wird. [KÖH02]

Die wichtigsten Einflussgrößen beim Wissensmanagement und auf den Inhalt der Wissensbasis sind in Abbildung 17 in einem Ishikawa-Diagramm zusammengefasst. Im Ursache-Wirkungs-Diagramm wurden hierzu die fünf großen M, Mensch, Maschine, Milieu, Methode und Material untersucht und die wesentlichen Einflüsse erfasst. Diese müssen gezielt bei der Entwicklung der Wissensbasis beachtet werden, Kapitel 3.3.3 vertieft hierzu den Menschen und das Milieu. Für eine konkrete Wissensbasis ist zudem die Intensität und der Variantenreichtum zu untersuchen, um die Aufteilung in Wissen für die Automatisierung auf der einen Seite und für die manuelle Arbeit auf der anderen Seite durchführen zu können. In Kapitel 3.3.4 wird dies eingehender Besprochen, um eine Methodik zur Modellierung einer Wissensbasis zu erarbeiten und die drei großen M, Maschine, Methode und Material als Regeleinflüsse zu erfassen.

Basierend auf dem Ishikawa-Diagramm werden nachfolgend zunächst Anforderungen zur Aufteilung des Wissens zwischen dem manuellen und dem automatisierten Teilprozess erarbeitet.



**Abbildung 17:** Ishikawa-Diagramm: Einflussgrößen auf den Inhalt und die Entwicklung der Wissensbasis (Details aus: [LEH08] [LM06] [WEG07])

Die Aufteilung von Wissen zwischen dem automatisierten und dem manuellen Prozess findet keinesfalls nur einmal statt, eine Wissenskomponente kann über die Zeit zwischen automatisiertem und manuellem Prozessteil wechseln, abhängig davon, wie sich die Einflussgrößen verändern. Die Aufteilung findet auch nicht auf der obersten Ordnungsebene statt, sondern in den untersten Detaillierungsebenen, bei den einzelnen Parametern und Funktionen, um die Potentiale beider Prozessteilnehmer optimal nutzen zu können. Im Folgenden werden Kriterien vorgestellt, die bei der Einteilung zwischen manuell und automatisiert zu beachten sind:

Für den computerbasierten automatisierten Teilprozess sollte vorwiegend Wissen erfasst werden, das grundsätzlich in Regeln ableitbar ist und folgenden Kriterien entspricht (Beispiel siehe Kapitel 3.3.3.2):

- Umfangreiche Regeln, die manuell nicht gut zu erfassen sind, da viele Attribute und Daten miteinander in Beziehung gesetzt werden müssen.

- Einfach und schnell in Regeln abbildbare Strukturen, so dass der manuelle Prozess von diesen Tätigkeiten entlastet wird.
- Tätigkeiten die manuell eher einfältig sind und Routinefehler fördern.
- Sich selten verändernde Regeln oder erprobte und etablierte Fertigungsprozesse.
- Fertigungsstandards, häufig angewandte Regeln und strategische Ausrichtungen sollten automatisiert werden. Auch ein größerer Pflegeaufwand lohnt hierbei, da viele Fälle abgedeckt werden können und vor allem der Standard bzw. die Strategievorgaben bevorzugt angewandt und hierdurch etabliert werden.

Für den kognitiv basierten manuellen Prozess sollte vorwiegend Wissen erfasst werden, das folgenden Kriterien entspricht:

- Komplexe Regelentscheide, die sehr situationsabhängig sind und vielfach auf kurzfristige Ereignisse reagieren. Hierbei kann der Mensch seine wesentlichen Vorteile ausspielen: Erfahrungsbasiertes und flexibles Handeln, sowie kurzfristiges hinzuziehen von anderen Kollegen oder weiteren Quellen.
- Versuche, Tests, Sonder- oder Einzellösungen, die besonders selten im Fertigungsprozess auftreten, nicht mit Regeln abgebildet werden können oder im Voraus nicht bekannt sind, sind manuell in das NC-Programm einzubringen.
- Unzulänglichkeiten in der Standard-CAX-Software müssen manuell abgearbeitet werden, wenn keine Automatisierung ohne besondere Anprogrammierung möglich ist. Dies ist meist im Vorfeld bekannt und kann durch automatisierte Identifizierung gut zur manuellen Nacharbeit erfasst werden – auch das Wissen, dass etwas nicht automatisierbar ist, ist Wissen und sollte entsprechend zumindest als Anwenderinformation erfasst werden.
- Sich häufig verändernde Regeln, die aufgrund der Dynamik kaum in der Wissensbasis zeitnah pflegbar sind und daher auf den Moment ausgerichtet angewandt werden müssen, z. B. wenn eine Fertigungsmaschine ausfällt.
- Der automatisierte Teilprozess kann gezielt durch manuelle Interaktion unterstützt werden, wie dies in den folgenden Kapiteln bei der Wahl der Fertigungsstrategie oder bei der Werkzeugssuche geschieht. Dieses Vorgehen kann angewandt werden, wenn die Regelstruktur mehrfache Lösungen oder keine Lösung für ein Detailproblem findet, wobei diese Interaktion gezielt als Teil des automatisierten In-Prozesses verstanden werden sollte. Der Ansatz ist zudem zum kontinuierlichen Trainieren der Regelbasis nutzbar, da hierdurch Wissen automatisiert in die Wissensbasis überführt werden kann (vgl. Kapitel 5.5).



- Vergleichbar mit strategisch automatisierten Strukturen, die bevorzugt angewandt werden sollen, sind Punkte auch aus strategischen Gründen manuell zu belassen, damit diese sich aus dem NC-Programmierprozess ausschleichen. Dieser Effekt wird erreicht, weil der Aufwand für den Anwender, verglichen mit der automatisierten Lösung, erhöht ist.

Bei der Zuordnung zu dem automatisierten oder dem manuellen Teilprozess muss bedacht werden, dass der manuelle Prozess sowohl vor, während als auch nach der Automatisierung durchgeführt werden kann. Die manuellen Tätigkeiten, die während der Automatisierung durchgeführt werden, sollten interaktiv angeleitet werden. Manuelle Arbeiten die im oder nach dem automatisierten Prozess durchgeführt sollen, sind zur Qualitätssicherung bereits während des automatisierten Prozesses so weit wie möglich zu identifizieren und strukturiert zu erfassen, so dass eine systematische manuelle Nachbearbeitung möglich wird. Eine Qualitätssicherung und Prozessdokumentation ist zudem erforderlich, damit nicht jeder automatisiert zugewiesene Wert hinterfragt werden muss. Durch diese benannten Maßnahmen ist eine Verkoppelung von automatisiertem und manuellem Prozess erfolgreich möglich.

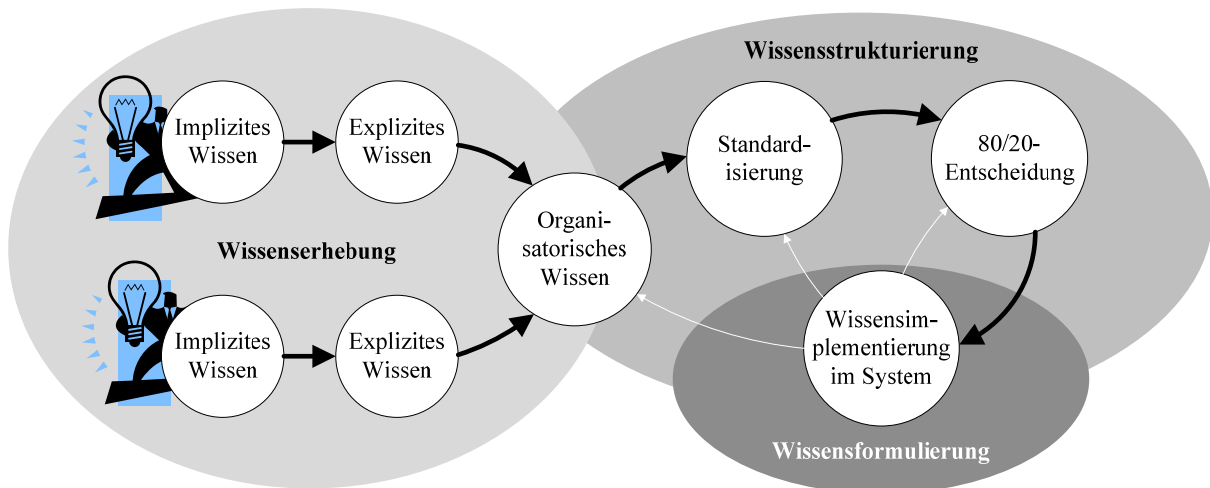
Die Wissensbasis muss zudem folgende allgemeine Anforderungen, basierend auf den Anforderungen an eine Datenbank nach Köhler [KÖH02], erfüllen: Konsistenz, Plausibilität, Redundanzarmut, Wiederauffindbarkeit, Erweiterbarkeit, Datensicherheit, Datenschutz, Mehrbenutzerbetrieb und zentrale Kontrolle, jedoch keine Vollständigkeit; im Besonderen sei zur Vollständigkeit erwähnt: Die Forderung nach Vollständigkeit des Regelwerkes ist gerade bei einer Teilautomatisierung aus den bereits benannten Gründen nicht erfüllbar. Diese Anforderung *darf* daher nicht gestellt werden.

Das folgende Kapitel erarbeitet nun allgemein die Wissenserarbeitung, ausgehend vom Wissen, das im menschlichen Kopf vorliegt, um im Ergebnis eine Wissensbasis inhaltlich erstellen zu können.

### **3.3.2 Konzept zur Erarbeitung einer Wissensbasis**

Wissen, welches zunächst in den Menschen als schwer erfassbares Gut vorliegt, muss in Regeln abgeleitet und in der Wissensbasis zur Verarbeitung in der Inferenzmaschine abgelegt werden. Die Wissensbasis setzt sich aus Fakten und Regeln zusammen, die in einer verarbeitbaren Form im System repräsentiert sein müssen. Die Repräsentation alleine nützt jedoch nichts; entscheidend ist vielmehr, welche Schlussfolgerungen aus der Wissensbasis gezogen werden und welches beobachtbare Verhalten das System zeigt. Aus diesem Grund sind die Erarbeitung der Wissensbasis und die Entwicklung der Wissensverarbeitungskomponente (Inferenzmaschine) aufeinander abzustimmen. Allgemein soll die Wissensbasis eindeutig, all-

gemeingütig, erweiterbar und modular angelegt sein [VWS94]. Speziell bei einem teilautomatisierten Prozess haben dabei zusätzliche Kriterien Einfluss und beeinflussen entweder das Regelwerk der Automatisierung oder das der manuellen Arbeiten. Die Ableitung von Wissen in eine eingabegerechte Form zur Überführung in das Expertensystem stellt dabei den „*Flaschenhals beim Knowledge Engineering*“ [ELD94] dar.



**Abbildung 18:** Prozess der Wissensakquisition

Der Prozess der Wissensakquisition, wie in Abbildung 18 dargestellt, gliedert sich in die methodischen Teilschritte Wissenserhebung, -strukturierung und -formulierung; Details folgen im Anschluss. Die Wissenserhebung ist dabei mit jedem Individuum bzw. Experten im Einzelnen durchzuführen, bevor der weitere Prozess der Wissensakquisition bei der Wissensstrukturierung gemeinschaftlich durchgeführt werden kann. Die Wissensformulierung im System obliegt zuletzt dem Entwickler der Wissensbasis. Das im System implementierte Wissen ist dabei nie abschließend entwickelt, sondern muss kontinuierlich mit den veränderten Bedingungen weiterentwickelt werden (weiße Pfeile in Abbildung 18 deuten diesen Kreislauf an). Dieser Prozess kann aufgrund der Teilautomatisierung kaum durch Techniken des maschinellen Lernens automatisiert werden, da eine Standardisierung und Aufteilung des Wissens (automatisiert vs. manuell) individuell erfolgen muss. Eine Möglichkeit zur Automatisierung des Wissenserwerbs zeigt Hyun [HYU08] in seiner Arbeit über ein lernfähiges NC-Programmiersystem auf. Er beschreibt einen Ansatz, mit dem Wissen in Form von Feedback automatisiert aus der Fertigung zurück in die NC-Programmierung fließen kann.

Die Wissensakquisition (vgl. in Abbildung 18), bestehend aus den drei erwähnten Teilschritten, wird im Folgenden im Detail bezogen auf die Teilautomatisierung erarbeitet:

### **Implizites Wissen wird überführt in explizites Wissen**

Wissen muss differenziert als explizites und implizites Wissen betrachtet werden. Implizites Wissen, gebunden in den Köpfen einzelner Individuen, besteht aus kognitiven und subjektiven Elementen. Dieses personenbezogene Wissen entspricht den Fähigkeiten eines Individuums und kann nicht vollständig kommuniziert werden. Im Gegensatz dazu lässt sich explizites Wissen verbalisieren, ist eindeutig sprachlich vermittelbar und formalisierbar. Es kann standardisiert, strukturiert, methodisch erfasst, repräsentiert und kommuniziert werden. [GT07], [SCH06], [WEG07] Beim Wissenserwerb helfen Methoden des Knowledge Engineering (siehe [KC07]), um implizites Wissen zu externalisieren, garantieren aber keinen Erfolg. [LEH08], [BHS07]

### **Explizites Wissen wird überführt in organisatorisches Wissen**

Wissen, welches in Regelprozessen innerhalb eines Unternehmens integriert werden soll, ist meist bei mehreren Mitarbeitern als implizites Wissen verfügbar. Dieses Wissen und die damit verbundenen Erfahrungen sind unterschiedlich und reduzieren sich auf den Horizont eines einzelnen Individuums. Die Aufgabe besteht nun darin, diese individuell unterschiedlichen Wissensbestände und damit auch die Sichtweisen für bestimmte wissensintensive Aufgaben zu externalisieren und in explizitem somit kommunizierbarem Wissen zusammenzuführen. [SSP04] In diesem methodischen Schritt wird das externalisierte Wissen der Individuen zu organisatorischem Wissen. Damit Wissen als organisatorisches Wissen bezeichnet werden kann, verlangen Duncan und Weiss in ihren Arbeiten drei Aspekte: Erstens die Verteilung des Wissens innerhalb der Organisation (Gleichverteilung ist nicht gefordert), zweitens der Konsens über das Wissen und drittens muss das organisatorische Wissen integriert (verifizierbar) sein. [LEH08] Weitere Untergliederungen und Details zum organisatorischen Wissen finden sich bei Guldenberg [GÜL03].

### **Organisatorisches Wissen wird überführt in Standardisierung**

Regelbasierte Systeme arbeiten mit deterministischen Regeln in einer klassisch logischen Umgebung. [BK06] Komplizierte Aufgaben erfordern die Anwendung von Regeln bzw. deren Ableitung aus Wissen; hier sind Bewusstsein, Erfahrung und Intuition gefragt. Komplexe Aufgaben können erst durch Wissen, nach dessen Erwerb und Anwendung, gelöst werden. [SCH99] Sollen diese Regeln, abgeleitet aus Wissen, automatisiert angewendet werden, so ist die Standardisierung Voraussetzung für Automatisierung. Aufgrund der Teilautomatisierung sollte bei der Standardisierung bereits in diesem Schritt der Wissensakquisition auf Flexibili-

tätseinschränkungen geachtet werden, damit die Standardisierungsergebnisse für den nächsten Schritt optimal vorbereitet sind. [FC00], [KK06]

Die Einschränkung der Flexibilität entlang der Produktentwicklung und Produktion wirkt sich sowohl auf einzelne Parameter als auch auf die Variantenvielfalt aus. Wird die Flexibilität, gerade bei hohen Automatisierungsgraden, nicht reduziert, dann kann sich die Automatisierung in Sonderfälle zerfasern, wodurch eine große und komplexe Wissensbasis gefördert wird. Dabei ist die Einschränkung der Flexibilität nicht grundsätzlich nur negativ, denn Standardisierung von Prozessen und Technologien geben Möglichkeiten zur Förderung der Gesamtwirtschaftlichkeit und erleichtern das Erreichen des Automatisierungsgrades. Wichtig dabei ist jedoch, dass relevante Kundenwünsche – *Relevante* Kundenwünsche der internen und externen Kunden können zum Gewinn des Unternehmens positiv beitragen – weiterhin umgesetzt werden können. Gerade bei einem teilautomatisierten Prozess kann dabei gezielt die Flexibilität bei den „design to customer“-Punkten hoch gehalten werden, so dass die Flexibilität gegenüber dem Kunden bestehen bleibt.

### **Standardisierung wird überführt in 80/20-Entscheidung**

Erfasstes und standardisiertes Wissen ist aber nicht zwangsläufig in ein Expertensystem zu implementieren. Gezielt kann, im Rahmen einer Teilautomatisierung, Wissen *nicht* implementiert werden, um das Regelwerk von Sonderwegen, zu hoher Komplexität und Inseleptimierungen frei zu halten (vgl. Kapitel 3.3.1). Identifiziertes Wissen, das in Regeln formuliert werden kann, ist daher unterschiedlich stark im Sinne der Gesamtwirtschaftlichkeit zu gewichten [FC00], [SCH00]:

- Die Befolgung ist unumgänglich (Gesetzmäßigkeiten)
- Die Befolgung ist verpflichtend (Richtlinien)
- Die Befolgung ist lediglich empfohlen (Regeln, basierend auf Regelmäßigkeiten, Ausnahmen sind jederzeit möglich)

Mit Blick auf die entstehende Wissensbasis ist dieses Werkzeug besonders bei großen und komplexen Regelwerken sinnvoll einzusetzen, um eine effiziente Regelerstimplementierung und -pflege zu ermöglichen.

### **80/20-Entscheidung wird überführt in Wissensimplementierung im System**

Das akquirierte Wissen muss abschließend systemgerecht abgelegt werden. Gleichzeitig sollten alle Regeln und Zusammenhänge systematisch dokumentiert werden, um bei einer späteren Veränderung bzw. Pflege die Regelstruktur nachvollziehen zu können. Das akquirierte

Wissen wird nach den drei Typen deklaratives Wissen (Durchmesser < 30mm), prozedurales Wissen (Wenn..., dann...) und Meta-Wissen (Wissen über Wissen) unterschieden. Dieses muss in Abhängigkeit vom Typen unterschiedlich in die Wissensbasis implementiert werden, so dass eine Verarbeitung nach der klassischen Aussagenlogik möglich ist. [KC07] Zusätzlich sollte die bei der 80/20-Entscheidung definierte Gewichtung der einzelnen Regel mit implementiert werden, um sich überdeckende Regeln auszuschließen.

Das zu erfassende Wissen lässt sich in datenintensive und regelintensive Teile unterscheiden, hierdurch ergeben sich für datenintensive Teile (z. B. Werkzeugdatenbank) Vorteile bei der Verwendung von umfangreichen relationalen Datenbanklösungen und bei regelintensiven Teilen (z. B. Entscheidungsbaum von Fertigungsstrategien) Vorteile bei der Anwendung von Ablagestrukturen mit strukturierter und schneller Regelübersicht.

Nach der Erstimplementierung des Regelwerkes in der Wissensbasis ist der Prozess der Wissensakquisition nicht abgeschlossen. Es handelt sich bei diesem Vorgang vielmehr um einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess, der auf Veränderungen in den Teilschritten organisatorisches Wissen, Standardisierung und 80/20-Entscheidung ständig reagiert. Sollte eine einmal getroffene Entscheidung in diesem Akquisitionsprozess neu entschieden werden oder Wissen von Experten sich verändern, so ist das Regelwerk entsprechend anzupassen. Abhängig von der Komplexität und der Dokumentation der Wissensbasis sowie von der Flexibilität des Expertensystems zeigt sich hier, wie umfangreich der Automatisierungsgrad kontinuierlich in der Betriebsphase aufrechterhalten werden kann. Ganz wesentlich ist also, dass allen Beteiligten bis hin zum Experten der Gesamtprozess der Regelbildung bekannt ist, damit Ideen und Veränderungspotentiale von Anfang an und kontinuierlich eingebracht werden können. [KK06], [WEG07]

### **3.3.3 Konzepte für das Wissensmanagement bei menschlichen Blockaden**

Durch die Teilautomatisierung entstehen umfangreiche Schnittstellen zwischen System, Anwender und Administrator. Diese Schnittstellen sind bewusst anzugehen, um eine möglichst enge Verflechtung zur erzielen. Dieses Kapitel legt dabei den Fokus auf den Menschen und das Milieu (vgl. Abbildung 17 auf Seite 45) in der teilautomatisierten NC-Programmierung.

#### **3.3.3.1 Probleme bei der Wissensakquisition**

Menschliche Blockaden sind ein wichtiges Thema beim Wissensmanagement, so dass diese Arbeit hier gezielt weiter drauf eingeht. Gerade bei einer Teilautomatisierung steigt die Bedeutung zusätzlich, da zum einen die Wissensakquisition bei einer Teilautomatisierung inten-

siver durch menschliche Blockaden gestört werden kann. Grund hierfür ist eine umfangreiche Interaktion zwischen Mensch und Maschine, die zum grundlegenden Konzept der Teilautomatisierung gehört. Zum anderen können, neben system- und prozessbedingten Gründen, Zugangsblockaden und veraltetes Wissen von Mitarbeitern den erreichbaren Automatisierungsgrad senken, da Informationen fehlen, falsch oder veraltet sein können. Aus diesen Gründen sind menschliche Blockaden gezielt im Wissensmanagementprozess anzugehen, so dass diese abgebaut werden können. Werkzeuge des Knowledge Engineering können helfen, den Zugang zu den Mitarbeitern zu erleichtern [BHS07]. Ein moderiertes methodisches Vorgehen ist hierbei Grundlage, um nicht-personalisiertes, innovatives, transparentes, verifizierbares und erweiterbares Wissen für die Wissensbasen ermitteln zu können.

Einige Methoden zur Förderung des Wissensaustausches und der Wissensnutzung, sowie um menschliche Blockaden von vorne herein zu vermeiden, werden im Folgenden vorgestellt. Diese Methoden eruieren entweder generelles Expertenwissen (Regelwissen) oder fallbezogenes Individualwissen (Faktenwissen) [BHS07], [KC07], [LEH08], [SSP04]:

- Wissen aus Expertendialogen
- Wissen aus dem Dialog zwischen Plenum und Podium
- Lessons Learned und Best Practice Sharing
- Story Telling / Learning History, Wissen aus Erfahrungsgeschichten

Die Externalisierung impliziten Wissens ist ein sozialer Interaktionsprozess. [SCH06] Beispiele für Zugangsblockaden bei Mitarbeiter sind [BIN03], [GÜL03], [GT07], [LEH08]:

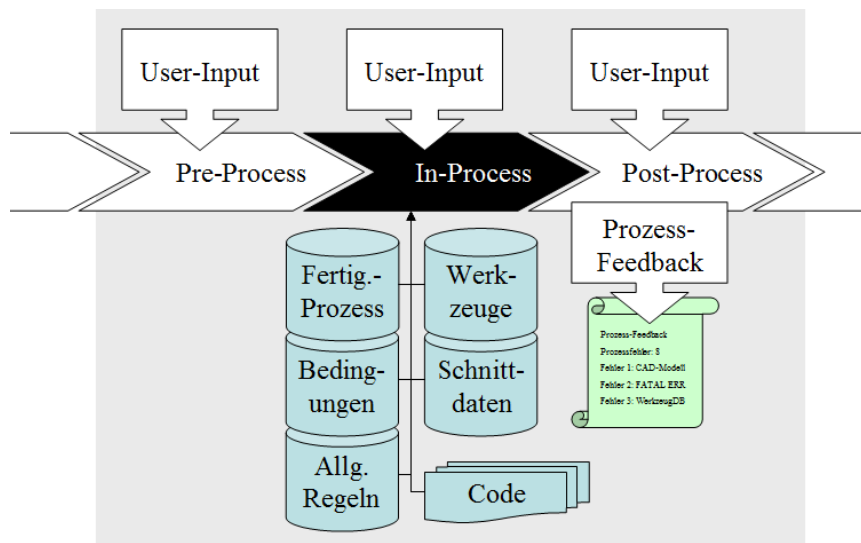
- In-Frage-Stellen von Macht, Status, Funktion, sozialer Stellung, Privilegien
- Negative Erfahrungen bei Veränderungen
- Entwertung des vorhandenen Wissens und Könnens
- Zwang bisherige Gewohnheiten zu verändern
- Überforderung bei Schwächeren (ältere Mitarbeiter, veraltete Ausbildung etc.)
- Machtstrukturen und Machtspiele
- Die harte Arbeit vergangener Jahre ist „nichts mehr wert“
- Mangelnde Fähigkeit, die organisatorische Relevanz des eigenen Wissens zu erkennen

Zur Reduzierung von Blockaden eignen sich Leistungsanreize [GÜL03], [SCH06]:

- Betriebliches Vorschlagswesen
- Entlohnung nach Wissensumschlag bzw. leistungsabhängige Entlohnungskomponente
- Immaterielle Anreize (Aufnahme in Netzwerke, erweiterte Entscheidungsräume)

### 3.3.3.2 Automatisierung muss keine Black Box sein

Der Faktor Mensch ist für eine ganzheitliche Betrachtung von Automatisierungsprozessen ein wichtiger Aspekt. Gerade weil der Mensch durch die Automatisierung teilweise abgelöst wird, eine Vollautomatisierung aber nicht möglich ist, spielen bei der Neueinführung von automatisierten Prozessen psychologische Faktoren mit: Menschliche Ängste führen zu Ablehnung und das Black-Box-Syndrom führt zu Miss-/Unverständnis und Skepsis. [KK06] Selbst das teuerste 3D-CAD/CAM-Programm verpufft zur Wirkungslosigkeit, wenn die Akzeptanz der Mitarbeiter fehlt. [GS96]

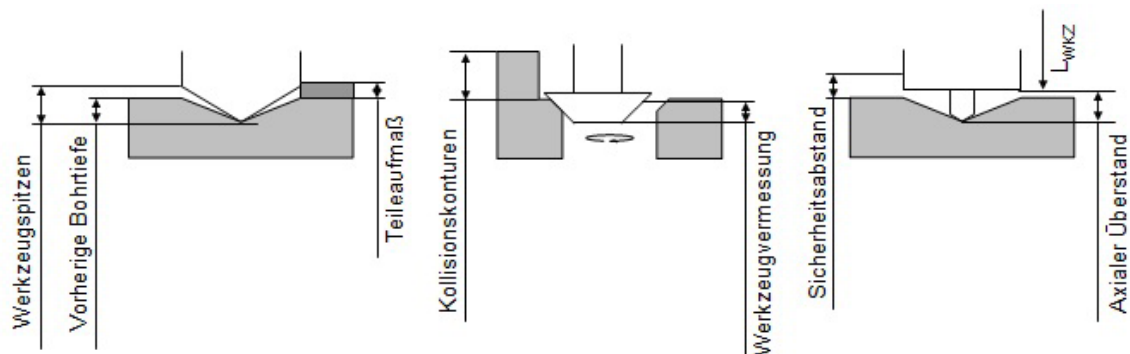


**Abbildung 19:** Eine Automatisierung birgt die Gefahr einer Black Box für den Anwender

Um diese Black-Box-Empfindungen zu verringern und Ängste abzubauen, sind Kommunikation, gemeinschaftliche Entwicklung und ein transparentes System absolut wichtig. Hierdurch wird oft über den Gesamterfolg der Entwicklung entschieden, da während dieser Phase das Anwenderfeedback sehr wichtig und in der Nutzungsphase die Akzeptanz des Systems bedeutend für die effiziente Nutzung ist. Mehr dazu schreiben Klar et al. [KK06, Kap. 9].

Neben dem Effekt des Black-Box-Empfindens während der Entwicklungsphase treten auch Black-Box-Effekte in der Betriebsphase auf. Eine Vollautomatisierung konnte bereits hinreichend ausgeschlossen werden, wodurch eine Interaktion mit dem Anwender notwendig wird. Durch das Eingreifen des Anwenders können notwendige und optimierende Maßnahmen durchgeführt werden, die zum Erfolg und zur Steigerung des Erfolgs beitragen. Darüber hinaus sind Maßnahmen möglich, die nur scheinbar oder auch offensichtlich *nicht* diese Ziele unterstützen, eigentlich jedoch kontraproduktiv auf die Gesamtwirtschaftlichkeit Einfluss nehmen. Dies geschieht bei falsch interpretierten Situationen aufgrund von zu komplexen Regelergebnissen, die zugleich intransparent dargestellt werden.

Ein Beispiel soll dies verdeutlichen (Abbildung 20 stellt die relevanten Maße aus dem Beispiel zudem grafisch dar): Die NC-Automatisierung beachtet alle Einflüsse für die Berechnung des Sicherheitsabstandes beim senkrechten Anfahren im Eilgang oder beim Zurückziehen für vertikales Verfahren und Zustellen: Länge der Werkzeugspitze, Vorherige Bohrtiefe, Teileaufmaß, Kollisionskonturen, Werkzeugvermessungspunkt(e), Mindest-Sicherheitsabstand, überstehende Werkzeugkonturen in axialer Richtung (beispielsweise aufgrund von feststehender Geometrie bei geführten Werkzeugen: Senker mit Führungszapfen, Bohrer mit Pilotbohrer, Gewindebohrer oder aufgrund von flexibler Geometrie: Gewindebohrer mit Ausgleichsfutter).



**Abbildung 20:** Übersicht über Maße beim Bohrprozess

Formal lässt sich der tatsächliche Sicherheitsabstand wie folgt berechnen:

Tatsächliche Sicherheitsabstand = Mindest-Sicherheitsabstand + Teileaufmaß - vorherige Bohrtiefe<sup>12</sup> + Kollisionskonturen<sup>13</sup> + Werkzeugvermessung + Axialer Überstand

Der Anwender hat das Problem, dass er den einzelnen Wert rechnerisch nur mit großem Aufwand nachvollziehen kann, erschwert zusätzlich z. B. durch Runden von Werten. Vertraut er dem tatsächlichen Sicherheitsabstand, so bleiben Fehler stets unentdeckt, rechnet er nach, so wird es unwirtschaftlich, verändert er den Wert, so greift er unnötigerweise ins System ein, senkt aber sein *gefühltes* Fehlerrisiko.

Das Beispiel zeigt deutlich, wie problematisch eine umfangreiche Automatisierung in Bezug auf das Black-Box-Empfinden des Anwenders sein kann. Schulungsmangel oder Vergessen können diesen Effekt, dass die Automatisierungssoftware nicht verstanden wird, zusätzlich verstärken. Gerade hier ist es erforderlich, dass durch gezielte Softwareentwicklungen der Anwender unterstützt wird, wie z. B. durch Mouseover-Informationsfenster, die Formelzusammenhänge auflösen können.

<sup>12</sup> Bei der vorherigen Bohrtiefe muss beachtet werden, ob und wie weit das derzeitige Werkzeug in die vorhandene Kontur einfahren kann.

<sup>13</sup> Kollisionskonturen haben auch beim Anfahren Einfluss. Sie müssen mit beachtet werden, wenn seitliche Konturen den Mindest-Sicherheitsabstand beim Anfahren unterschreiten würden.



### 3.3.4 Entwurf einer Methodik zur Modellierung der Wissensbasis

Basierend auf den Erkenntnissen der vorherigen Kapitel wird im Folgenden erstmals eine Methodik zur Modellierung der Wissensbasis für eine gezielte 80/20-teilautomatisierte NC-Programmierung entwickelt. Die Methodik untergliedert sich in Anlehnung an Waterman et al. [WAT99], [HW83] in fünf Abschnitte, die nachfolgend vorgestellt werden:

#### 1. Identifizierungsphase

Innerhalb der Identifizierungsphase müssen die Grundanforderung an die Automatisierung und dazu jeweilige Experten identifiziert werden. Zu Beginn ist die Durchführung einer Umfeldanalyse besonders wichtig, um die Einflüsse, die Intensität und die Variantenvielfalt der NC-Programmierung erfassen zu können. Wichtig bei dieser Analyse ist, dass nicht nur der Status Quo erfasst wird, sondern Potentiale identifiziert werden, die die mittelfristige Veränderung des Umfeldes beschreiben; so kann sicher gestellt werden, dass eine nachhaltige Teilautomatisierung aufgebaut wird. Basierend auf dem in Kapitel 3.3.1 vorgestellten Ishikawa-Diagramm in Abbildung 17 auf Seite 45 sind Maschinen, Materialien (sowohl physikalische Werkstoffe und Produkte als auch das digitale CAD-Modelle) und Methoden zu untersuchen. U. a. sind die Variantenvielfalt, geometrische Hauptabmaße, Lage der Bohrungen, Aufbau der Bohrungen und Art der Eintauchfläche der Bohrungen zu erfassen. Weiter sind die Werkzeugmaschinen, die verwendeten Werkzeuge, Spannmittel und die verwendeten Fertigungsstrategien beim Bohren zu analysieren. In der Konstruktion und der Fertigungsplanung ist der Arbeitsprozess, sowie die bestehende CAD/CAM-Methodik und das umgebende Prozessnetz, wie in Kapitel 2.1.1 vorgestellt, zu identifizieren. Grundsätzliche Veränderungen dieser Struktur, sowie Einbindungen der neuen Teilautomatisierung in bestehende Strukturen müssen identifiziert werden. Kapitel 4.1.2.3.2 erarbeitet hier ein grundsätzliches Konzept für die Einbindung einer bestehenden Werkzeugverwaltung, sowie die Ausgestaltung der Werkzeugsuche in der Inferenzmaschine. Unzulänglichkeiten wie ein mangelhafter Datenbestand sind mit zu berücksichtigen und erfordern insbesondere dann eine Teilautomatisierung.

Erfasste mittelfristige Veränderungspotentiale sollten dazu genutzt werden, die Anforderungen zu erweitern, so dass das entwickelte System zukunftsweisend ist. Alle Informationen sind zu bündeln und es ist zu definieren, welcher Automatisierungsgrad sich am meisten eignet. Wissen, dass dabei nicht automatisiert werden soll, ist dennoch zu erfassen und in der Wissensbasis aufzunehmen, um es für den manuellen Prozess und die automatisierte Qualitätssicherung gezielt zur Verfügung stellen zu können. Hierbei kann z.

B. das Feedbacksheet ein Weg sein, um dem Anwender bei Bedarf strukturiert Zugang zu diesem Wissen zu geben.

Die gesamte Umfeldanalyse wird dabei nicht nur für die Wissensbasis durchgeführt, sondern auch für die Inferenzmaschine benötigt.

In der frühen Phase des Systemaufbaus werden beschreibende Werkzeuge in Einzelgesprächen verwendet, wie das Ishikawa-Diagramm, Flussdiagramme und semantische Netze. Hierdurch können Einflüsse, Bedingungen und Beziehungen aufgezeigt und persönliche Prozesseindrücke sowie die Wissens- und Verständnisheterogenität der einzelnen Experten besonders gut erfasst werden. Einzelbeispiele der Experten sind in ein großes Gesamtbild zusammenzuführen, um so die Hauptanforderungen ableiten zu können.

Bereits in der ersten Phase der Wissensakquisition werden durch die Experten individuelle Wünsche und Ideen eingebracht. Diese sind vom eigentlichen Wissen zu trennen. Hintergründe sind zu erfragen, um beispielsweise Inseloptimierungen aus Altsystemen zu identifizieren.

## 2. Konzeptualisierungsphase

Innerhalb der Konzeptualisierungsphase werden die Beziehungen und der Informationsfluss des Wissens bestimmt. Grundsätzliche Funktionsmuster und Regelstrukturen ergeben das Problemlösungskonzept der Inferenzmaschine und bestimmen den Regelaufbau innerhalb der Wissensbasis. Unterschiedliche Meinungen von Anwendern wurden dazu verwendet, die Varianz in der Funktion zu bestimmen und so die Flexibilitätsanforderung zu definieren.

Es muss überlegt werden, wie das zu implementierende Wissen transparent in der Wissensbasis abgelegt werden kann und wie die Verarbeitung der Regelstrukturen während und nach dem Automatisierungsprozess nachvollziehbar in der Inferenzmaschine durchgeführt werden kann. Die Datenstruktur muss so gewählt werden, dass alle Funktionen abgedeckt werden und dabei Veränderungen jederzeit einfach und gezielt im Rahmen der definierten Flexibilitätsanforderung eingebracht werden können.

Noch vor der nächsten Phase ist konkret zu überlegen, wie die Aufteilung zwischen automatisiertem und manuellem Wissen aussieht, so dass der Aufwand in der Formalisierungsphase und als Ergebnis die optimale Gesamtwirtschaftlichkeit erreicht wird.

### 3. Formalisierungsphase

In der Phase der Formalisierung wird durch eine moderierte Expertenrunde die Erarbeitung von organisatorischem Wissen ermöglicht. Gerade für die Glättung von heterogenen Wissensbereichen oder Meinungen ist dieses (sehr zeitaufwendige) Werkzeug sehr gut geeignet. Kommunikationshürden der Vergangenheit können durch gemeinsame Gespräche abgebaut werden, vielfach werden auch Themen aufgearbeitet, die in der Vergangenheit ungelöst blieben. Durch die Dokumentation kann schrittweise ein gemeinschaftliches explizites Wissen aufgebaut werden. Die klassisch logischen Strukturen eines Expertensystems erfordern zusätzlich eine formale Standardisierung, damit im Ergebnis eine transparente und dokumentierte Wissensbasis aufgebaut werden kann. Blockaden bei den beteiligten Experten können allerdings zu weniger optimalen Strukturen und zu Verzögerungen beim Aufbau von organisatorischem Wissen bis hin zu Stillständen führen.

Besonders wichtig ist, dass in dieser Phase der Wissenserarbeitung alle Beteiligten mit dem Konzept der Teilautomatisierung vertraut gemacht werden, so dass gemeinschaftliches Wissen für die Automatisierung formalisiert und Wissen, das manuell eingebracht werden soll, dokumentiert werden kann. Darüber hinaus sollte diese Runde von Fertigungstechnologen genutzt werden, um eine Standardisierung von z. B. Fertigungszyklen und Werkzeugen durchzuführen. Diese Punkte betreffen nicht direkt die Teilautomatisierung, erleichtern diese aber und tragen zur Gesamtwirtschaft, auch über die NC-Automatisierung hinaus, bei.

### 4. Implementierungsphase

Der hier vorgestellte Prozess zur Teilautomatisierung der NC-Programmierung erfordert ein bestehendes CAD/CAM-System mit der Möglichkeit einer vollständigen Integration einer Inferenzmaschine. Die Wissensbasis ist unabhängig zum CAD/CAM-System zu halten, sowohl Software als auch Ablageort sind frei wählbar. Die Verwendung von mehreren Wissensbasen ist dabei durchaus sinnvoll, da bestehende Datenbanken – meist datenintensive Datenbanken – mit weitergehenden Funktionen und Aufgaben angebunden werden können. Einen Ansatz zur Gliederung der Wissensbasis und somit Möglichkeiten zur Teilung in Abhängigkeit vom Abschnitt des Planungsprozesses bietet Tabelle 7. Die Tabelle untergliedert sich dabei in zwei Bereiche die regelintensiven Wissensbasen und die datenintensiven Wissensbasen.

Hervorzuheben ist, dass die datenintensiven Werkzeug- und Schnittdaten vielfach mehr als einfache Daten sind. Unternehmen investieren oft viel Geld in die technologische Aus-

reizung und Optimierung dieser Datenstämme, wie zum Beispiel durch Sonderwerkzeugentwicklung, Schnittwertversuche und Versuche zu Werkstoff-Schneidstoff-Kombinationen. Daher ist dieses Technologiewissen der Wissensbasis zuzurechnen und wird ebenfalls zu 80/20 teilautomatisiert.

Planungsprozessschritt	Wissensinhalte
Klassifizierung	Regeln zur Klassifizierung der Feature-Typen und Varianten
Gruppierung	Bedingungen zur Gruppierung ähnlicher Bohrungen
Fertigungsstrategie	Bedingungen und Priorisierung alternativer Fertigungsstrategien
Werkzeugsuche	Regeln zur Werkzeug- und Schnittwertsuche, -sortierung
Operation	Regeln zur Befüllung der Operationsparameter, des Zykluses. Regeln zur strukturellen Einbindung im CAD/CAM-System
Mapping	Mappingstruktur zwischen Geometrievariablen, Operationsparametern und Werkzeugparametern im CAD/CAM-System, sowie zu Regelvariablen in der Wissensbasis. Hinzu kommen Mappingstrukturen zu weiteren Datenbanken je nach Systemaufbau, wie z. B. einer Werkzeugdatenbank.
Manuelle Nachbearbeitung	Details für die manuelle Nachbearbeitung und Aufbau der Prozess-Zusammenfassung, wie während der Automatisierung mitgeschrieben wird.
Voreinstellungen	Initialisierungs- und Resetdaten
Werkzeugsuche	Werkzeuggeometriedaten, Pflegestatus, Vorzugswerkzeuge
Schnittwertsuche	Schnittwertdaten, Pflegestatus, Werkstoff-Schneidstoff-Kombinatorik
Maschinenzuordnung	Maschinendaten, Aufnahmen, Vorsatzköpfe

**Tabelle 7:** Ansatz zur Gliederung der Wissensbasis

## 5. Test- und Betriebsphase

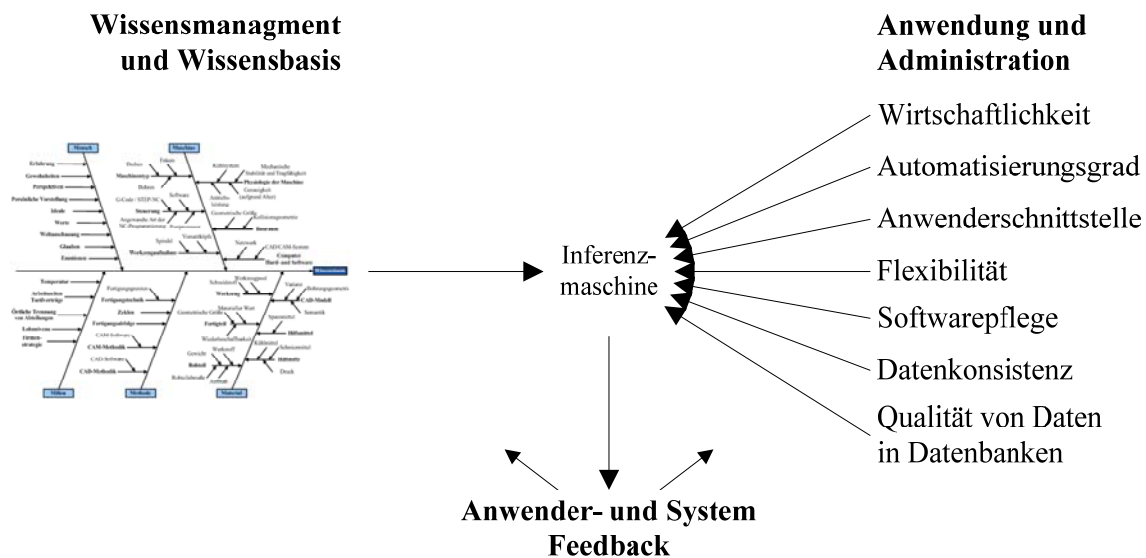
Vor Eintritt in die Betriebsphase muss eine Testphase stattfinden, um Fehler in der Wissensbasis aufdecken zu können. Häufig treten Fehler bei schlussfolgernden Regeln auf, sie erscheinen allein betrachtet zwar formal richtig, erweisen sich im Gesamtregelwerk allerdings als nicht konsistent. Darüber hinaus können Fehler in Grundannahmen (Prämisse), in der Schlussfolgerung, in der Syntax oder in der Inferenzmaschine selbst auftreten. Gerade in der Testphase zeigt sich, wie transparent und allgemeingültig das System aufgestellt ist und inwieweit es vom Anwender angenommen wird. Durch Feedbackgespräche

sind weitere Entwicklungsanforderungen zu identifizieren, um die Gesamtwirtschaftlichkeit weiter zu optimieren.

In der letztendlichen Betriebsphase, in der alle Iterationsschleifen des Software-Engineering und der Wissensakquisition münden, müssen die entwickelten Strukturen allen Anwendern durch Schulung, Dokumentation und Support vermittelt werden. Selbst nach Erreichen dieser Phase ist das Wissensmanagement noch nicht abgeschlossen. Aufgrund des sich stetig verändernden Fertigungsumfeldes ist die Wissensbasis kontinuierlich anzupassen (siehe Abbildung 18, Seite 48).

### **3.4 Anforderungen an die Inferenzmaschine**

In diesem Kapitel sollen die Anforderungen für die Inferenzmaschine erarbeitet werden. Abbildung 21 zeigt hierzu die wesentlichen Einflüsse auf die Inferenzmaschine, neben der Wissensbasis und den weiteren Ergebnissen aus dem Wissensmanagement haben grundsätzliche Punkte im Rahmen für die Systemanwendung und -administration Einfluss, wie die Wirtschaftlichkeit, der Automatisierungsgrad, Anwenderschnittstellen, die Flexibilität (hierbei auch die Einschränkung dieser), die Möglichkeit zur Softwarepflege (Eingeführt als Wartbarkeit), die Datenkonsistenz und allgemein die Qualität der Daten in notwendigen Datenbanken. In Bezug auf Abbildung 21 ist besonders die Weiterentwicklung der Inferenzmaschine aufgrund von Anwenderfeedback hervorzuheben. Veränderungen an der Inferenzmaschine können notwendig werden, wenn die Anwendung, die Administration oder deren allgemeine strategischen Ziele – wie z.B. die Wirtschaftlichkeit – behindert werden. Ursächlich für die notwendige Weiterentwicklung ist eine Veränderung der Einflussgrößen, beispielsweise der Fertigungstechnologie (Maschine, Material und Methode), des Unternehmens (Milieu) oder der Anwender bzw. Administratoren (Mensch) – vgl. bezüglich der Worte in Klammer das Ishikawa-Diagramm in Abbildung 17 auf Seite 45.



**Abbildung 21:** Haupteinflüsse auf die Entwicklung der Inferenzmaschine

Die Anforderungen an die Inferenzmaschine werden im Folgenden in allgemeine Standardanforderungen, basierend auf Kapitel 2 und in speziell für die Teilautomatisierung aufgestellte Anforderungen getrennt.

### Allgemeine Anforderungen an eine wissensbasierte Fertigungsplanung

- Anwendung der Feature-Technologie in einer CAD/CAM-Prozesskette.
- Nutzung der UMF-Methodik innerhalb eines rückwärtsverketteten Planungsprozesses.
- Regeln sind in der Wissensbasis formelbasiert abzulegen. [SAG07]
- Die Inferenzmaschine muss Regeln nach der klassischen Aussagenlogik verarbeiten können. Einzelne Regeln können dabei deklaratives oder prozedurales Wissen enthalten, hierzu gehören formale, logische, mathematische, variable und konstante Elemente.
- Es müssen mehrere Wissensbasen angesteuert werden können, hierzu gehört das PDM-System, die Wissensbasis für die Fertigungsplanung und eventuell eine Werkzeug- und Schnittwert-Datenbank.
- Trennung von Wissensbasis, Inferenzmaschine und CAD/CAM-System.

### Spezielle Anforderungen bei einer 80/20-Teilautomatisierung

- Für die teilautomatisierte NC-Programmierung ist eine CAD-Methodik erforderlich, die auf die manuelle und automatisierte NC-Programmierung ausgerichtet ist und beide Prozesssteile individuell unterstützt. Darüber hinaus wird diese Methodik auch auf CAM-Seite benötigt, so dass der allgemein hohe Automatisierungsgrad realisiert werden kann, hierzu

gehört z. B. eine Standardisierung der Technologien die Automatisiert werden sollen und die Einschränkung der Flexibilität.

- Basierend auf der durchgeführten Umfeldanalyse für die Wissensbasis, um dem Status Quo sowie die zukünftige Entwicklung des CAD/CAM-Umfeldes, der Featuregeometrie, der -semantik und der Fertigungstechnologie zu erfassen, sind weitergehende Überlegungen für die Inferenzmaschine durchzuführen. Die Inferenzmaschine ist auf diese Ergebnisse auszurichten, damit ein nachhaltiges Systems entwickelt wird.
- Die Black Box, die sich dem Anwender bereits in der Entwicklungsphase und bei der Wissensakquisition bieten kann, muss ebenso bei der Inferenzmaschine vermieden werden. Transparenz ist anzustreben, vor allem durch strukturierte Informationen, die dem Anwender zur Verfügung gestellt werden. Bei einer Teilautomatisierung ist dies wichtig, da der Anwender die Ergebnisse der Automatisierung verstehen und bewerten muss. Je höher der Teilautomatisierungsgrad ist, desto umfangreicher muss der Anwender „vorgesetzte“ Ergebnisse bewerten und gezielt manuell eingreifen können.
- In Bezug auf den vorgenannten Punkt sind für einen effektiven Eingriff des Anwenders während der Automatisierung entsprechende interaktive Anwenderschnittstellen zu entwickeln. Der Fokus muss hierbei auf Informationsbereitstellung liegen, da ad hoc ein kleines Detail, erfasst, verstanden, bewertet und manuell bearbeitet werden muss.
- Besondere Anforderungen bestehen für die Werkzeugauswahl. Die aufgezählten Aufgaben bei der NC-Programmierung – Planung der Arbeitsgang- und Arbeitsstufenfolgen, Bestimmung von Werkzeugen und Schnittwerten, sowie Operationsauswahl, -gruppierung, -wegberechnung, -befüllung und -anordnung – sind sehr eng miteinander verbunden und bilden das Herz einer automatisierten NC-Programmierung. Dieser Verbund ist jedoch am schwierigsten in einer automatisierten Fertigungsplanung zu realisieren. In früheren Systemen wurden die Verbindungen der einzelnen Aufgaben oftmals abgeschwächt, häufig zu Lasten der Werkzeugauswahl. Die generischen Laborbedingungen von Forschungssystemen sahen meist passende und/oder nur wenige Werkzeuge vor, so dass Alternativen, fehlende Werkzeuge und Sonderbedingungen oftmals gar nicht beachtet werden mussten. Es zeigt sich vor dem Hintergrund der realen Fertigung, dass eine derartige Simplifizierung nicht zulässig ist. Mit Blick auf die Prototypen der Forschungssysteme, an denen die Funktionalität der Systeme getestet wurde, fällt teilweise die Einfachheit der Geometrien auf. Der Teilepool des Schwermaschinenbaus und die darin enthaltene Geometrievielfalt fordern jedoch ein komplexeres Regelwerk, woraus wiederum verstärkt eine Teilautomatisierung resultieren muss. Als Folge muss eine Werkzeug- und

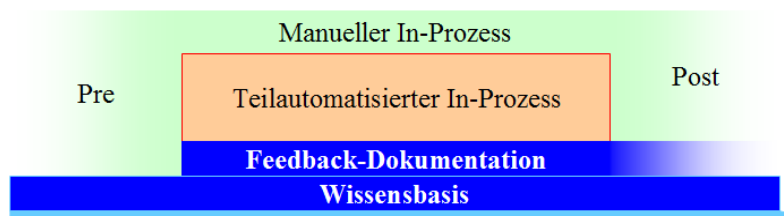
Schnittwertsuche entwickelt werden, die auf eine Teilautomatisierung ausgerichtet ist. Hierzu gehört vor allem auch, dass die Werkzeug- und Schnittwertdatenbank als Teil der Wissensbasis ebenfalls als unvollständig angenommen wird, da ein 100%iger Datenbestand nicht erreicht werden kann (vgl. Kapitel 2.4). [VD93], [CAI07]

- Im Zusammenhang zum vorherigen Punkt folgt die Anforderung, dass manuelle Eingriffsmöglichkeiten bei der Werkzeugauswahl geschaffen werden müssen, um die Teilautomatisierung manuell unterstützen und optimieren zu können.
- Die Inferenzmaschine und die CAD/CAM-Kopplung sind in der Art aufzubauen, dass nach der Anwendung der Automatisierung alle Ergebnisse veränderbar sind, so dass Fehler heraus gearbeitet und Optimierungen durchgeführt werden können.
- Die Inferenzmaschine muss gezielt auf Wartbarkeit ausgerichtet werden und dabei auf die speziellen Bedingungen bei der Teilautomatisierung eingehen. Hierzu gehören die intensiven Anwenderinteraktionen und die Pflege der unvollständigen Wissensbasen. Allgemeine Gründe für die besondere Beachtung der Softwarewartung wurden in Kapitel 2.4 bereits besprochen.



## 4 Ablaufmodell der teilautomatisierten NC-Programmierung

In diesem Kapitel wird, basierend auf der Modellierungsmethodik und den Anforderungen aus Kapitel 3 und der bestehenden Grundlagen aus Kapitel 2 ein Ablaufmodell einer 80/20-teilautomatisierten NC-Programmierung für komplexe Bohrprozesse entwickelt. Das übergeordnete Ablaufmodell, auf das im Folgenden detailliert eingegangen wird, lässt sich dabei wie in Abbildung 22 darstellen. Der automatisierte NC-Prozess wird basierend auf bestehenden Forschungsergebnissen der wissensbasierten Fertigungsplanung zu einem teilautomatisierten In-Prozess weiterentwickelt. Der manuelle Prozess – der soweit dem Autor bekannt ist in dieser Gesamtkomplexität erstmals im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit besprochen wird – umgibt den Automatisierten vollständig. Er gliedert sich in den vorgelagerten Pre-Prozess, den manuellen In-Prozess und den nachgelagerten Post-Prozess. Der kognitiv basierte manuelle und der computerbasierte automatisierte NC-Programmierprozess werden im Verlauf dieses Kapitels eng miteinander verkoppelt, um das Ziel einer hohen Gesamtwirtschaftlichkeit bestmöglich erreichen zu können. Zusätzlich wird eine Feedback-Dokumentation während des In-Prozesses geschrieben, die im Post-Prozess zur Unterstützung des Anwenders bei der manuellen Nacharbeit eingesetzt wird. Alle oben erwähnten Prozesse werden durch das Fundament der Wissensbasis getragen.

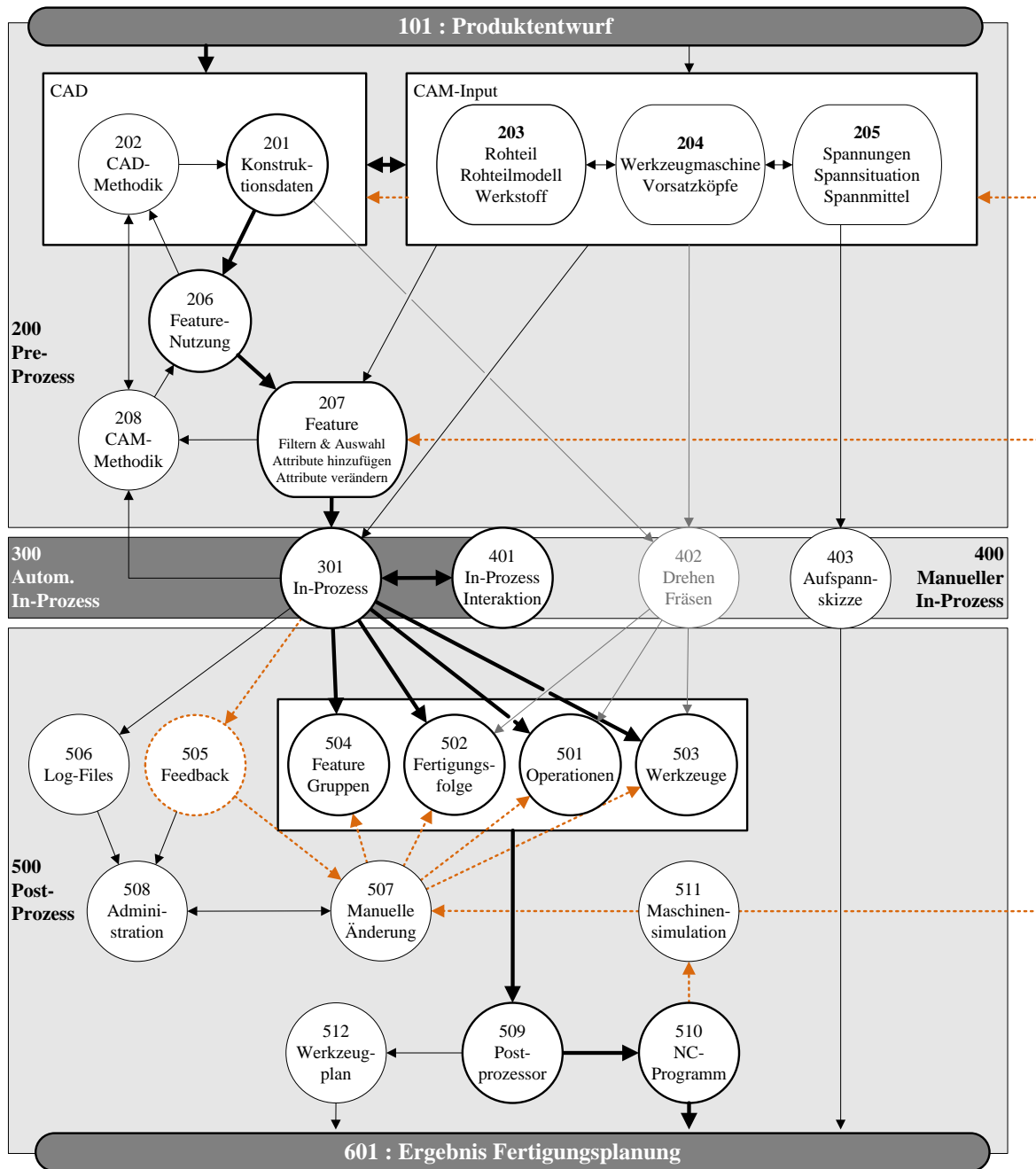


**Abbildung 22:** Übergeordnetes Ablaufmodell der teilautomatisierten NC-Programmierung

Der Pre-Prozess unterstützt die Automatisierung bereits im Vorfeld, so dass grundsätzliche Einflüsse durch den Anwender auf den automatisierten In-Prozess ausgeübt werden können, beispielsweise die Zuordnung der Bohrungen zu Spannungen. Im In-Prozess werden durch manuelle Eingriffe Ergebnisse im Detail beeinflusst, die ohne Eingriff fehlerhafte oder ungenügende Ergebnisse liefern würden. Im Post-Prozess wird dem Anwender ein Feedback über das Ergebnis der Automatisierung gegeben. Mit dieser Dokumentation ist er in der Lage, fehlerhafte Ergebnisse schnell zu finden, zu korrigieren oder Optimierungen im Detail durchzuführen. Die drei Prozessphasen der teilautomatisierten NC-Programmierung werden im Folgenden genauer vorgestellt.

### 4.1 Die Teilautomatisierung im Gesamtprozess

Abbildung 23 zeigt den Gesamtprozess der teilautomatisierten NC-Programmierung. Die in der Abbildung verwendete Nummerierung 2xx, 3xx, 4xx und 5xx kennzeichnet die Bestandteile des Pre-, In- und Post-Prozesses, während 101 und 601 für den Produktentwurf bzw. das Ergebnis der Fertigungsplanung stehen.



**Abbildung 23:** Abläufe innerhalb der teilautomatisierten NC-Programmierung

Die Abbildung legt den Fokus auf den manuellen Teil der NC-Programmierung: 200, 400 und 500. Besonders hervorgehoben wird durch fette schwarze Pfeile der Hauptpfad der teilautomatisierten NC-Programmierung; Feedback und Optimierungsprozesse sind gestrichelt einge-

zeichnet. In den folgenden Unterkapiteln werden, stets in Bezug zu dieser Abbildung, die Details der manuellen Teilprozesse und des automatisierten Teilprozesses erarbeitet. Im folgenden Kapitel wird der manuelle Pre-Prozess (200) besprochen.

#### 4.1.1 Konzept für den Pre-Prozess

Ausgehend vom Produktentwurf (101), wird im Wesentlichen die Konstruktion (201) durch diesen getrieben, aber auch die Fertigungsplanung nutzt Informationen hieraus, wie z. B. Rohteilabmaße und Werkstoffe. Die Konstruktion, beeinflusst durch die CAD-Methodik (202) (vgl. Kapitel 4.2.3), stößt nach Freigabe des Modells und eventuell auch der Zeichnung die NC-Programmierung auf der CAM-Seite an. Das Fertigteilmodell aus der Konstruktion wird assoziativ nach dem Master-Model-Prinzip [SCH03] weiterverwendet, so dass eine assoziative Integration über das CAD/CAM-System besteht. Ein Import über Datenschnittstellen, wie STEP oder IGES, ist ebenso durchführbar.

Auf der CAM-Seite, die beeinflusst wird durch die CAM-Methodik (208), werden zunächst wesentliche Ausgangsbedingungen festgelegt, hierzu gehören Rohteil, Material, Werkzeugmaschine sowie die Aufspannungen (203-205). Rohteile<sup>14</sup> (203) können dabei auf unterschiedlichen Wegen erstellt werden, entweder durch manuelle Rohteilkonstruktion, durch automatisierte Erstellung bei der Fertigteilkonstruktion oder durch Ableitung eines Zwischenmodells aus einer vorausgegangenen CAM-Bearbeitung. Als Werkstoff muss manuell *ein* führender Werkstoff aus der Konstruktionsbaugruppe bzw. aus den Rohteilmaterialien ausgewählt werden, um die wissensbasierte Fertigungsplanung durchführen zu können. Kriterien können hier z. B. Massenanteil, Zerspanungsanteil oder Schnittparametereinflüsse sein. Die Werkzeugmaschine (204) kann entweder durch das System automatisiert gewählt werden, als Wahl der idealen Fertigungsmaschine oder aber manuell, aufgrund der Maschinenbelegungsplanung. Die Maschinenauswahl treiben verschiedenste Parameter, neben Größe und Gewicht des Rohteils auch allgemeine Fertigbarkeit, wirtschaftliche Überlegungen, aktuelle Auslastung und geplante Belegung der Fertigung. Je nach gewählter Maschine sind Achsenanzahl, Steuerung, Zyklen, Werkzeugaufnahmen, Vorsatzköpfe, Stammwerkzeuge und die Geometrie des Bauraums für die weitere Fertigungsplanung als Attribute bzw. Modelle aus der Maschinendatenbank verfügbar.

Nachdem alle grundsätzlichen Randparameter für die NC-Bearbeitung festgelegt sind, kann aus dem Fertigteil eine Auswahl der zu NC-programmierenden Features stattfinden. Die Feature-Erkennung, das Feature-basierte Konstruieren und die Feature-Transformation sind Mög-

---

<sup>14</sup> Es ist auch nur *ein* Rohteil möglich, der Lesbarkeit wegen wird auf den singulären Fall verzichtet.

lichkeiten zur Feature-Nutzung (206), bevorzugt wird hierbei die Feature-Erkennung (vgl. Kapitel 3). Die erkannten Features werden durch Filtern und Auswahl (207) für die weitere Bearbeitung selektiert. Die Auswahl findet dabei u. a. in Abhängigkeit des Arbeitsplan, der Werkzeugmaschine und der Aufspannung statt. Dies ist manuell durchzuführen, weil die kurzfristige Verfügbarkeit von z. B. Werkzeugmaschinen<sup>15</sup> beachtet werden muss; wobei ungeplante Belegung von Maschinen, ebenso wie Maschinenausfälle Einfluss haben. Von den ausgewählten Features können durch manuelle Eingriffe des NC-Programmierers Feature- und Teileattribute verändert, hinzugefügt oder gelöscht werden. Im Folgenden verdeutlichen Beispiele die Möglichkeiten manueller Eingriffe. Der jeweils vorgestellte konkrete Fall ist dabei oftmals automatisierbar, nicht jedoch bei Beachtung der Variantenvielfalt oder der Auftrittshäufigkeit der Ereignisse:

Beispiel für die Verwendung eines Feature-Filters: Mit Hilfe des Feature-Filters können alle Bohrungen, die eine gleiche Ausrichtung haben, gefunden, selektiert und einer Bearbeitungsfolge zugewiesen werden. Bohrungen die in diesem Fertigungsschritt nicht gefertigt werden, weil sie schon gefertigt wurden oder beim Zusammenbau erst noch gefertigt werden, können ebenfalls heraus gefiltert werden – Die Bohrungen befinden sich im Fertigteil, weil nicht nach einzelnen Fertigungsprozessschritten konstruiert wurde (vgl. 2.3.3).

Beispiel für notwendige Veränderungen von Feature-Attributen: Attribute können direkt durch den NC-Programmierer am Modell verändert werden. Erforderlich wird dies, wenn kurzfristige konstruktive Änderungen notwendig werden, beispielsweise wenn die Fertigbarkeit nicht gegeben ist, das Teil aber bereits zur Fertigung bereit steht. Zeitaufwendige Revisionierungsmaßnahmen können so umgangen werden, der „as build“-Zustand wird nachgearbeitet.

Beispiel für notwendige Veränderungen von Teileattributen: Teileattribute betreffen das gesamte Teil. Hierzu gehören z. B. Aufmaße, die durch den Rohteilhersteller festgelegt werden und erst kurz vor der Fertigung bei Anlieferung des Rohteils in die bereits vorgearbeitete NC-Programmierung einfließen.

Alle Daten fließen letztendlich in den In-Prozess (301) ein, der nach Abschluss aller Pre-Prozesse gestartet wird.

#### **4.1.2 Konzept des In-Prozesses der Teilautomatisierung**

Dieses Kapitel geht ausführlich auf den automatisierten (301) und den manuellen (401) In-Prozess ein. Der In-Prozess ist mit dem CAD/CAM-System, in dem Pre- und Post-Prozess

---

<sup>15</sup> Die hier benannten Maschinen werden nicht redundant vorgehalten, zudem wird ein heterogener Maschinenpark unterstellt.

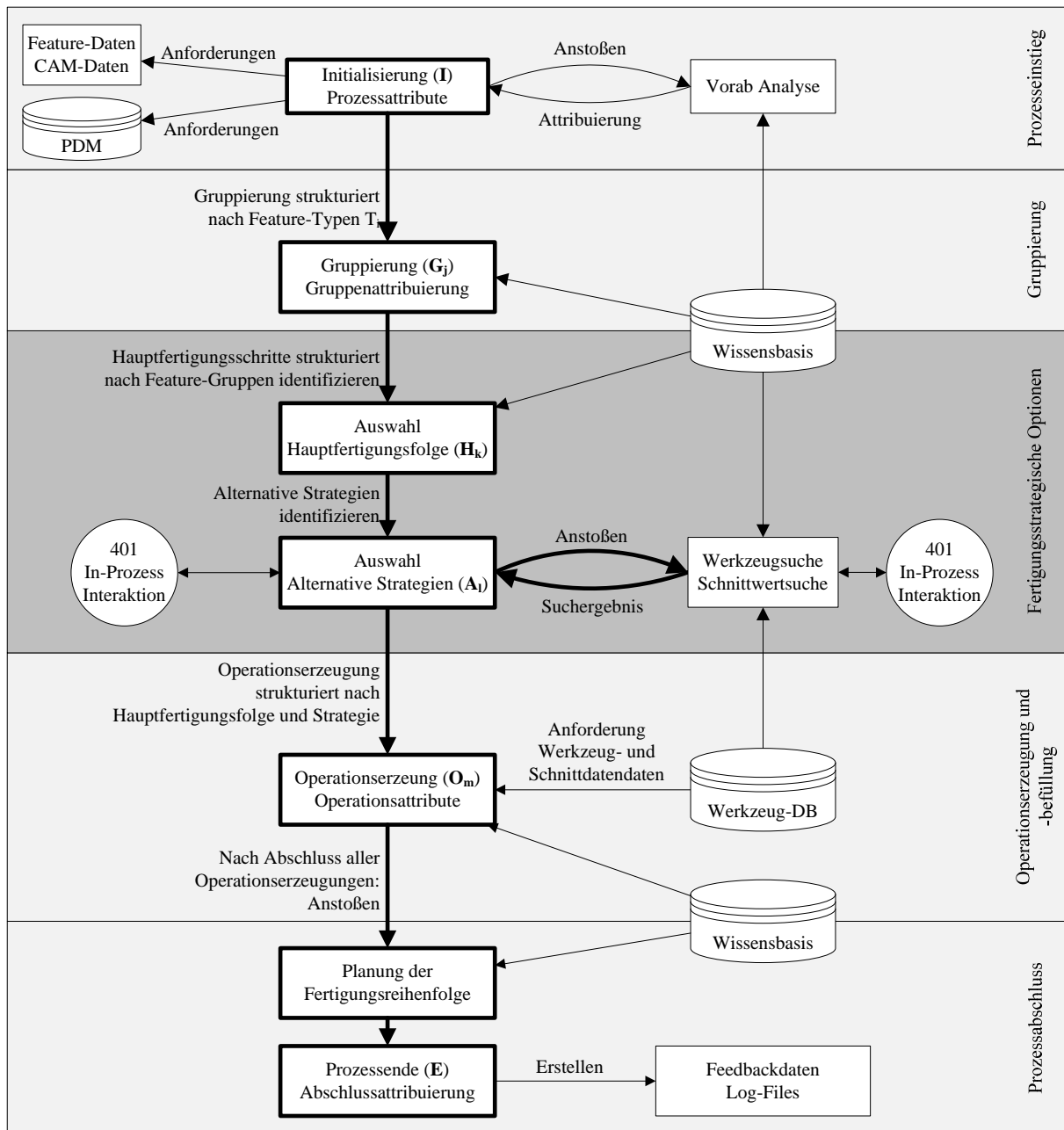
stattfinden, verkoppelt und umfasst das bereits erwähnte Expertensystem, bestehend aus Inferenzmaschine und Wissensbasis. Sowohl die beiden Komponenten des XPS, als auch das CAD/CAM-System werden, wie gefordert, inhaltlich getrennt aufgebaut. Eine Vermischung von Wissen und Wissensverarbeitung oder der CAx-Systeme muss vermieden werden, um eine transparente Struktur zu erhalten und die Systeme z. B. updatefähig zu halten; bei Standardupdates gehen Anpassungen oftmals verloren.

Das im Folgenden vorgestellte Ablaufkonzept des In-Prozesses wurde auf Basis von Kapitel 2 und 3 erstellt. Der automatisierte In-Prozess (301) lässt dabei manuelle Tätigkeiten nicht nur „übrig“, sondern setzt bewusst auf die Vorteile des Anwenders gegenüber einem Computer (vgl. 2.3.2). Besonders hervorzuheben sind daher die im Folgenden vorgestellten Konzepte zur Fertigungsstrategieauswahl und das Gesamtkonzept zur Werkzeug- und Schnittwertsuche. Neben dem In-Prozess ist die rein manuelle CAM-Bearbeitung (402) zu bemerken. Diese muss bei der Fertigungsreihenfolge später mit eingegliedert werden. Parallel zu diesen Tätigkeiten werden die Aufspannungen geplant und Spannskizzen für die Fertigung erstellt (403). Diese Fertigungsplanungsaufgabe wurde für die Bohrbearbeitung nicht automatisiert, da eine Trennung zum Drehen und Fräsen in Fertigungszentren nicht möglich ist. Darüber hinaus sei erwähnt, dass das Aufspannen von Bauteilen bei Großmaschinenherstellern eine individuelle Arbeit ist, die einer eigenen wissenschaftlichen Analyse bedarf und hier nicht weiter vertieft wird.

### **Konzept zur Arbeitsweise der Inferenzmaschine**

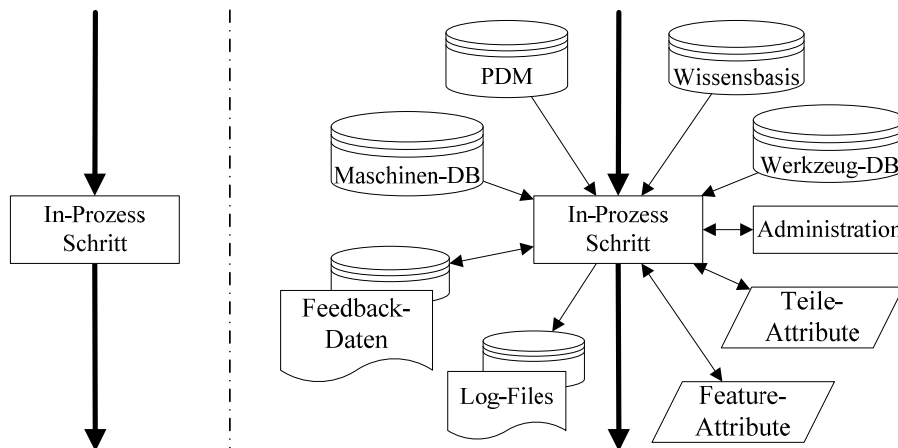
Der In-Prozess (301), detailliert abgebildet in Abbildung 24, besteht aus den Abschnitten Prozesseinstieg, Gruppierung, fertigungsstrategische Optionen, Operationserzeugung und -befüllung, sowie dem Prozessabschluss.

Die Arbeitsweise der Inferenzmaschine verläuft nach dem Top-down-Prinzip. Durch Zerlegung des gesamten Problemkomplexes (Fertigteil) wird letztendlich jedes Detail (Feature) gelöst, wobei der Gesamtüberblick stets gewahrt wird, um eine zusammenhängende, aufeinander abgestimmte Gesamtlösung zu erhalten. Sollten unterschiedliche Bohrungen gleiche oder ähnliche Teilbereiche enthalten, die zu fertigungstechnologisch gleichen Operationen führen, so werden diese später zusammen in der Prozessreihenfolge gruppiert werden. Operationen mit gleichen Werkzeugen werden hintereinander einsortiert, so dass keine zusätzlichen Werkzeugwechsel notwendig werden.



**Abbildung 24:** In-Prozess – Verfeinerung von Punkt 301 aus Abbildung 23

Abbildung 24 zeigt eine Verfeinerung des In-Prozesses (301) aus Abbildung 23 auf Seite 64. Farblich gemeinsam gekennzeichnet sind die Abschnitt 1 und 5 als Prozessstart und Prozessende. Die Abschnitt 2 und 4 stehen für die regelbasierte Erzeugung und Attribuierung, der Abschnitt 3 bildet die Kernanalyse und -fertigungsplanung. Jede Stelle kann durch zusätzliche Beziehungen zu weiteren Stellen verfeinert werden. Zugriffe auf Datenbanken und Schreiben von Ausgabedokumenten wurden auf die wichtigsten Zugriffe reduziert, um den Überblick zu gewährleisten. Die folgende Abbildung 25 zeigt alle optionalen Zugriffe – Schreiben und/oder Lesen, auch mehrfach, ist möglich – einer Stelle auf Datenbanken, Attribute und Dokumente.



**Abbildung 25:** Weitere optionale Interaktionen einer Stelle aus Abbildung 24

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Abschnitte detailliert vorgestellt:

#### 4.1.2.1 Abschnitt Prozesseinstieg

Bei der Initialisierung werden beim ersten Automatisierungslauf Basisprozessdaten und Voreinstellungen der Inferenzmaschine bekannt gemacht, im CAD/CAM-System gesetzt und notwendige Dokumente werden erzeugt. Wurden bereits im Vorfeld Automatisierungsläufe durchgeführt, so werden die Daten entsprechend aktualisiert. Administrative Eingriffe ermöglichen bewusste Veränderungen bei der Initialisierung und auch in den weiteren Abschnitten. Während einer angestoßenen Vorab-Analyse kann eine Rechenzeitvorhersage kalkuliert werden oder der Feature-Pool auf z. B. ähnliche Features untersucht werden, um die weitere Fertigungsplanung zu optimieren. Z. B. kann der Einsatz von Werkzeugen bei bestimmten Kombinationen und Häufigkeiten von Gewindebohrungen optimiert werden. Gewindefräser können wenige unterschiedliche Gewindebohrungen wirtschaftlicher fertigen als mehrere Gewindebohrer – dies ist vorab zu analysieren.

#### 4.1.2.2 Abschnitt Gruppierung

Zu Beginn dieses Abschnitts wird zunächst die Klassifizierungsstruktur der Features bestimmt. Verschiedene Klassifizierungsattribute werden in der Gruppe belegt, um im weiteren Verlauf das Feature einordnen zu können. Die Features werden nach der spezifischen Form, der Anzahl der Stufen, Gewinden, Passungen und anderen Merkmalen klassifiziert. Die Klassifizierung ermöglicht eine einfachere Auswahl von möglichen fertigungstechnologischen Optionen, da vielfach nur noch die wenigen Klassifizierungsmerkmale für Entscheidungen relevant sind. Direkt nach der Klassifizierung kann die Menge an fertigungstechnischen Optionen aufgrund von allgemeingültigen Kriterien, wie Werkzeugmaschine und Werkstoffgrup-

pe, eingeschränkt werden, so dass die Aufstellung von Alternativen Strategien für jedes einzelne UMF bereits im Vorfeld vereinfacht werden kann.

Im Anschluss an die Klassifizierung wird die Gruppierung gleicher und ähnlicher Features durchgeführt. Gleiche bzw. ähnliche Bohrungen sollen dabei in dieselbe Gruppe sortiert werden, so dass lediglich eine Operationsfolge für alle Bohrungen erzeugt werden muss. Die Kriterien zur Gruppierung werden aus der Wissensbasis bezogen, z. B. geometrische Parameter, Toleranzen, Bohrungslage und Spannsituation. Es sind gleiche Werte, ebenso wie variable Wertbereiche oder unbelegte Werte regelbasiert zu gruppieren. Unbelegte Werte müssen mit Standardwerten befüllt werden. Wichtig ist, dass die Eingruppierung von variablen Werten oder Wertbereichen im weiteren Prozess verarbeitet werden kann, beispielsweise muss hierzu die Verarbeitung von Feature-individuellen Formeln in Operationsparametern und die Verknüpfung zu individuellen Feature-Attributen bedacht und ermöglicht werden. Vorteil durch dieses Vorgehen ist, dass weniger Gruppen und Operationen erzeugt werden müssen. Nachteil dieser Wertbereiche ist jedoch, dass im Post-Prozess formale Bezüge die Transparenz senken, da konkrete Werte je Feature eventuell fehlen, bzw. Auswirkungen von Veränderungen nicht überblickt werden können.

#### **4.1.2.3 Abschnitt fertigungsstrategische Optionen**

Alle Features werden auf  $j$  Gruppen verteilt. Je Feature-Gruppe  $G_j$  wird der Abschnitt „Fertigungsstrategische Optionen“ aufgerufen. Attribute der Gruppe, wie z. B. der Gruppenname werden anhand von Regeln aus der Wissensbasis erzeugt und abgelegt.

Zur Ermittlung der fertigungsstrategischen Optionen splittet sich dieser Funktionsbaustein in zwei funktionale Bereiche, der Bestimmung der Hauptfertigungsfolge und der der Alternativen Strategien. Die Hauptfertigungsfolge ermöglicht es, semantische Feature-Elemente in die Fertigungsstrategie einfließen zu lassen, die im UMF nicht verarbeitet werden würden, hierzu gehören z. B. die auf Basis der CAD-Methodik nicht konstruierten Geometrien. Darüber hinaus ist es möglich für ein Feature eine überbeschriebene Fertigungsstrategie zu definieren, zum Beispiel bevorzugtes Bohren der oberen Stufe einer Stufenbohrung vor der unteren.

Für alle Gruppen  $G_j$  eines Typs  $T_i$  ist die Hauptfertigungsfolge  $H$  gleich. Die aus der Wissensbasis bezogene Hauptfertigungsfolge setzt sich aus  $k$ -Elementen zusammen, wobei für jedes Element  $H_k$  die Alternativen Strategien  $A_l$  basierend auf den Bedingungen der Wissensbasis ermittelt werden. Kriterien für die Suche der  $A_l$  können u. a. geometrische und semantische Feature-Attribute, Allgmeintoleranzen, Rohteilmaße und die Spannsituation sein. Für die Auswahl einer Alternativen Strategie aus allen bei der Suche gefundenen, sind die Ergebnisse der Werkzeugsuche, Werkstoff-Schneidstoff-Kombinationen und Prioritätskennner hin-



zuzuziehen. Die folgenden Unterkapitel erarbeiten diese für eine Teilautomatisierung wesentlichen Punkte eingehender.

#### **4.1.2.3.1 Die Einführung der Hauptfertigungsfolge**

Um den Planungsprozess nach Abschluss des automatisierten Teils bei der manuellen Nachbearbeitung gut nachvollziehen zu können, für die Unterstützung des Administrators bei der Fehlersuche sowie Optimierung und für die folgenden Beispiele, wird eine Benennungslogik für die Hauptfertigungsfolge eingeführt:

Die Hauptfertigungsfolge setzt sich syntaktisch aus den drei Attributen Fertigungsfolgennummer, Hauptgeometrieform und Stufe, getrennt mit einem Doppelpunkt zusammen. Die Hauptfertigungsfolge H gibt die konkrete Reihenfolge der Abarbeitung von nicht konstruierten Geometriebereichen und konstruierten Geometriebereichen einer Stufe vor (Bsp.: 1:O:1). Im Folgenden werden folgende Hauptgeometrieformen eingeführt:

O: Bohrung, Kreistasche oder allgemein eine zylindrische konstruierte Geometrie mit oberen und unteren Abmaß und einer definierten Oberflächengüte

T: Attribuiertes Gewinde

P: Attribuierte Passung

S: Freie rotationssymmetrische nicht konstruierte Geometrie, z. B. Fase oder Kantenbruch

Eine Hauptgeometrieform kann in jeder Stufe ein Mal verwandt werden, einer Stufe können dabei mehrere unterschiedliche Hauptgeometrieformen zugeordnet werden. Es verbieten sich jedoch einige kombinatorische Verwendungen von Hauptgeometrieformen, da sie nicht gefertigt werden könnten, wie beispielsweise Passung und Gewinde in einer Stufe.

#### **4.1.2.3.2 Das Werkzeug- und Schnittwertsuchkonzept**

In Abhängigkeit vom Werkzeugbestand eines Unternehmens ergeben sich für den Planungsprozess grundlegend unterschiedliche Anforderungen für die allgemeine Werkzeugsuche. Bei Sonderwerkzeugen gibt es vielfach zu einem einzigen Feature nur ein exakt passendes Werkzeug. Hingegen kann bei einem Unternehmen, das vorwiegend Standardwerkzeuge und einen Park von unterschiedlichen Maschinen nutzt, ein großer Pool an Werkzeugen mit einer Reihe von Alternativen bestehen. Für die Wahl der Alternativen Strategien werden somit unterschiedliche Konzepte benötigt, grundsätzlich muss jedoch eine Werkzeugsuche durchgeführt werden. Die Werkzeug- und Schnittwertsuche bildet dabei, aufgrund eines großen Einflusses auf die Fertigungstechnologiewahl, ein sehr wichtiges Element im gesamten automatisierten NC-Programmierprozess – Wird kein Werkzeug gefunden, wird nicht gefertigt; wird ein nicht optimales Werkzeug gefunden, wird unwirtschaftlich gefertigt.

Die Werkzeugsuche, die für die Teilautomatisierung in dieser Arbeit angenommen wird, findet im realen Standard-Werkzeugpool unter nicht idealen Bedingungen statt. Es muss mit (zum Teil) nicht gepflegten Werkzeugen, Vorzugswerkzeugen, individuellen Wunschwerkzeugen<sup>16</sup> und unvollständigen Werkzeugsuchkriterien gearbeitet werden. Die Werkzeugsuche wird daher nicht immer erfolgreich sein, erfordert somit manuellen Eingriff und ist daher im Besonderen relevant für diese Arbeit. Die im Folgenden vorgestellte Werkzeugsuche wurde daher gezielt für eine Teilautomatisierung der NC-Programmierung von komplexen Bohrprozessen entwickelt.

Im Folgenden werden einzelne Schritte erläutert, die notwendig sind, um das individuell beste Werkzeug mit den passenden Schnittdaten für eine einzelne Fertigungsoperation zu finden. Was im Detail das *beste* Werkzeug ausmacht, welche Einflüsse Suchkriterien, Wirtschaftlichkeit, Fertigungszeit und strategische Parameter haben, wird darüber hinaus erarbeitet:

### **1. Einschränkung des Werkzeugpools**

Alle im Folgenden aufgelisteten Suchkriterien werden in einer Suchbedingung logisch verknüpft und über die Werkzeugdatenbankschnittstelle an die Werkzeugdatenbank übergeben. Die Suche für ein Werkzeug kann dabei auch mehrfach hintereinander stattfinden, wenn z. B. Werkzeugsuchkriterien automatisiert verändert werden. Die Datenbank liefert anhand der übergebenen Anforderung eine Liste an Werkzeugen, inklusive aller geforderten Werkzeugparameter. Diese Liste ist noch ungeordnet, bevorzugte Werkzeuge sind noch nicht identifiziert. Im zweiten Schritt, wie in dieser Arbeit auch dargestellt, wird die Liste daher weiter bearbeitet, um das optimale Werkzeug zu finden.

#### **Suchkriterium: Werkzeugklasse und -gruppe**

Die Werkzeuge sind in der Datenbank in Klassen und Gruppen geordnet, anhand derer eine grobe Beschränkung auf einen Teil der Werkzeuge möglich ist.

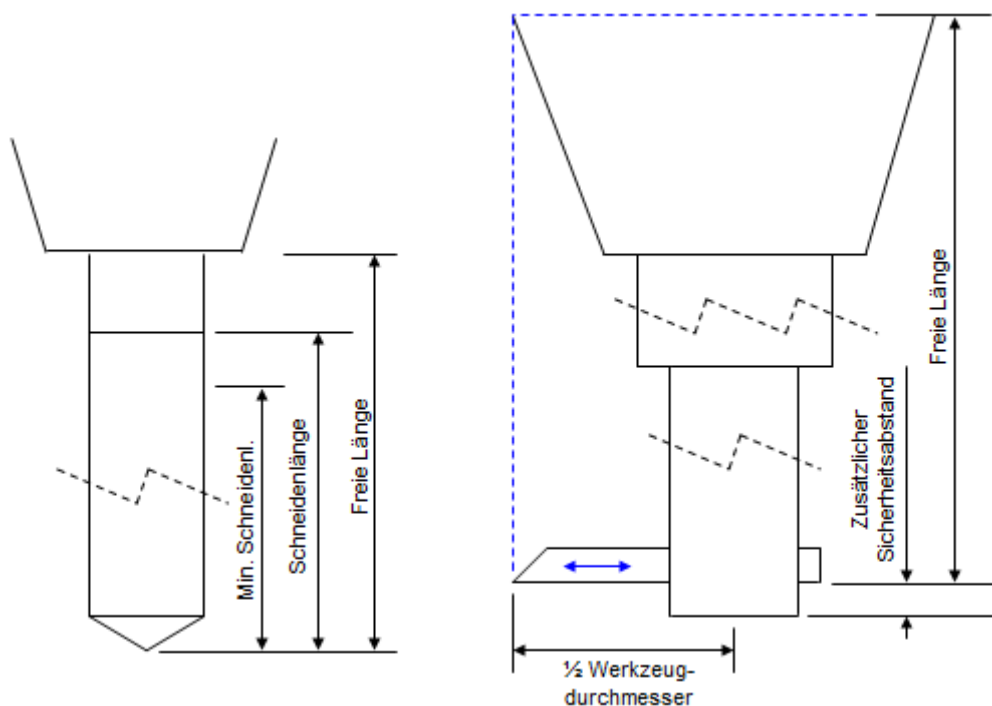
#### **Suchkriterium: Bedingungen der aktuellen Fertigungsoperation**

Die geometrischen und semantischen Bedingungen des Features, die im direkten Bezug zum aktuell behandelten Hauptfertigungsfolgeschritt und des gewählten Features bzw. der gewählten Feature-Gruppe stehen, bilden einen wesentlichen Bestandteil der Werkzeugauswahlkriterien. Hierbei seien beispielhaft die gängigen geometrischen Kriterien wie Werk-

---

<sup>16</sup> Wunschwerkzeuge sind Lieblingswerkzeuge eines einzelnen Anwenders oder einer Gruppe von Anwendern. Die Verwendung ist dabei nicht oder nur unzureichend fachlich begründbar.

zeugauskraglänge, Fasen, Schneidlänge und Werkzeugdurchmesser erwähnt. Zusätzliche Kriterien für die Werkzeugwahl sind: Angaben zu Gewinden, wie Gewindetyp, Steigung, Gangzahl, Drehrichtung und Flankenwinkel, als auch zu Passungen, wie das Passmaß bei Reibahlen. Zusätzlich zu den Nennmaßen müssen Toleranzen mit einbezogen werden, sowohl konstruktiv begründete als auch solche aufgrund von Maßgenauigkeitsunterschieden zwischen Modell und Datenbanken. Beispielhaft sei hier das Runden von umgerechneten zölleischen Maßen bei UNC-Gewinden<sup>17</sup> benannt, die eine minimale Wertabweichung zwischen Geometrieattribut und Werkzeugparameter hervorrufen können. Weitere Bedingungen sind Kollisionsmaße und Spitzenwinkel. Kollisionsmaße bilden eine erste Möglichkeit, um die Sicherheit bei der Werkzeugwahl zu erhöhen. Die freie Länge z. B. definiert die Länge des Werkzeuges von der Spitze bis zu dem Punkt, an dem das Werkzeug einen Durchmesser größer dem Durchmesser des schneidenden Werkzeugbereichs hat. Abbildung 26 verdeutlicht dies.

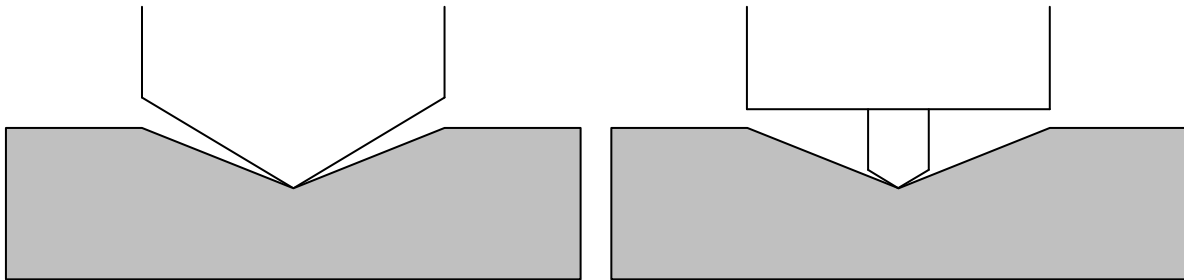


**Abbildung 26:** Maße bei Bohrer (links) und verstellbarem Spindelwerkzeug (rechts)

Der Spitzenwinkel definiert den Grund eines Features, das Werkzeug muss diesem jedoch nicht zwingend entsprechen. Bei Durchgangsbohrungen beispielsweise spielt der Spitzenwinkel der Werkzeuge keine Rolle, die Führung der Werkzeuge ist hierbei wiederum sehr wichtig. Sinnvoll ist es bei anbohrenden Werkzeugen, stets eine selbstführende Spitze zu wählen, d. h. eine Spitze deren Spitzenwinkel kleiner  $180^\circ$  ist. Darüber hinaus sollte das Werkzeug

<sup>17</sup> Die Abkürzung UNC steht für Unified National Coarse, ein vereinheitlichtes zölleisches Grobgewinde.

aber auch einen möglichst großen Spitzenwinkel besitzen, damit das nachfolgende Werkzeug mit einem kleineren oder gleich großen Winkelmaß geführt werden kann. Abbildung 27 zeigt dies anschaulich:



**Abbildung 27:** Spitzenführung von Bohrwerkzeugen

Die beschriebenen Details werden den einzelnen Operationen über die Wissensbasis als geometrische und semantische Werkzeugwahlkriterien zugewiesen.

#### **Suchkriterium: Bedingungen nachfolgender Fertigungsoperationen**

Eine Fertigungsoperation kann ausschließlich im Kontext mit den nachfolgenden und vorher durchgeführten Fertigungsoperationen zur richtigen Gesamtlösung führen. Aus diesem Grund werden beim rückwärtsverketteten Planen der Operationen, d. h. auch bei der Werkzeugsuche, Bedingungen der nachfolgenden Operationen an die vorherigen Operationen im Fertigungsprozess weitergegeben. Die Verwendung von Bedingungen entgegengesetzt zur Fertigungsreihenfolge darf aber nur optional verwendet werden, da beispielsweise eine Werkzeugsuche für eine Vorbohroperation von der Durchmesserbedingung einer Gewindeform-Operation beeinflusst wird, die Werkzeugsuche einer Anzentrieroperation jedoch nicht.

#### **Suchkriterium: Bedingungen zur gewählten Maschine**

Neben den rein geometrischen Werkzeugauswahlparametern müssen Werkzeugauswahlkriterien für z. B. die maschinenspezifische Werkzeugaufnahme oder eine eventuelle Innenkühlung mit eingearbeitet werden. Hierbei muss zusätzlich beachtet werden, ob und wenn ja, welche Vorsatzköpfe auf der Maschine eingesetzt werden, da sich hierdurch wiederum die Bedingungen ändern können.

#### **Suchkriterium: Werkstoff-Schneidstoff-Kombination**

Bei der Werkzeugsuche ist die Beachtung der Werkstoff-Schneidstoff-Kombination sehr wichtig, da hierdurch ganze Gruppen von Werkzeugen aussortiert werden können. Werkzeuge, bei denen ein Schnittwertdatensatz vorhanden ist oder die einen Leerwertkennner zur Erst-

befüllung besitzen, werden für die weitere Werkzeugauswahl zugelassen. Konzepte zur Befüllung dieses Datensatzes finden sich in Kapitel 4.2.2 zur Datenqualität und -quantität von angebundenen Wissensdatenbanken.

### **Suchkriterium: Strategische Sucheinflüsse**

Nicht zuletzt kann auf die Werkzeugsuche durch strategische Voreinstellungen Einfluss genommen werden. Über Statuskenner ist es möglich, Werkzeuge grundsätzlich vom Gebrauch auszuschließen oder diese besonders für den Prozess zu qualifizieren (gesperrte Werkzeuge bzw. Versuchswerkzeuge). In Kapitel 4.2.2 wird der Statuskenner zu geometrisch und schnittwerttechnologisch ordnungsgemäß gepflegten Werkzeugen eingeführt. Dieser Status kann zur grundsätzlichen oder priorisierten Suche verwendet werden, so dass Werkzeuge mit diesem Status ausschließlich oder bevorzugt herangezogen werden.

### **Suchkriterium: Variable Suchparameter**

Die bisherigen Suchkriterien sind von einer statischen Werkzeugdatenbank ausgegangen, in der keinerlei Veränderungen an bestehenden Werkzeugen stattfinden. Tatsächlich jedoch sind Werkzeuge enthalten, die sich geometrisch verändern. Die Verwaltung nachschleifbarer oder verstellbarer Werkzeuge muss im Zusammenhang zum automatisierten NC-Programmierprozess eingehender betrachtet werden. Ein Suchkonzept wird hierzu erstmals – nach bestem Wissen des Autors – vorgestellt. Zum besseren Verständnis ist die in diesem Kapitel bereits eingebrachte Abbildung 26 auf Seite 73 hinzuzuziehen:

Bei so genannten *verstellbaren Werkzeugen* verändert sich der Werkzeugdurchmesser durch Verstellen der Schneide. Da der Werkzeugdurchmesser stets als exaktes Kriterium gesucht wird, ist es sinnvoll, für jedes Werkzeug mit einem anderen eingestellten Durchmesser eine neue Werkzeugnummer zu vergeben, dies auch aus Gründen der Verwechslungsgefahr beim gleichzeitigen Einsatz in einer Maschine. Darüber hinaus können sich beim Verändern des Werkzeugdurchmessers Längenwerte mit verändern, wie z.B. die freie Länge beim Spindelwerkzeug in Abbildung 26 auf Seite 73.

Anders verhält es sich mit *nachschleifbaren Werkzeugen*, diese werden durch Schleifvorgänge beim Schärfen immer kürzer, wobei die Längenabnahme grundsätzlich keiner Regel unterliegt, sondern von der Werkzeugabnutzung abhängt. Werkzeuge, die anfangs eine definierte Schneidenlänge besaßen, haben nach dem ersten Schleifvorgang teils nur einige, aber beim Bohren vielleicht entscheidende Millimeter weniger Schneidenlänge. Bei der Kollisionsbetrachtung ergeben sich zudem Schwierigkeiten, da bei der Maschinensimulation die reale

Länge eines Bohrwerkzeuges nicht bekannt ist. Die Verwaltung jedes geschliffenen Werkzeuges in einem eigenen Datensatz ist nicht praxisorientiert, da hierdurch ein enormer Verwaltungsaufwand erforderlich werden würde. Werkzeuge, die anfangs Schwesterwerkzeuge waren, würden bereits bei einem Längenunterschied von einem Millimeter getrennt voneinander betrachtet werden, obwohl beide Werkzeuge in den meisten Fällen gleiche Dienste leisten könnten. Einen Ausweg bildet das im Folgenden vorgestellte Konzept, welches eine Mindestschneidenlänge, formal berechnet aus der Ursprungsschneidenlänge, vorsieht. Solange sich Werkzeuge in dem sich daraus ergebenden Toleranzfeld bewegen, werden sie unter der gleichen Werkzeugnummer geführt. Unterschreiten Werkzeuge dieses Toleranzfeld, erhalten sie eine neue Werkzeugnummer und eine neue Mindestschneidenlänge. Bei der Werkzeugsuche innerhalb des automatisierten Prozesses wird grundsätzlich nach der Mindestschneidenlänge gesucht, so dass die Einsatzlänge eines verwendeten Bohrers verkürzt ist. Wird bei der Werkzeugsuche kein Werkzeug gefunden, wird die Mindestschneidenlänge automatisiert durch die Schneidenlänge als Werkzeugsuchkriterium ersetzt und eine neue Suche durchgeführt. Zur Sicherung der Fertigungsqualität wird eine Meldung für den Post-Prozess aufgespeichert, dass Kollisionsgefahr besteht. Ein nachträglicher manueller Wechsel nach Überprüfung durch den NC-Programmierer ist dann gezielt möglich. Die Werkzeugvoreinstellung erhält zusätzlich automatisiert über den Werkzeugplan (512) die Information über die Werkzeugeinsatztiefe, so dass diese ein genügend langes Werkzeug aus dem Pool der nachgeschliffenen Schwesterwerkzeuge verwendet.

Dieser Ansatz, dass Kriterien automatisiert verändert werden, kann auf *alle Bohrwerkzeuge*, auch auf die nicht nachschleifbaren, übertragen werden. Wird kein Werkzeug gefunden, welches die genügende Schneidenlänge besitzt, so kann die Schneidenlänge durch die „Freie Länge“ als Werkzeugauswahlkriterium ersetzt werden. Die Werkzeuge können bis zur ersten Kollisionsgeometrie in das Werkstück eintauchen, lediglich die Spanabfuhr muss durch Reversieren gesichert werden. Dieser Schritt erfordert eine manuelle Kontrolle und Nacharbeit durch den NC-Programmierer, da die Zyklusparameter (Schnitttiefen, Degression, Mindestbohrtiefe) auf die Gesamtsituation eingestellt werden müssen. Dies ist für eine Automatisierung nicht weiter untersucht worden, da der Fall äußerst selten auftritt. Es wird lediglich eine Meldung für den Post-Prozess aufgespeichert.

## **2. Sortierung des Werkzeugpools**

Die noch ungeordneten Werkzeuge werden anhand von definierten Sortierkriterien, die in der Wissensbasis je nach Werkzeugsuche und Operation individuell festgelegt werden, aufstei-

gend oder absteigend sortiert. Zu den Sortierkriterien zählen vorwiegend geometrische Kriterien der Werkzeuge, allerdings sind auch Schnittwerte als ein untergeordnetes Kriterium möglich. Zur Sortierung werden darüber hinaus auch Statuskenner verwendet, die Werkzeuge mit bestimmten Kennern an den Beginn der Liste oder an das Ende sortieren (Kenner für Kosten bei der Werkzeuganschaffung, Verfügbarkeit und Bestand des Werkzeuges oder der Pflegestand des Datensatzes ist möglich – siehe Kapitel 4.2.2). Nach dieser Sortierung sind, geordnet nach der Einsatzpriorität, verwendbare Werkzeuge gefunden worden, jedoch sprechen Kriterien der nächsten Abschnitte nicht immer für die direkte Wahl des ersten Werkzeuges.

### 3. Bevorzugte Werkzeuge

In der Praxis zeigt sich, dass die theoretisch besten gefundenen Werkzeuge nach Auswahl und Sortierung nicht stets auch die besten für die Fertigung sein müssen. Mehrere Szenarien aus der Praxis führen dazu, dass drei Pools an bevorzugten Werkzeugen erforderlich sind, um die Gesamtwirtschaftlichkeit und auch die Zufriedenheit der Prozessbeteiligten weiter zu verbessern. Die drei Pools werden im Folgenden Prio-, Stamm- und Used-Werkzeuge genannt. Nach einem abgeschlossenen Suchlauf wird daher innerhalb des sortierten Pools an verwendbaren Bohrwerkzeugen nach bevorzugten gesucht.

*Prio-Werkzeuge* sind einer einzelnen Operation, meist aufgrund einer besonderen Geometrie zugeordnet. Diese Sonderoperationen erfordern aufgrund von speziellen Kollisionskonturen oder aufgrund der Feature-Form bestimmte für diesen Zweck angeschaffte Werkzeuge. *Stammwerkzeuge* sind Werkzeuge, die grundsätzlich im Werkzeugspeicher der Maschine eingesetzt sind, so dass bei Nutzung dieser Werkzeuge die Werkzeugvoreinstellung und Bestückung der Maschine entfällt. *Used-Werkzeuge* sind die Werkzeuge, die innerhalb des zu bearbeitenden Teils bereits verwendet wurden. Es ist sinnvoll, innerhalb der Fertigung eines Teils ein Werkzeug mehrfach einzusetzen, da Werkzeugwechselzeiten und die gesamte Anzahl an Werkzeugen reduziert werden können.

Die Priorisierung unter diesen bevorzugten Werkzeugen sollte so gewählt werden, dass Prio-Werkzeuge, wie z. B. Sonderwerkzeuge, als erste benutzt werden. Gefolgt werden diese von Stammwerkzeugen, da diese durch die Präsenz in der Maschine grundsätzlich Kosten für die Werkzeugvoreinstellung einsparen. An dritter Stelle stehen die Used-Werkzeuge, da diese gegenüber noch nicht eingesetzten Werkzeugen ebenfalls Kosten einsparen.

#### **4. Deckelung der Ergebnisse**

Bei der Werkzeugsuche können aufgrund von einseitig offenen Werkzeugwahlkriterien (Bsp.: Schneidlänge > 30) teilweise sehr viele Werkzeuge gefunden werden. Dies bringt Probleme bei der Handhabung, falls es zur manuellen Auswahl in späteren Werkzeugauswahlschritten kommen sollte. Durch eine Deckelung der einseitig offenen Kriterien kann die Anzahl der gefundenen Werkzeuge eingeschränkt werden. Durch Untersuchungen in der Validierungsphase dieser Arbeit konnte jedoch kein allgemeingültiger Zusammenhang (z. B. Schneidlänge < 5\*30) als zweckerfüllend gefunden werden, so dass an dieser Stelle der Werkzeugsuche lediglich eine Kürzung der Ergebnisliste auf eine bestimmte Anzahl an Ergebnissen stattfinden sollte.

#### **5. Manueller Eingriff bei der Werkzeugauswahl**

Nach Durchlauf aller bisher beschriebenen Prozessschritte zur Werkzeugsuche würde das Werkzeug, welches am Anfang der Ergebnisliste steht oder ein Bevorzugtes falls gefunden, gewählt werden. Sollte im Pre-Prozess die Anwenderinteraktion im In-Prozess nicht ausgeschlossen worden sein, kann die Werkzeugauswahl zusätzlich durch den NC-Programmierer manuell unterstützt werden. Ein manueller Eingriff wird erforderlich, wenn wie im vorherigen Kapitel erläutert, ungepflegte Schnittdaten vorgefunden werden. Aus der gekürzten Liste der möglichen Werkzeuge wird hierzu eine Vorschlagsliste für einen Anwenderdialog generiert. Dabei wird neben den wichtigsten Geometriewerten auch eine Information ausgegeben, die anzeigt, ob das jeweilige Werkzeug Technologiedaten besitzt oder nicht. Für den Fall, dass die Anwenderinteraktion im In-Prozess ausgeschlossen wurde, wird automatisiert das erste Werkzeug angezogen und ein entsprechendes Feedback zur manuellen Nacharbeit im Post-Prozess dokumentiert. Kapitel 4.1.2.3.3 gibt ein Beispiel hierzu.

#### **6. Abspeichern der Ergebnisse**

Zuletzt sind die ermittelten Daten und gewählten Werkzeuge auf Gruppenebene als Attribute abzulegen. Die eigentliche Zuordnung der Werkzeuge zu den Operationen kann erst erfolgen, wenn die Operationen erzeugt wurden. Bei der Abspeicherung sollten sowohl die konkrete Werkzeugwahl als auch die Suchparameter und die Suchanfrage abgespeichert werden, damit diese Ergebnisse zu späteren Zeitpunkten – im Post-Prozess – wieder verwendet werden können und der Weg der Werkzeugauswahl für den Administrator bei einer Systempflege nachvollziehbar ist.



#### 4.1.2.3.3 Die Sortierung und Auswahl der Alternativen Fertigungsstrategien

Nachdem alle möglichen Alternativen (Fertigungs-)Strategien zusammengetragen und passende Werkzeuge gesucht wurden, wird im nächsten Schritt die Sortierung der Alternativen Strategien durchgeführt. Sortierkriterien für die zusammengetragenen Alternativen Strategien sind:

##### 1. Sortierung nach Priorität

Anhand von Prioritätskennern wird die Alternative mit der höchsten Priorität bevorzugt verwendet (Siehe hierzu auch bei anderen CAPP-Systemen [BT91], [PC07], [VD93]). Es können z. B. bestimmte Fertigungsstrategien bevorzugt werden, um gewisse Fertigungsgütern zu erreichen (z. B. Bevorzugen von Gewinde Fräsen vor Gewinde Bohren). Bevorzugte Strategien werden nicht zwangsläufig gesetzt, sondern nur bevorzugt bei der Auswahl behandelt, da es möglich sein kann, dass andere Kriterien die Verwendung wieder ausschließen, beispielsweise wenn kein Werkzeug vorhanden ist.

##### 2. Sortierung nach Zerspangeschwindigkeit

Anhand der Zerspanzeit wird die Alternative Strategie verwendet, die die kürzeste Zerspandauer aufweist. Die Berechnung dieser ist jedoch eine große Herausforderung, da neben den Schnittdaten für die Hauptzeitberechnung, auch alle Nebenzeiten, wie z. B. die Dauer für einen Werkzeugwechsel, im Detail bekannt sein müssen. Zusätzlich müssen die Häufigkeiten für die Nebenzeiten bekannt sein, z. B. ob das Werkzeug überhaupt eingewechselt werden muss. Zum Zeitpunkt der Auswahl der Alternativen Strategien ist noch nicht bekannt, ob vielleicht kein Werkzeugwechsel erforderlich ist, weil die im späteren NC-Programm vorausgehende Operation<sup>18</sup> bereits dasselbe Werkzeug nutzt. Weiter ist die Werkzeugstandzeit mit zu beachten und die Anzahl an Schwesterwerkzeugen inklusive zusätzlicher Werkzeugwechsel zu kalkulieren. Offen ist, wie nachträgliche manuelle Eingriffe im Post-Prozess mit beachtet werden können, wenn z. B. ein Werkzeug manuell ausgewechselt wird, könnte sich ein anderes Optimum einstellen. Es zeigt sich somit deutlich, dass es sich um ein nicht triviales Optimierungsproblem handelt, welches an dieser Stelle nicht weiter vertieft wird, da dieses Sortierverfahren bei einer angenommenen unvollständigen Werkzeugdatenbank nicht angewendet werden kann.

Es wurden Kriterien zur Auswahl und Sortierung auf die Alternativen Strategien angewendet, Werkzeuge und Schnittparameter wurden gesucht, für einen idealen Prozess würde theoretisch die optimale Lösung feststehen. In einem Umfeld einer realen Fertigung und einer Teilautomatisierung ist dies jedoch nicht unbedingt möglich, da z. B. Werkzeuge oder Schnittda-

---

<sup>18</sup> Es sind noch nicht alle Operationen erzeugt und die Operationsreihenfolge ist noch nicht geordnet worden.

ten fehlen können. Ist die Pflege dieser Datenbanken noch nicht perfekt, so kann hier konzeptionell gegengesteuert werden, um die Wahl einer geeigneten Alternativen Strategie dennoch zu ermöglichen.

Im Überblick ergeben sich bei einer ungepflegten Werkzeug- und Schnittdatenbank die in Tabelle 8 dargestellten möglichen Zustände für die Alternativen Strategien  $A_i$  und deren Operationen  $O_{i,m}$ <sup>19</sup> innerhalb eines Hauptfertigungsfolgeschrittes  $H_k$ :

$H_k A_i O_{i,m}$	Werkzeug geometrisch	Werkzeug Schnittdaten
$H_k A_1 O_{1,1}$	vorhanden	vorhanden
$H_k A_1 O_{1,2}$	vorhanden	unbelegt
$H_k A_1 O_{1,3}$	vorhanden	gesperrt
$H_k A_1 O_{1,4}$	fehlt	fehlt

**Tabelle 8:** Mögliche Zustände einer Operation bzgl. Werkzeug und Schnittdaten

Automatisiert sollte die Alternative Strategie *priorisiert* werden, die als erste für alle Operationen ein Werkzeug besitzt. Wenn diese Strategie jedoch nicht für alle Werkzeuge zusätzlich Schnittdaten aufweisen kann, sollte nach weiteren Alternativen gesucht werden, die dieses Kriterium ebenso erfüllen. Diese erste Strategie wird als *vollkommen* bezeichnet.

Beispiel zur automatisierten Auswahl einer Alternativen Strategie aus vieren ( $A_1 - A_4$ ):

$H_k A_i O_{i,m}$	Werkzeug geometrisch	Werkzeug Schnittdaten
$H_1 A_1 O_{1,1}$	vorhanden	unbelegt
$H_1 A_1 O_{1,2}$	vorhanden	vorhanden
$H_1 A_2 O_{2,1}$	fehlt	fehlt
$H_1 A_2 O_{2,2}$	vorhanden	gesperrt
$H_1 A_3 O_{3,1}$	vorhanden	vorhanden
$H_1 A_3 O_{3,2}$	vorhanden	vorhanden
$H_1 A_4 O_{4,1}$	fehlt	fehlt
$H_1 A_4 O_{4,2}$	vorhanden	vorhanden

**Tabelle 9:** Beispiel zur automatisierten Auswahl einer Alternativen Strategie

Im vorliegenden Beispiel soll die Wahl der am besten geeigneten Alternativen Strategie  $A_i$  durch das Regelwerk getroffen werden. Zunächst wird  $A_4$  ausgeschlossen, da im gesamten Pool an Alternativen Strategien mindestens eine für alle Operationen ein Werkzeug aufweisen kann; in diesem Fall  $A_1$  und  $A_3$ .  $A_2$  wird ebenfalls aussortiert, weil  $O_{2,2}$  für die Werkstoff-

<sup>19</sup> „i“ ordnet die Operation einer  $A_i$  zu, Zähler der Operationen ist „m“.

Schneidstoff-Kombination gesperrt ist.  $A_1$  ist die „priorisierte“ Alternative, weil sie die erste ist, die für jede Operation ein Werkzeug aufweisen kann.  $A_3$  ist die „vollkommene“ Alternative, weil für diese auch zu jeder Operation Schnittdaten gefunden werden können.

Insbesondere zu beachten ist der Fall, dass die erste – priorisierte – Alternative Strategie, die für alle Operationen ein Werkzeug besitzt, nicht für alle Operationen einen Schnittwertdatensatz aufweist. Dieser Fall muss gezielt weiter untersucht werden, da das Fehlen der Schnittdaten, diese Alternative Strategie nicht notwendigerweise weniger für die Verwendung qualifiziert. Das Fehlen von Schnittdaten auf drei Gründen basieren kann:

1. Das Werkzeug ist für diese Werkstoff-Schneidstoff-Kombination ungeeignet. Das Werkzeug muss in der Datenbank für diesen Fall gesperrt werden. In der Liste der möglichen Werkzeuge für diese Operation gibt es jedoch ein weiteres, welches Schnittdaten für diesen Fall besitzt. Durch die Sperrung des ersten Werkzeuges wird in Zukunft das andere Werkzeug, welches Schnittdaten besitzt, verwendet werden.
2. Das Werkzeug ist für diese Werkstoff-Schneidstoff-Kombination ungeeignet. Das Werkzeug muss in der Datenbank für diesen Fall gesperrt werden. In der Liste der möglichen Werkzeuge für diese Operation gibt es kein weiteres geeignetes Werkzeug. Die Alternative Strategie sollte nicht gewählt werden und durch die Sperrung des Werkzeuges wird diese Alternative auch in Zukunft bei dieser Feature-Konstellation nicht wieder ausgewählt werden.
3. Das Werkzeug ist für diese Werkstoff-Schneidstoff-Kombination geeignet. Die Schnittdaten fehlen jedoch und müssen nachgepflegt werden.

Durch diese besondere Beachtung der priorisierten Strategie ist die Optimierung des Gesamtsystems in Richtung der besten Strategien und die bedarfsorientierte Befüllung der Werkzeug- und Schnittwertdatenbank sichergestellt. Würde dieses nicht beachtet werden, so würde die erste – priorisierte – Alternative als nicht vollkommen bewertet werden und eine andere spätere, jedoch vollkommene Strategie, zur Anwendung kommen. Es würde das am schnellsten gepflegte Werkzeug verwendet werden, nicht das aus wirtschaftlicher Sicht Beste.

Weiterführung des zuvor eingeführten Beispiels mit den neuen im obigen Abschnitt gewonnenen Erkenntnissen:

Da die erste Strategie nur priorisiert, aber nicht vollkommen ist, wird ein Anwenderdialog eingeblendet. Es wird eine Übersicht aller Alternativen Strategien mit Status des Werkzeuges, der Schnittdaten und weiterer möglicher Werkzeuge angezeigt. Im Fall 1. und 3. wird die ers-

te Alternative Strategie  $A_1$  aus dem Beispiel gewählt, im Fall 2. die dritte Alternative Strategie  $A_3$ . Die Auswahl erfolgt entweder durch den Anwender oder, wenn keine Anwenderinteraktion zugelassen ist, automatisiert – basierend auf Einstellungen im Pre-Prozess – durch Wahl z. B. stets der ersten oder der priorisierten Alternative. Die Dokumentation findet in jedem Fall für den Post-Prozess statt, um die Entscheidungswege nachvollziehen zu können und nachträglich manuelle Eingriffe besser koordinieren zu können.

Zusätzlich sind zwei weitere Sonderfälle zu beachten. Der erste Sonderfall liegt vor, wenn die Alternative Strategie bewusst manuell ausgewählt werden soll. Dies kann der Anwender im Vorfeld des In-Prozesses durch entsprechende Einstellung fordern. In dem Fall wird die Wahl der Alternativen Strategie durch den Anwender über einen Anwenderdialog manuell getroffen. Der zweite Sonderfall liegt vor, wenn nur eine Fertigungsstrategie zur Auswahl steht. Ist dies der Fall, so wird diese Fertigungsstrategie direkt weiter verwendet.

#### **4.1.2.4 Abschnitt Operationserzeugung und -befüllung**

Nachdem die einzelnen Fertigungsstrategien für jede Hauptfertigungsfolge festgelegt wurden, müssen jetzt die Fertigungsoperationen entsprechend der Reihenfolge der Hauptfertigungsfolge und der Reihenfolge der jeweiligen gewählten Alternativen Strategie erzeugt werden. Nach Regeln aus der Wissensbasis wird für jede erzeugte Operation ein Operationsname gebildet und diese in den Strukturen des CAM-Systems eingeordnet. Die Werkzeuge und Schnittdaten werden soweit vorhanden zugewiesen.

Bei Bohr- und Bohrfräsprozessen wird passend zur ausgewählten Maschine und der Steuerung ein Fertigungszyklus angewählt und die Zyklusparameter werden gesetzt. Dabei müssen diverse Kriterien aus der Wissensbasis beachten, z. B. den Futtertypen des Werkzeuges beim Gewindefertigen. Die Visualisierung der Zyklusbearbeitung im CAM-Bereich und im Maschinensimulationssystem wird (vereinfacht) nachgebildet, damit eine Kollisionsüberwachung durchgeführt werden kann.

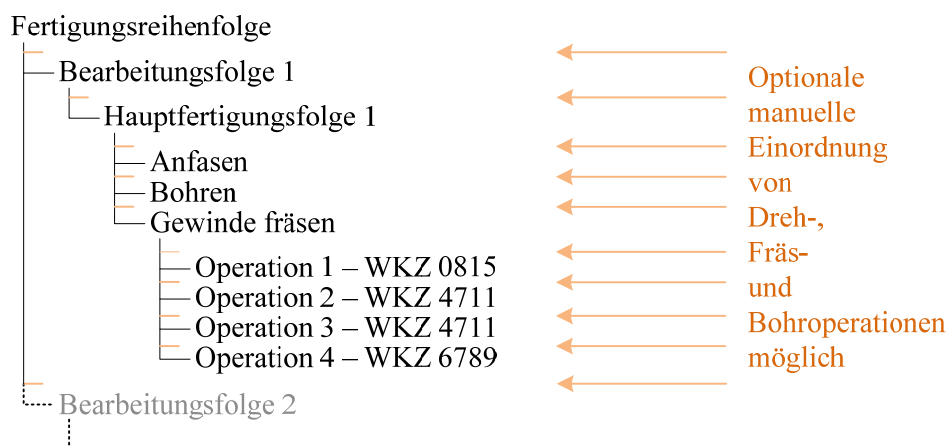
Darüber hinaus werden alle anderen Operationsparameter wie Bohrtiefe, Sicherheitsabstand, Rückzugsebene und Eintauchseite bei Durchgangsbohrungen gesetzt. Es müssen die Regeln der Wissensbasis beachtet werden und die erforderlichen Parameter aus einer Vielzahl an Quellen bezogen werden (vgl. Kapitel 2.4). Erforderliche Quellen sind u. a.: Attribute im Konstruktionsmodell, Operationsparameter von Operationen die in der Fertigungsreihenfolge nachfolgen (Die Werte stammen aus der rückwärtsverketteten Planungsphase der Alternativen Strategien), Operationsparameter von Operationen die in der Fertigungsreihenfolge vorausgehen (Werte stammen aus bereits erzeugten Operationen und werden vorwärtsverkettet), die

Werkzeugdatenbank, das aktuelle Werkzeug, Voreinstellwerte wie der Mindestsicherheitsabstand, Spannelemente als Kollisionskonturen und das Maschinenmodell als Kollisionskonturen.

Die Befüllung der Operationsparameter sollte assoziativ für jede einzelne Bohrung erfolgen, so dass sich Modellveränderungen direkt auf die Parameter auswirken. Die Verknüpfung einer Operation mit jeder einzelnen Bohrung ermöglicht es, dass mehrere Bohrungen in einer Operation erfasst werden und je Bohrung individuelle Werte zur Anwendung kommen können (Beispiel: Anordnung mehrerer gleicher Bohrungen auf dem Umfang eines Zylinders. Alle Operationswerte sind gleich, lediglich die Bohrachse verändert sich stetig). Zu beachten ist, dass umfangreiche Veränderungen auch bei assoziativ verknüpften Werten zu Nachbearbeitungen führen, wenn die konstruktiven Änderungen zu groß werden. Kapitel 4.2.3 führt in diese Problematik ein.

#### 4.1.2.5 Abschnitt Prozessabschluss

Zum Abschluss des In-Prozesses werden alle erzeugten Operationen in eine Fertigungsreihenfolge sortiert. Zur besseren Übersicht bieten einige Systeme Baumstrukturen an, die nach Bedarf erzeugt werden können. Ein Ansatz ist es nach Bearbeitungsfolgen, die im Pre-Prozess gesetzt werden, Hauptfertigungsfolgen und Fertigungsstrategien zu ordnen. In dieser Struktur können alle automatisiert erzeugten Bohr- und Bohrfräsoperationen, basierend auf der in der Wissensbasis vorgegebenen Ordnungsstruktur, abgelegt werden. Abbildung 28 verdeutlicht diesen Ansatz. Operationen, die einer Fertigungsstrategie zugeordnet werden, werden darüber hinaus Werkzeugwechseleoptimiert eingeordnet, so dass Operationen mit gleichen Werkzeugen aufeinander folgen. Optional kann im Post-Prozess an jede Stelle manuell eine Dreh- oder Fräsoperation (402) eingeordnet, bzw. eine Bohroperation verschoben werden.



**Abbildung 28:** Ordnungsstruktur der Fertigungsreihenfolge

Die erzeugte Struktur sollte so angelegt und gespeichert werden, dass bei nachfolgenden In-Prozessläufen weitere Operationen in allen Ebenen automatisiert eingeordnet werden können. Zum vollständigen Prozessabschluss werden darüber hinaus notwendige abschließende Attribute im CAD/CAM-System gesetzt, Daten für Log-Files geschrieben und die aufgespeicherten Daten für den Post-Prozess nach einer in der Wissensbasis vorgegebenen Struktur überführt. Hierzu bietet sich ein Feedbacksheet als Tabelle an, wenn möglich direkt im CAD/CAM-System integriert. Weitere Details werden im nächsten Kapitel ausgeführt.

### 4.1.3 Konzept für den Post-Prozess

In Abbildung 23 auf Seite 64 ist der wesentliche Post-Prozess, das Überarbeiten der In-Prozessergebnisse, gestrichelt eingezeichnet. Jede Operation und jeder Parameter ist durch den NC-Programmierer im Post-Prozess auf inhaltliche Richtigkeit zu prüfen und freizugeben, zudem ist Feedback gegenüber den Administratoren bei Fehlern zu geben. Je nach Überprüfungsergebnis sind einzelne Operationsparameter, Werkzeuge, die Fertigungsreihenfolge oder die Feature-Ordnung abzuändern. Es kann jedoch auch erforderlich sein, dass die Eingangsbedingungen des In-Prozesses verändert werden müssen und die Automatisierung ganz oder teilweise neu durchlaufen werden muss.

Um diesen sehr verantwortungsvollen Prozess zu unterstützen, werden alle Operationen mit sämtlichen Parametern in einem *Prozess*-Feedbackdokument erfasst. Dieses Dokument ermöglicht eine komplette Übersicht über alle Parameter, die Parameterwerte und die formalen Zusammenhänge. Fehler die die automatisierte Qualitätssicherung ermittelt hat und in der Wissensbasis definierte manuelle Nacharbeitungsaufgaben werden geordnet im Feedbackdokument aufgeführt und können dokumentiert, gesichert, vollständig und strukturiert abgearbeitet werden. Die Ergebnisqualität kann, durch die Verkoppelung von automatisiertem und manuellem Prozess, gegenüber dem unsystematischen Überprüfen im rein manuellen NC-Programmierprozess, deutlich verbessert werden. Optimalerweise besteht eine bidirektionale und interaktive Kopplung zwischen dem Feedbackdokument und dem CAD/CAM-System, so dass sowohl im Feedbackdokument als auch in den Operationen im CAD/CAM-System eine schnelle Zugehörigkeit ermittelt werden kann und Änderungen eingebracht werden können.

Um den Post-Prozess, im Besonderen gegen Kollisionen, zu unterstützen ist eine Maschinsimulation (511) zusätzlich hinzu zu ziehen.

*Anwender*-Feedback an den Administrator ist darüber hinaus im Rahmen der Softwareentwicklung und der kontinuierlichen Qualitätssicherung und -steigerung der Wissensbasis enorm wichtig. NC-Programmierer und Maschinenbediener sollen Feedback geben, um Fehler zu identifizieren, Regeln zu optimieren und Ideen der Anwender in die Entwicklung ein-

fließen lassen zu können. Die Feedbackphase wird dabei stark durch den Faktor Mensch beeinflusst und ist wesentlich vom Systemverständnis eines Einzelnen abhängig. Dieses Systemverständnis ist für die Ideenentwicklung wichtig, um Fertigungswissen, welches über Regeln automatisierbar ist, gezielt durch das Wissensmanagement und die Administration führen zu können. Fehlt das Systemverständnis oder ist die Perspektive des Anwenders auf konkrete Einzelfälle ausgerichtet, so werden Automatisierungsideen für zu kleine Automatisierungslösungen entwickelt, die vielfach in Inseleoptimierungen enden. Hier ist die Systemadministration oder der Wissensmanager gefordert, die Bedürfnisse der Anwender zu erkennen und diese auf ein genügendes Abstraktionslevel zu portieren, um das optimale Maß an Automatisierung im Sinne der Gesamtwirtschaftlichkeit zu erreichen.

Die NC-Programmierung ist abgeschlossen (601), wenn alle offenen Punkte im Feedbackdokument abgearbeitet wurden, die Maschinensimulation ohne Fehler durchgeführt werden konnte, alle erforderlichen Nebenoutputs, wie Werkzeugplan (512) und Aufspannskizze (403) erstellt wurden und die Freigabe durch den NC-Programmierer erfolgt ist.

### **Nachträglicher Werkzeugwechsel im Post-Prozess**

Der nachträgliche Werkzeugwechsel stellt beim vorgestellten Ansatz einen besonderen Fall der Nachbearbeitung dar. Bei der Automatisierung können mehrere mögliche Werkzeuge ermittelt worden sein, so dass sich keine eindeutige, sondern nur eine bevorzugte Lösung ergeben hat. Um diese Wahl nachträglich zu verändern, ist es sinnvoll, die Regeln der Werkzeugsuche aus dem automatisierten In-Prozess auch im manuellen Post-Prozess zur Verfügung zu stellen. Es ist dann möglich aus dem gefundenen und sortierten Pool an Werkzeugen manuell ein anderes zur Verwendung auszuwählen. Diese Funktion ermöglicht z. B. den kurzfristigen Werkzeugwechsel aufgrund von Maschinenwechseln oder Werkzeugausfällen. Darüber hinaus ist die manuelle regelbasierte Einbindung von Sonder- und Versuchswerkzeugen möglich.

## **4.2 Administration der Teilautomatisierung zur Sicherung und Steigerung der Qualität**

In den vorherigen Kapiteln wurden die Komplexität der Wissensbasis und der Inferenzmaschine angesprochen. Der Systemaufbau, die Entwicklung der Wissensbasis und die Systempflege in der Betriebsphase erfordern grundsätzlich eine intensive Administration. Im Besonderen bei einer Teilautomatisierung, hervorgerufen durch den 80%igen Automatisierungsgrad und einer nicht vollständig gefüllte Werkzeug- und Schnittdatenbank, ist die Administration zusätzlich gefordert die Anwender-System-Interaktion bei Fehlern oder bei Weiterentwicklungsbedarf zu unterstützen. Darüber hinaus sind umfangreiche Feedbackprozesse und stetige

Maßnahmen zur Vermeidung von Black-Box-Effekten in allen drei Prozessphasen (Pre, In und Post) notwendig. Dieses Kapitel erarbeitet weitergehende Konzepte zur Unterstützung der Teilautomatisierung durch die Administration.

#### **4.2.1 Administrative Verarbeitung von Feedback bei einer Teilautomatisierung**

Bei der NC-Programmierung, wird vom Anwender Feedback erbeten. Es werden automatisierte Log-Files geschrieben oder Dokumentationssysteme können Meldungen, Daten und Statistiken zum manuellen und automatisierten NC-Programmierprozess mitschreiben. Dieses Prozess-Feedback wird durch den Administrator oder durch unterstützende Systeme weiter verarbeitet und dient der Softwarewartung. Im Folgenden werden Gründe und Hintergründe, die speziell zu Anwender-Feedback führen können aufgeführt und im Anschluss ein allgemeines Konzept vorgestellt, wie dieses Feedback methodisch bei der Softwarepflege verarbeitet werden kann.

Auslöser für ein Anwender-Feedback können jeweils Fehler oder Optimierungswünsche im Bereich der Inferenzmaschine, der Wissensbasis und des CAD-Modells sein. Tatsächliche Gründe sind dabei vielfältiger, neben den benannten Auslösern kommen weitere Punkte hinzu:

- Die Lösung der Automatisierung wird als fehlerhaft angesehen obwohl diese fertigungstechnologisch möglich wäre, es handelt sich somit um eine Fehleinschätzung der Automatisierungsergebnisse durch den Anwender.
- Der geäußerte Optimierungswunsch ist berechtigt, wäre jedoch eine Inseloptimierung und ist mit Blick auf den Gesamtprozess nicht wirtschaftlich.
- Es bestehen Fehler in der Datenübertragung, Rundungsfehler oder Darstellungsfehler durch Schnittstellen, die so zu Ergebnisfehlern führen.

Aufgrund dieser unterschiedlichen Gründe und der Strategie der Teilautomatisierung muss gezielt bei der Softwarewartung zwischen den folgenden Fällen unterschieden werden, um das geleistete Anwender-Feedback zu verarbeiten:

- Ein Systemfehler ist vorhanden, die Wissensbasis / die Inferenzmaschine ist anzupassen.
- Ein Systemfehler liegt nicht vor, jedoch ein Anwenderfehler; dieser ist aufzuklären und das Systemverständnis ist zu schärfen.
- Der Optimierungswunsch ist berechtigt und muss in der Wissensbasis nachgepflegt werden.



- Der Optimierungswunsch ist berechtigt, aber aufgrund der Teilautomatisierung wird dieses Detail im manuellen Prozess belassen; dieses Wissen ist in der Wissensbasis zu erfassen, um es für den Post-Prozess gezielt dem Anwender über die Post-Prozess-Dokumentation zur Verfügung zu stellen.

#### 4.2.2 Qualität und Quantität von Datensätzen in Wissensdatenbanken

Die Qualität der Wissensbasis ist sowohl bei der Attributauswertung als auch bei der Fertigungsprozessauswahl von entscheidender Bedeutung. Je besser und genauer die Randbedingungen zu einem Attribut definiert werden, umso einfacher und eindeutiger fällt die Entscheidung für den richtigen Prozessschritt aus. [WIT06] Fehlerhafte Daten würden lediglich unbrauchbare Ergebnisse liefern und manuelle Nacharbeit erfordern.

Während der Entwicklungsphase sind die angeschlossenen Datenbanken im Aufbau. Um möglichst zielgerichtet Datenstrukturen in Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Fertigung aufbauen zu können, sind Anforderungen zu Datenqualität und -quantität zu benennen. Im Besonderen werden hierbei die Werkzeug- und Schnittdatenbanken hervorgehoben. Sie können viele hunderttausende Werte enthalten, daher wird im Folgenden auf mögliche Befüllungs- und Korrekturstrategien der Datenattribute eingegangen.

Datenbanken wie die Werkzeug- oder Schnittwertdatenbank können auch ohne eine NC-Automatisierung in der Fertigungsplanung bereits bestehen und effektiv eingesetzt werden. Durch die automatisierte NC-Programmierung ergibt sich ein neues umfangreiches Anforderungsprofil an die Datenqualität und -quantität. Bestehende Daten können weiter verwendet werden, erfüllen die neuen Anforderungen jedoch nur noch eingeschränkt, wie das nachfolgende Beispiel in Tabelle 10 verdeutlicht:

Alte Anforderungen	Neue Anforderungen
Grobe Geometriedatenverwaltung	Alte Anforderungen bleiben bestehen
Werkzeugnummern und Schwesterwerkzeuge	+ detaillierte Geometriedatenverwaltung
Werkzeugbestellung	+ 3D-Werkzeugmodell
Werkzeugvoreinstellung	+ Schnittdaten
Stammwerkzeuge in den Maschinen	+ Werkstoff-Schneidstoff-Kombinatorik

**Tabelle 10:** Veränderte Anforderungen an Daten in bestehenden Datenbanken

Die Ausführungen zur Werkzeugsuche (vgl. Kapitel 4.1.2.3.2) haben gezeigt, wie intensiv eine Werkzeug- und Schnittdatenbank bei einer automatisierten NC-Programmierung genutzt wird und somit auch den Bedarf an diesen Daten hervorgehoben. Das Hauptproblem bei der

neuen Qualitäts- und Quantitätsanforderung ist die Pflege der notwendigen Daten – bei begrenzter Personalkapazität – um die angestrebte Wirtschaftlichkeit und den Automatisierungsgrad zu erreichen.

Es ergeben sich hierdurch zwei grundsätzliche Aufgaben. Zum einen die einmalige Nachpflege der bestehenden Datensätze, so dass mit Blick auf die Teilautomatisierung eine Datenqualität und -quantität von 80 % erreicht werden kann. Zum anderen wird eine kontinuierliche Pflege der Daten erforderlich, da wie bereits erwähnt, der Datenbestand ebenfalls zur teilautomatisierten Wissensbasis hinzuzurechnen ist und daher aus den benannten Gründen in Kapitel 2.4 nie fertig entwickelt sein wird.

In Kapitel 4.1.2.3.2 wurde bereits eine Strategie vorgestellt, wie die Qualität der Werkzeug- und Schnittwertsuche bei einem bedingt qualitativen Werkzeug- und Schnittwertdatenbestand gewährleistet werden kann. Eine bedarfsorientierte Nachpflege des Datenbestandes führt dabei zu schnellen Erfolgen, die folgenden Maßnahmen unterstützen dieses Pflegekonzept zusätzlich:

- Die Nutzung eines oder mehrerer Pflegestatus.
- Vergabe von Leerwerten bei Schnittdatenparametern, um die Schnittwertsuche zu unterstützen.
- Automatisierte Überprüfung der Geometrie der Werkzeuge auf Plausibilität innerhalb des In-Prozesses. Werkzeuge mit logischen Fehlern oder fehlerhaften Parametern werden aussortiert und der Pflegebedarf wird automatisiert notiert (Log-File). Zu pflegende Parameter sind dann am realen Werkzeug nachzumessen oder bei Standardwerkzeugen aus Katalogen zu entnehmen.
- Automatisierte Pflege und Optimierung von Schnittwertdatensätzen. Hierzu sind unbelegte Werkstoff-Schneidstoff-Kombinationen mit konservativen Schnittparametern oder einem Leerwertkenner, z. B. „-1“, der den Pflegebedarf signalisiert und die in Kapitel 4.1.2.3.2 vorgestellte Anwenderinteraktion aktiviert, zu belegen. Bei einer Nutzung des Werkzeuges ist der NC-Programmierer als Fachexperte in der Lage und in der grundsätzlichen Pflicht, den vorgegebenen Wert zu überprüfen und bei Bedarf eine Änderung durchzuführen. Die Dateneingabe kann dabei innerhalb des CAM-Systems als Operationsparameter eingabe erfolgen.

Die Kernidee des automatisierten Pflegekonzeptes liegt darin, beim Postprozessorlauf die Veränderung der Schnittdaten relativ zur Datenbank zu erkennen, die Zuordnungen zu Werkzeug, Werkstoff-Schneidstoff-Kombination, Schnittmethode und Maschinengruppe zu identifizieren und die neuen Daten z. B. durch einen gewichteten Mittelwert in die

Schnittdatenbank zu überführen. Durch die Nutzung des Pflegestatus kann beispielsweise bei einer definierten Anzahl an Überarbeitungen der Wert als optimaler Vorgabewert fixiert werden. Weitergehende Prüfungen vor dem Überarbeiten von bestehenden Werten mit neuen Werten sind zudem denkbar, beispielsweise das Analysieren auf Überschreitung von Grenzwerten.

Durch dieses neue Konzept wird eine bedarfsorientierte und quasi mannlose Pflege und gleichzeitige Optimierung der Werkzeugdatenbank innerhalb einer teilautomatisierten NC-Programmierung in einer CAD/CAM-Prozesskette ermöglicht.

### 4.2.3 Die CAD- und CAM-Methodik

Integrierte Prozessketten erbringen einen umfangreichen Nutzen aufgrund der Weiterverarbeitung von Daten aus vorherigen Prozessschritten. Die 3D-CAD-Modellierung stellt die Grundlage für viele nachgelagerte Aufgabenbereiche, wie z. B. CAM, Zeichnungsableitung oder der Finite Elemente Berechnung dar. Im Idealfall braucht jede Information nur ein einziges Mal eingegeben und dann in verschiedenen Sichten assoziativ wiederverwendet zu werden (vgl. VDI-Richtlinie 2218 [VDI2218] zur Feature-Technologie). Dabei hat die Qualität des CAD-Modells, also die Modellierungsmethodik, eine entscheidende Bedeutung auf die effektive Nutzung in der weiteren Prozesskette. Wird bei der CAD-Modellierung aufgrund falscher Methodik ein qualitativ gutes Konstruktionsmodell erstellt, welches jedoch in weiteren Prozessschritten nicht nutzbar ist, so führt dies zu verzögernden Nachbesserungen und eventuell zur Neukonstruktion.

Diese Integriertheit macht aufeinander abgestimmte CAD- und CAM-Methodiken (vgl. Abbildung 23 auf Seite 64, Punkt 202 und 208) notwendig, die in Abstimmung aller Bereiche (Arbeitsvorbereitung, Produktentwickler, CAD-, CAM- und PDM-Spezialisten) erstellt werden, um eine optimale Gesamtprozesskette aufzubauen. Die Methodiken nehmen dabei Einfluss auf weite Bereiche des Gesamtsystems und sind ein Schlüssel zum Erfolg einer Prozesskette. Dies gilt vor allem, wenn automatisierte Systemkomplexe, wie eine NC-Automatisierung oder KBE-Anwendung, eingebracht werden, die weniger flexibel als ein menschlicher Anwender auf Abweichungen reagieren können. Die Methodiken sind grundsätzlich systemspezifisch in Abhängigkeit zu den Softwarekomponenten aufzubauen und behandeln folgende Themenschwerpunkte:

- Allgemeine und konkrete Gebote und Verbote zu CAD- und CAM-Funktionen
- Strukturierte Modellierungstechniken
- Datenqualität und -quantität von Attributen

Beispiele hierzu finden sich im Artikel von Stekolschik et al. [SP08]. Es folgt ein kurzer Überblick mit Beispielen zu CAD- und CAM-Methoden:

**Vorgabe zur Konstruktion von Varianten:** Anpasskonstruktionen und Varianten bauen auf bestehende Modelle in der Art auf, dass weite CAD-Modellbereiche unverändert bleiben oder lediglich Parameter verändert werden, wobei die Charakteristik des Modells jedoch unverändert bleibt. Die CAM-Bearbeitung kann dabei unverändert oder geringfügig angepasst ebenfalls weiter verwendet werden. Hier kann die Teilautomatisierung große Vorteile bieten. Geringe Veränderungen werden rein manuell abgearbeitet, weitergehende werden partiell neu automatisiert NC-programmiert. Assoziativ verknüpfte und weiter nutzbare CAM-Bearbeitungen passen sich unter Umständen automatisiert den veränderten Konturen an. Voraussetzung hierbei ist, dass die Flächenwiedererkennung gegeben ist. Dies erfordert, dass das CAD-Modell entsprechend des angewandten Systems die Flächenbezüge nicht verliert. Eine CAD-Methodik definiert hier das Vorgehen, um im CAM-System Vorteile zu erzielen.

**Grenzen Assoziativer Verknüpfungen:** Die Ergebnisse einer NC-Programmierung, das NC-Programm und die Nebenoutputs, sind nur so lange aktuell und richtig, wie keinerlei Veränderungen an vorgelagerten Prozessschritten erfolgen. Klar im Fokus stehen hier konstruktive Veränderungen am Modell. Durch die assoziative Kopplung der CAD- und CAM-Baugruppen ist die Aktualität stets gewährleistet, jedoch muss im Detail auch in den einzelnen Operationen auf Veränderungen durch entsprechende CAM-Methodiken reagiert werden. Veränderungen im CAD-Modell müssen für diese Arbeit nach ihren Auswirkungen bei teilautomatisierter Bohrbearbeitung wie folgt unterschieden werden:

- Veränderung des CAD-Modells ohne erforderlichen manuellen CAM-Eingriff.  
Beispiel: Die Bohrungstiefe verringert sich um 10 mm, die Anpassung geschieht automatisiert durch assoziative Berechnung der Bohrtiefe. Entsprechende Verknüpfungen sind hierzu im In-Prozess zu setzen.
- Veränderung des CAD-Modells mit geringem manuellem CAM-Eingriff.  
Beispiel: Die Bohrungstiefe vergrößert sich um 10 mm, die Anpassung geschieht automatisiert durch assoziative Berechnung der Bohrtiefe. Möglich ist, dass infolge dessen eine Werkzeugkollision auftritt, somit ein neues Werkzeug ausgewählt werden muss oder die Fertigungszyklusparameter (z. B. Reversieren oder Späneziehen) angepasst werden müssen. Es kann jedoch auch die nachfolgende Reaktion notwendig werden:
- Veränderung des CAD-Modells mit partieller NC-Neuprogrammierung.  
Ist die Veränderung zu umfangreich, so sind Teile der NC-Programmierung zu löschen und neu durch den In-Prozess zu berechnen. Der Prozess wurde bewusst durch das vorge-

stellte Konzept erweiterbar angelegt, z. B. werden neue Operationen in die bestehende Fertigungsreihenfolge einsortiert.

**Modellierungsdetails im CAD-Modell:** CAD-Modelle sollten mit Blick auf die Gesamtwirtschaftlichkeit nicht bis zum letzten Detail ausmodelliert werden. Innerhalb der Gesamtprozesskette können nachfolgende Prozessbeteiligte die fehlenden Konturen und Bearbeitungen aufgrund bestimmter identifizierender Kriterien zum Teil deutlich einfacher einbringen. Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz der Hauptfertigungsfolgen, um z. B. nicht konstruierte Fasen an Gewinden zu fertigen oder der Ansatz um Spitzenwinkel einer Bohrung nicht exakt zu fertigen – es sei denn dies wurde bewusst durch den Konstrukteur am Feature attribuiert – verdeutlichen dies.

## 5 Validierung der Ergebnisse in einer Anwendung

In den vorherigen Kapiteln wurde die teilautomatisierte NC-Programmierung konzeptionell und methodisch erarbeitet. Dieses Kapitel validiert diesen Ansatz durch eine Implementierung im industriellen Umfeld. Das entwickelte und hier vorgestellte Systembeispiel wurde bei der Firma Siemens am Standort Duisburg zwischen 2006 und 2009 umgesetzt.

Im Verlauf dieses Kapitels werden die Ergebnisse der Umfeldanalyse, die Wissensakquisition die zur Wissensbasis geführt hat und die entwickelte Inferenzmaschine vorgestellt. Im Detail wird dabei vorwiegend auf die Maßnahmen zur Teilautomatisierung Bezug genommen. Zum Abschluss des Kapitels wird das aufgebaute Anwendungssystem kritisch bewertet.

### 5.1 Analyse zur Erfassung des Umfeldes

Die Siemens AG ist ein international aufgestellter Technologiekonzern, der eine Vielzahl an Produkten in unterschiedlichster Fertigungstiefe und Stückzahl produziert. Für das Systembeispiel wird ausschließlich die großmechanische Verdichterfertigung am Standort Duisburg betrachtet. Die Fertigungstiefe reicht hier vom Rohteil (Blech, Gussteil oder Schmiedestück) bis hin zur Endmontage, wobei von einem Verdichter in den meisten Fällen nur die Stückzahl *eins* gefertigt wird. Der Verdichter wird individuell an die Kundenbedürfnisse und den Anwendungsfall (Fördermedium, Druck, Temperatur etc.) angepasst, so dass ein erhöhtes Maß an Flexibilität gefordert ist. Zusammenfassend liegen die grundlegenden Rahmenbedingungen für eine teilautomatisierte NC-Programmierung vor.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die wesentlichen Kenndaten die bei der Umfeldanalyse über das betrachtete Produkt und die Fertigung in Bezug auf Bohrungen erfasst wurden:

Das Produkt		
Kenndaten	Wert(e) / Wertebereich	
Bohrungsdurchmesser (D)	Min. 1 mm	Max. 150 mm
Bohrungstiefe (L) über alle Stufen	Min. 1 mm	Max. 1500 mm
L-zu-D-Verhältnis einer Stufe		Max. 30
Anzahl an positiven Stufen		Max. 4
Anzahl an negativen Stufen		Max. 2
Anzahl an Gewinden in einem Feature		Max. 2
Anzahl an Passungen in einem Feature		Max. 2
Gewindetypen	Metrisches ISO-Regelgewinde (M), metrisches	

	ISO-Feingewinde (MF), UNC, UNF, NPT, nicht dichtendes zylindrisches Rohrgewinde (G)
Toleranzen	Form- und Lagetoleranzen
Passungen	ISO-Passung
Oberflächenrauheit	Meist allgemeine Rauheiten, nur selten spezifische Oberflächensymbole, keine Vorgaben zur Fertigungsstrategie
Ausrichtung der Bohrungen	Beliebig im 3D-Raum
Eintauchvarianten von Bohrungen	Sowohl senkrecht, als auch schräg oder in eine nicht ebene Flächen
Besondere Formen	Stock Finish, RTJ-Nut, Flanschflächen
<b>Angewandte Fertigungsverfahren</b>	
<b>Kenndaten</b>	<b>Wert(e) / Wertebereich</b>
Bohrverfahren	Plansenken, Rundbohren, Profilbohren, Rückwärtssenken
Fräsverfahren zur Bohrungsherstellung	Rundfräsen, Planfräsen, Profilfräsen
Herstellungsverfahren für Passungen	Reiben, Spindeln, Profilsenken, Messschnitt
Herstellungsverfahren für Gewinde	Gewinde furchen, Gewinde bohren, Ein- und Mehrzahn-Schraubfräsen
<b>Relevanter Werkzeug-, Schneidstoff- und Maschinenpool</b>	
<b>Kenndaten</b>	<b>Wert(e) / Wertebereich</b>
Anzahl an Bohrwerkzeugen	5000 unterschiedliche Komplettwerkzeuge zzgl. Schwesterwerkzeuge
Anzahl an Fräswerkzeugen	1000 unterschiedliche Komplettwerkzeuge zzgl. Schwesterwerkzeuge
Anzahl an Werkstoffgruppen	11 Gruppen mit jeweils vielen ähnlichen Materialien
Schneidstoffe	HSS, Hartmetalle und verschiedene Wendeplatten, jeweils kombiniert mit unterschiedlichen Beschichtungen
Fertigungsmaschinen	10 Bohr-Fräswerke und Dreh-Fräsmaschinen
Anzahl simultaner Achsen	3 bis 5 zzgl. zugestellter und paralleler Achsen
Anzahl Werkzeugaufnahmen	20 unterschiedliche
Anzahl eingesetzter Vorsatzköpfe	10, nicht an jeder Maschine verfügbar
Anzahl an Maschinenzyklen	100, nicht an jeder Maschine verfügbar

**Tabelle 11:** Umfeldanalyse, Details zum Produkt und zur Fertigung

Ergänzend zur Tabelle 11 wurde festgestellt, dass Daten zu folgenden Punkten bereits in Datenbanken erfasst waren: Werkzeuge, Schnittwerte, Maschinen, Stammwerkzeuge, Aufnahmen, Werkstoffe und Schneidstoffe. Das Hauptproblem bei diesen erfassten Daten war, dass die Datenqualität nicht optimal war. Daten waren für die automatisierte Verwendung zum Teil widersprüchlich, falsch formatiert, in falsche Bezüge gesetzt oder fehlten. Der Hintergrund dessen ist, dass die Datenbanken bisher vornehmlich für menschliche Interaktion verwendet wurden, die neuen Anforderungen sehen jedoch zusätzlich einen intensiven automatisierten Zugriff vor. Ein Neuaufbau der Daten wurde ausgeschlossen, da das bestehende System aufwendig in die Prozessabläufe eingebunden war.

Die bei der Umfeldanalyse erfassten Daten zeigen, dass eine umfangreiche Menge an unterschiedlichen Bohrungen und kombinatorischen Fertigungsmöglichkeiten vorhanden sind. Grundsätzlich eignet sich diese Vielfalt somit für eine Teilautomatisierung mit dem Automatisierungsgrad 80 %, im weiteren Verlauf wird diese auch umgesetzt:

Basierend auf Vorgaben des Unternehmens, werden Prozesse der Fertigungsplanung, bis hin zum Arbeitsgang (vgl. Abbildung 5 auf Seite 11) weiterhin manuell geplant, da hierzu umfangreiche Strukturen in SAP bestehen, die nicht ausschließlich für das Bohren einen Sonderweg vorsehen sollen. Die teilautomatisierte NC-Programmierung umfasst daher folgende Aufgaben (vgl. Kapitel 2.1.3):

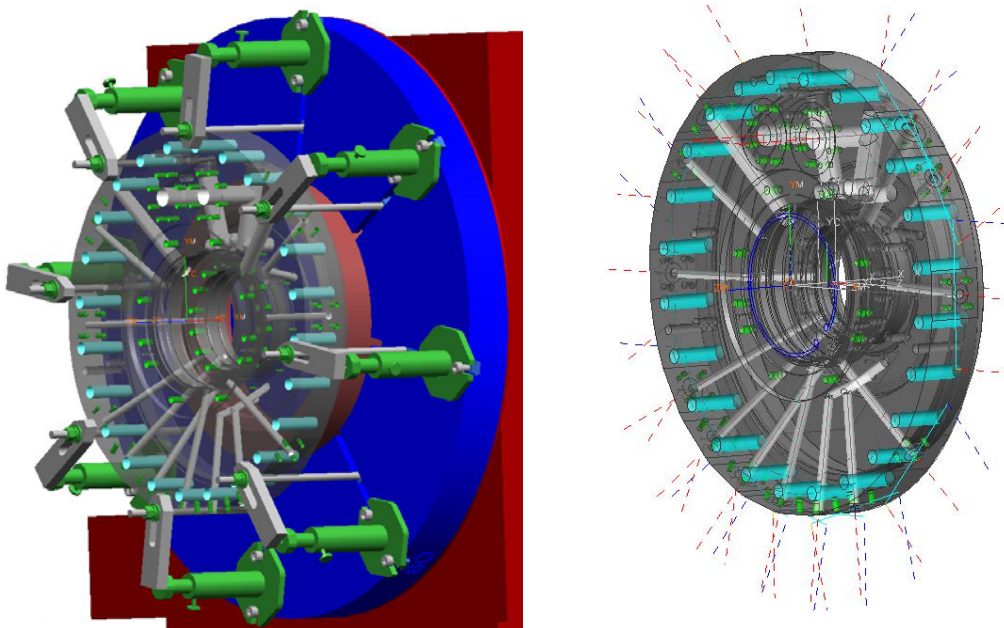
- Interpretation der Fertigungsaufgabe anhand des Modells. Einfluss auf die Planung haben dabei u.a. die Hauptdimensionen, die Allgemeintoleranzen, das Material, das Rohteil (Abmaße, Beschaffenheit, Gewicht, ...) und weitere Details (Form, Lage, Toleranz, Oberfläche, ...).
- Suche von Werkzeugen und Schnittwerten basierend auf den Anforderungen der dazugehörigen Fertigungsoperationen.
- Bestimmung der Arbeitsstufenfolgen aller Fertigungsoperationen inklusive der Gruppierung von gleichen Strukturen. Festlegen der Inhalte der Fertigungsoperationen, zusätzlicher Steuerungsbefehle und der Schnittdaten.
- Berechnung der Werkzeugwege.

Nicht im automatisierten In-Prozess umgesetzt wurden die Aufgaben im Zusammenhang mit der Arbeitsgangplanung, sowie Aufgaben, die nicht alleine das Bohren betreffen oder bereits durch andere Softwareprodukte abgedeckt sind, wie z. B. die Erstellung von Werkzeuglisten für eine Werkzeugmaschine, die Gesamtplanung der Fertigungskosten oder die Maschinensimulation.



Um das bestehende Umfeld anhand eines Bauteils in einem teilautomatisierten NC-Programmiersystem entwickeln zu können, wurde ein Referenzteil ausgewählt, welches die bestehenden Bedingungen widerspiegeln kann. Der Gehäusedeckel eines Radialverdichters mit horizontaler Teilfuge ist hierzu gut geeignet. Er weist ein hohes Maß an geometrischen Bohrungsvarianzen bis zu den dokumentierten Grenzen aus der Umfeldanalyse auf. Alle erfassten Fertigungsverfahren zur Zerspaltung von Bohrungen werden bei dem Bauteil angewandt. Unterschiedliche Werkzeugmaschinen stehen ebenfalls zur Verfügung, so dass auch ein umfangreicher Pool an Werkzeugen, Vorsatzköpfen und Werkzeugaufnahmen zum Einsatz kommen.

Abbildung 29 zeigt einen ausgewählten Gehäusedeckel, bei dem die Bohrungen sowohl axial und radial als auch frei im Bauteil liegend konstruiert sind. Die Fertigung vom Schmiedestück zum Fertigteil findet in mehreren Spannungen und auf mehreren Maschinen statt. Dreh- und Bohr-Fräsprozesse wechseln sich ab, Glühprozesse oder Schweißvorgänge kommen teilweise zwischen den Fertigungsschritten bis zur Fertigstellung der vollständigen Geometrie vor.

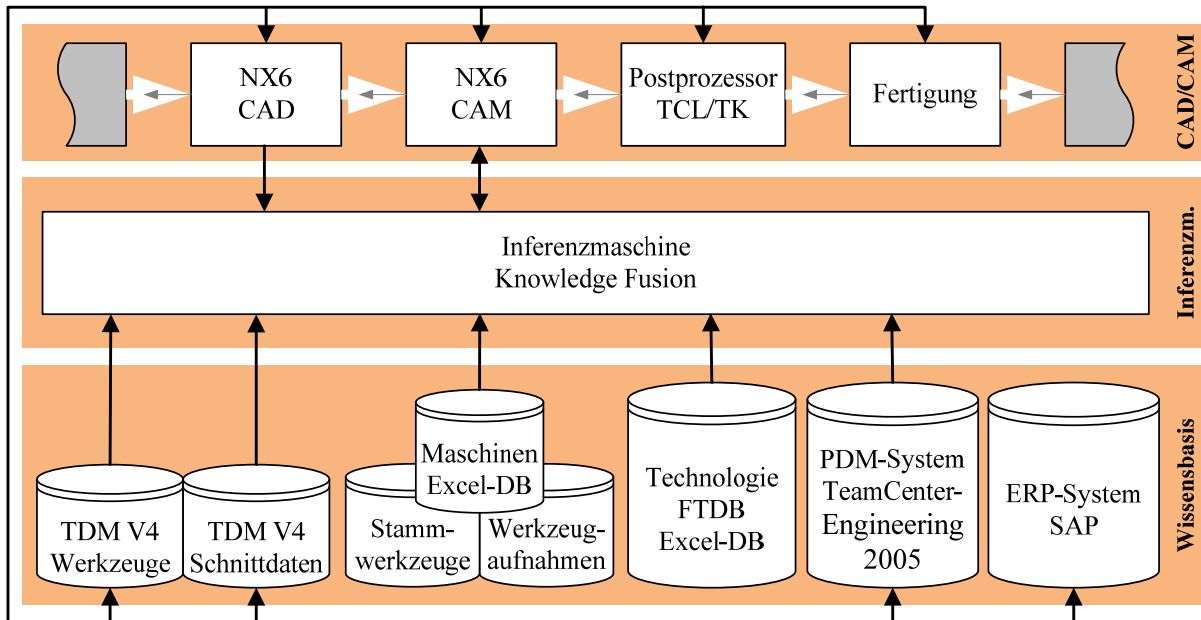


**Abbildung 29:** Aufgespannter und NC-programmierter Gehäusedeckel eines Verdichters

Abbildung 29 zeigt links einen Gehäusedeckel mit einem Durchmesser von 1030 mm und einer Wanddicke von 231 mm, der auf der Spannscheibe eines 5-Achs-Bohrwerkes aufgespannt ist. Im rechten Teil der Abbildung sind teilautomatisiert NC-programmierte Verfahrenwege der ersten Spannung eingeblendet, wobei Spannmittel und Maschine hierzu ausgeblendet wurden.

## 5.2 Grundstruktur des Anwendungssystems

Das überschriebene Konzept das die Teilautomatisierung trägt ist auf drei Säulen, bestehend aus Inferenzmaschine, Wissensbasis und Template des CAD/CAM-Systems, aufgebaut. Die folgende Abbildung konkretisiert diese Struktur und spezifiziert die verwendeten Softwareprodukte:



**Abbildung 30:** Grundstruktur des Systembeispiels

Als gesetzte Softwareprodukte wurden die Folgenden vorgefunden: Als CAD/CAM-System wird NX, anfangs in der Version NX4, später in der Version NX6, verwendet. NX wird aus dem PDM-System TeamCenterEngineering heraus betrieben, welches über eine Schnittstelle mit dem ERP-System SAP verkoppelt ist. In der Fertigungsvorbereitung wird eine Werkzeugdatenbank von TDM betrieben, welche ebenfalls vorgegeben ist, da komplexe Kopplungen mit SAP die Werkzeugbestellung und -disposition verwalten. Allgemein wird bei Siemens mit Officelösungen von Microsoft gearbeitet.

Abbildung 30 zeigt die in drei Bereichen getrennte teilautomatisierte NC-Programmierung. In der Mitte befindet sich die Inferenzmaschine, die das Herzstück der NC-Automatisierung ausmacht, sie wird durch das NX CAM-System initialisiert und bezieht zudem Modellinformationen aus dem NX CAD-System. Die Inferenzmaschine wird in Knowledge Fusion (KF) programmiert, eine in NX integrierte Sprache, die gezielt die Anforderungen eines Expertensystems im CAx-Umfeld unterstützt. Sie ist bidirektional und kann dadurch assoziative Regelstrukturen in Fertigungsoperationen ermöglichen. Andere Programmiersprachen, die über API-Schnittstellen nutzbar sind, wie C++, C# oder Visual Basic wurden nicht verwendet, da

die volle Integration und die assoziative Verknüpfung von KF mit dem CAD/CAM-System als besondere Vorteile gewertet wurden.

Die Wissensbasis ist im Wesentlichen auf zwei Datenbasen, neben dem bestehenden PDM- und ERP-System, verteilt. Für das besonders regelintensive fertigungstechnologische Wissen wurde die sogenannte Fertigungstechnologiedatenbank (FTDB) in Excel entwickelt, welche im nachfolgenden Kapitel eingehender behandelt wird. Datenintensive Werkzeugdaten und Schnittwerte werden aus der etablierten Werkzeugdatenbank TDM bezogen. Die Datenbank bietet vorgedachte Wissensstrukturen und eine vorhandene Schnittstelle zum CAD/CAM-System NX an. Diese Schnittstelle liefert aber lediglich Werkzeugdaten und Schnittwerte, jedoch keine Informationen zu gespeicherten Werkzeugmaschinen, Werkzeugaufnahmen, Vortatzköpfen oder Stammwerkzeugen. Ein direkter paralleler Zugriff auf die Oracle-Datenbank via ODBC mit SQL-Statements konnte nicht abschließend entwickelt werden, daher wurden die durch die Schnittstelle nicht unterstützten Daten übergangsweise redundant in der FTDB aufgebaut. Das PDM- und ERP-System, welches mit TeamCenter und SAP realisiert wird, steht ebenfalls teilweise in Verbindung zur Inferenzmaschine. Unabhängig vom Automatisierungsprozess bestehen zwischen der CAD/CAM/PP/Fertigung-Prozesskette und den Wissensbasen weitere Verbindungen.

Die dritte Säule bildet die CAD/CAM-Prozesskette. Darin eingebettet ist das Template, eine Vorlagenoperation mit dem das CAD/CAM-System an die wissensbasierte Fertigungsplanung angebunden wird. Das Template ist im PDM-System abgelegt und mit dem eingebundenen KF-Navigator in NX für die bidirektionale Wissenskopplung mit der Inferenzmaschine verantwortlich. Diese dritte Säule ist ebenso klar von den anderen beiden getrennt, wie es bei Inferenzmaschine und Wissensbasis der Fall ist. Somit dürfen keine Funktionen und kein Wissen in diesem Template hinterlegt werden, auch wenn dies bei NX zum Teil möglich ist.

In der nachfolgenden Aufstellung wird in Bezug zum oben Vorgestellten, eine kurze Übersicht zu den NX-Navigatoren gegeben. [SIE10], [SIE08b], [SIE08c], [KRI06], [SCH03]:

**Knowledge Fusion Navigator:** Im KF-Navigator wird das in der Inferenzmaschine konkretisierte Wissen der Wissensbasis in Objekten und Attributen abgelegt. Die Verknüpfung zur Inferenzmaschine und zu den Operationen besteht über diesen Navigator bidirektional.

**Programmnavigator:** Im Programmnavigator werden die Operationen nach ihrer Fertigungsreihenfolge geordnet. Hier werden die automatisiert erzeugten Bohroperationen mit Dreh- und Fräsoperationen kombiniert und über Spannungen und Bearbeitungsfolgen verteilt (vgl. Abbildung 28 auf Seite 83).

**Werkzeugnavigator:** Der Werkzeugnavigator verwaltet alle verwendeten Werkzeuge, wobei jedem Werkzeug die Operationen in denen dieses verwendet wird, untergeordnet sind.

**Geometrienavigator:** Im Geometrienavigator werden über Vererbung Geometriedaten, Geometriebezüge, Koordinatensysteme, Fertigteil(e), Rohteil(e), Spannmittel, Rückzugsebenen und weitere Einstellungen den Operationen zugewiesen. Gruppen von Features und deren Fertigungsoperationen werden hier automatisiert eingeordnet.

**Methodennavigator:** Über den Methodennavigator werden Operationen nach Fertigungstechnologien, wie Schruppen oder Schlichten geordnet, dies ist für die Schnittwertsuche erforderlich.

In den folgenden Kapiteln wird die vorgestellte Grundstruktur eingehender Besprochen und wesentliche Realisierungen zur Teilautomatisierung vorgestellt.

### 5.3 Wissensakquisition, Modellierung der Wissensbasis und Wissensverarbeitung

Die Wissensakquisition wird – wie im Konzept erarbeitet – in drei Schritten gesplittet durchgeführt. Im ersten Teil werden mit einzelnen Personen Fertigungswissen, mögliche Regeleinflüsse und konkrete Szenarien durchgesprochen. Diese teils persönlich geprägten Meinungen und Wissensbausteine ergeben Ideen und Ansätze für allgemeine Regeln. Dadurch, dass vielfach nicht die Sicht auf das Ganze vorhanden ist oder Inselektierungen angesprochen werden, müssen Wissens Elemente mit mehreren Personen in Einzelgesprächen durchgesprochen werden, um erste Bewerten des Wissens durchführen zu können. Aus den Details können grundsätzliche Rahmenbedingungen abgeleitet werden. Unterschiedliche fertigungstechnologische Möglichkeiten zu einem Wissens Element lassen dabei nicht den Schluss auf die *eine* richtige Lösung zu (siehe Beispiel in Kapitel 2.2), vielmehr ist an dieser Stelle Flexibilität in der Inferenzmaschine und der Wissensbasis einzuplanen, um mögliche Veränderungen und Alternativen auch in Zukunft verarbeiten zu können.

Die Wissens Elemente werden dann im zweiten Schritt der Wissensakquisition in einer Expertenrunde aufbereiten und durch gemeinschaftliche Entscheidungen in organisatorisches und standardisiertes Wissen überführt. Teilnehmer dieser Expertenrunde sind Fertigungsmitarbeiter aus der NC-Programmierung, der Arbeitsplanung, der Fertigung, der CAM-Entwicklung und der Konstruktion. In dieser Runde wird, das Regelwerk detailliert besprochen. Aus Gründen der Effektivität kann dabei nicht jede einzelne Option, Regel oder Einstellung entschieden werden, es ist daher eine gezielte Vorselektion und Datenvorbereitung durch den oder die Wissensmanager notwendig. Die optimale Wissensakquisition kann folglich nur von Personen

mit ausgeprägtem Prozessketten- und Automatisierungsverständnis durchgeführt werden. Diese Personen sind ebenfalls dafür verantwortlich, dass das Wissen, im dritten Schritt der Wissensakquisition, entsprechend in der Wissensbasis abgebildet wird.

Die persönlichen Gespräche und die Expertenrunde dienen neben der Wissensakquisition auch dem Abbauen von Ängsten und Blockaden gegenüber dem neuen System sowie zum Öffnen der Black Box.

Die Wissensbasis für Fertigungstechnologiewissen, die FTDB wurde im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut. Zur ersten Wissenserfassung wurde diese aus folgenden Gründen mit Excel aufgebaut:

- Die in der FTDB abgelegten Regeln sind eher wissensintensiv, anders als die datenintensiven Werkzeug- und Schnittwertdaten, die in TDM abgelegt werden. Die Anzahl der Datensätze ist vergleichsweise klein, allerdings ist der Inhalt komplexer und unterliegt in der Entwicklungs- und Testphase vielen Veränderungen. Die Regeleingabe und Regelpflege ist in Excel einfach und schnell möglich, zudem können die Standard-Excelfunktionen bei der Regeleingabe unterstützen.
- Excel ist als Standardsoftware bekannt und überall verfügbar, so dass direkt bei den Experten Wissen in die Wissensbasis allgemeinverständlich implementiert werden kann.
- Die Gesamtübersicht und Eingabe kann durch grafische und farbliche Unterstützung, sowie durch Pulldown-Menüs, ohne einen speziell entwickelten Anwenderdialog, vereinfacht werden.
- Die Regeldokumentation kann durch Bemerkungstexte an jeder Zelle somit an jeder einzelnen Regel erfolgen.
- Alle Wissensbasisbausteine werden als STRING abgelegt und besitzen zeilen- und spaltenweise Schlüsselwörter. Die Datei ist daher genauso aufgebaut wie eine datenbankbasierte Wissensbasis, so dass eine spätere Überführung in eine DB möglich ist.

Das detaillierte Erarbeiten von Wissen bei der Wissensakquisition und die Implementierung in der FTDB wird im Folgenden an konkreten Beispielen vorgestellt:

Anfangs werden bei der Akquisition von Fertigungstechnologiewissen einzelne bedingende Parameter erfasst, danach werden zusätzlich Beziehungen zwischen den einzelnen Werten aufgebaut. Beispielsweise zeigt Abbildung 31 exemplarisch, wie Regeln für das Durchmesser-Tiefen-Verhältnis aufgestellt werden. Auf der x- und der y-Achse sind die Einzelparameter Bohrungsdurchmesser (D) und -tiefe (L), auf der dritten Achse ist der Quotient von Länge und Durchmesser angetragen.

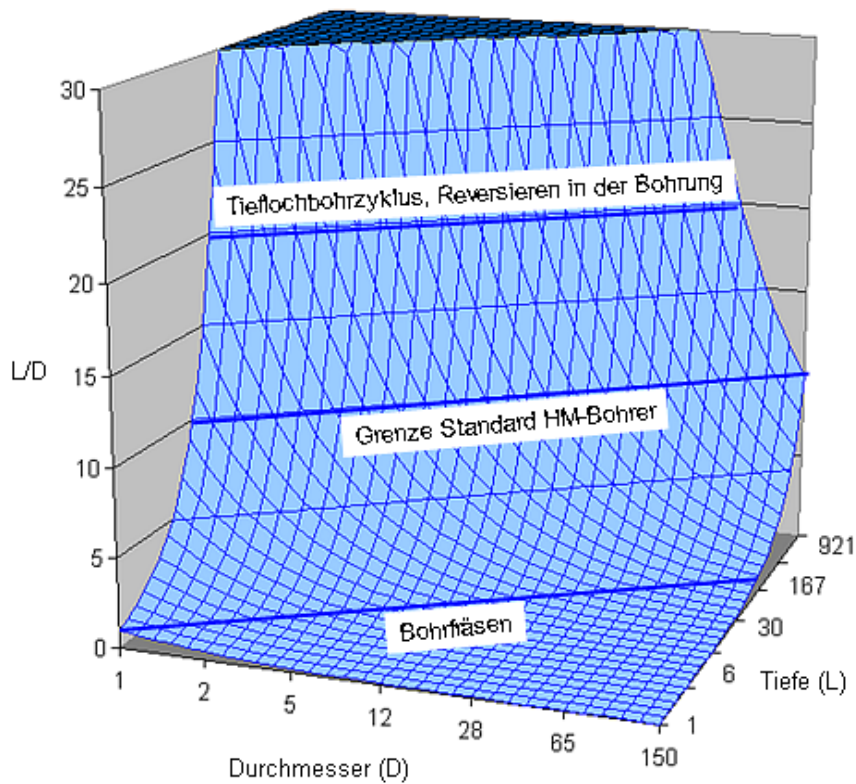


Abbildung 31: Durchmesser-Tiefen-Grenzen einer Bohrungsstufe

Abbildung 32 zeigt, wie das Durchmesser-Längen-Verhältnis über die Spalten 2-5 als Formeln in die FTDB eingebracht werden. Darüber hinaus zeigt die Abbildung, wie weiteres Wissen, in diesem Fall Bedingungen für Alternative Strategien abgelegt werden. In den Spalten von links nach rechts befinden sich: Werkstoffausnahmen, Mindesttiefe, Maximaltiefe, Minstdurchmesser, Maximaldurchmesser, Prioritätskennner und die erste von mehreren Spalten zu fertigungstechnologischen Bearbeitungsschritten; diese werden bei Auswahl der Alternative als Operation erzeugt. Der Prioritätskennner ist notwendig, damit überschneidende Regeln je nach Relevanz gewichtet werden können.

Werkstoffausnahmen	Mindesttiefe	Maximaltiefe	Minstdurchmesser	Maximaldurchmesser	Prioritätskennner	Auswahl Bearbeitung
10004, REST	0	SDIA * 5	0	5	201	KantbrHSS - Kantenchurch 45 Grad auf D = SDIA HS
10004, REST	0	SDIA * 4	5.001	15	201	KantbrHSS - Kantenchurch 45 Grad auf D = SDIA HS
10004, REST	0	60	15.001	25	201	KantbrHSS - Kantenchurch 45 Grad auf D = SDIA HS
10004, REST	0	60	25.001	50	201	Anbohr - Anbohren D = SDIA HS
10004, REST	0	60	50.001	REST	201	Anbohr - Anbohren D = SDIA HS
10004, REST	0	60	25.001	50	201	
10004, REST	SDIA * 4					Anfl - Anflachen mit P4 D = \$DIA_ANFL auf T = \$DEPTH_ANFL
10004, REST	60					Zentrieren6HT - Zentrieren der 6HT Bohrung
10004, REST	60					KegelSenk - KegelSenken D = \$DIA
10004, REST	60					FasenHSS - Fasen fuer \$CALLOUT auf D = \$DIAT + 2mm
10004, REST	60					FasenWPL - Fasen fuer \$CALLOUT auf D = \$DIAT + 2mm
10004, REST	60					FasenHSEinsatz - Fasen Einbausraum fuer \$CALLOUT auf D = \$DIAT + 2mm
10004, REST	60					FasenWPLEinsatz - Fasen Einbausraum fuer \$CALLOUT auf D = \$DIAT + 2mm

Abbildung 32: Bedingungen für Alternative Strategien in der FTDB

Die verwendeten Parameter, wie \$DIA sind Standardattribute, die in der gesamten FTDB verwendet werden können. Sie sind Feature-unabhängig und bei Bedarf ebenso unabhängig von der Stufe verwendbar – diese Informationen werden im konkreten Anwendungsfall über die dann aktuelle Feature-Gruppe bzw. das dann aktuelle Feature bezogen und zusammen mit der Stufeninformation und dem in Abbildung 33 gezeigten Mapping auf die tatsächlichen Attribute umgesetzt. Neben Feature-Attributen können Werkzeugattribute, Teileattribute, Operationsattribute, Systemattribute oder Standardattribute gemappt werden.

Feature-Attribute beziehen sich auf ein konkretes Feature im verwendeten CAD-Modell, Werkzeugattribute auf verwendete Werkzeuge des bearbeiteten Features. Teileattribute sind Attribute, die im PDM-System bezogen auf das gesamte Bauteil gespeichert werden. Operationsattribute sind gesetzte Parameter in erzeugten Fertigungsoperationen, der Aktuellen oder vorausgegangener Operationen. Systemattribute sind Informationen, die vom Betriebssystem zur Verfügung gestellt werden. Standardattribute können auch wiederum auf Standardattribute gemappt werden, um z. B. über mathematische Verrechnungen innerhalb des Mappings, fehlende Attribute zu berechnen. Abbildung 33 zeigt dies beispielhaft für das Standardattribut \$TIP\_ANG1 (Spitzenwinkel der ersten Stufe) beim Feature-Typ STEP2POCKET. Über eine Formel und durch Standardattributmapping wird das neue Standardattribut berechnet.

ATTRIBUTNAMEN	STEP2HOLE	STEP2POCKET	STEP3HOLE_THREAD
\$DIA4	FALSCH	FALSCH	
\$DIA3	FALSCH	FALSCH	
\$DIA2	DIAMETER_1	DIAMETER_1	DIAMETER_1
\$DIA1	DIAMETER_2	DIAMETER_2	DIAMETER_2
\$DIA-1	DIAMETER_2	FALSCH	THREAD_TAPPED_DRILL_SIZE
\$DIA-2	DIAMETER_1	FALSCH	THREAD_TAPPED_DRILL_SIZE
\$DIA-3	FALSCH	FALSCH	DIAMETER_2
\$DIA-4	FALSCH	FALSCH	DIAMETER_1
\$DIAMIN	DIAMETER_2	DIAMETER_2	THREAD_TAPPED_DRILL_SIZE
\$DIAMAX	DIAMETER_1	DIAMETER_1	DIAMETER_1
\$RADIUS	FALSCH	FALSCH	FALSCH
\$DIA_ANFL	SPG13_CAM_TAG_DIA_ANFL	SPG13_CAM_TAG_DIA_ANFL	SPG13_CAM_TAG_DIA_ANFL
\$TIP_ANG1	0	$\text{ROUND}(2 * \text{atan}(0.5 * \$DIA1 / (\$DEPTHMAX - \$DEPTH1)))$	0
\$TIP_ANG2	$\text{ROUND}(\$ANGLE\_BOOTOM1 * 2)$	$\text{ROUND}(\$ANGLE\_BOOTOM1 * 2)$	$\text{ROUND}(\$ANGLE\_BOOTOM2 * 2)$

Standard-  
attribut-  
mapping

**Abbildung 33:** Mapping von Feature-Attributen mit Standardattributen in der FTDB

Abbildung 34 zeigt Werkzeugauswahlkriterien einiger Operationen. In Spalte 1 ist das Operationskürzel, das zugleich der Tabellenschlüssel ist, abgelegt. In der zweiten Spalte die Prio-Werkzeuge zu den Operationen. Spalten 3-5 und 6-8 zeigen zwei von mehreren Werkzeugauswahlkriterien zu der jeweiligen Operation. Die Anzahl der Auswahlkriterien ist frei erweiterbar. Die abgebildeten Komponenten der Auswahlkriterien haben folgende Bedeutung:

- Dc : Werkzeugdurchmesser
- L4 : Kollisionsfreie Länge des Werkzeuges
- \$DIAT : Nenndurchmesser der aktuell bearbeiteten Stufe des aktuellen Features;

- \$DIA : Kerndurchmesser bei Gewinde oder Passung, bzw. Bohrungsdurchmesser der aktuell bearbeiteten Stufe des aktuellen Features
- \$OFFSET : Teileaufmaß an der Bohrung
- \$AUSKRAG : Zusätzliche Werkzeugauskraglänge gegen Kollisionen

Operationsname	PRIO-WKZ	1. Suchkriterium	6. Suchkriterium
Operationsname	TDM Nummern	Werkzeugauswahlkriterium 1	Werkzeugauswahlkriterium 6
FASENWPLEinsatz	62551111	Dc > MAX ( \$DIAT + 2, \$DIA + 1)	L4 >= \$OFFSET + \$AUSKRAG
FasenFraesP4	60421911, 60938711	Dc > MAX ( \$DIAT + 2, \$DIA + 1)	L4 >= \$OFFSET + \$AUSKRAG
KantbrFraesP4	60421911, 60938711	Dc > MAX ( \$DIAT + 2, \$DIA + 1)	L4 >= \$OFFSET + \$AUSKRAG
HM5D	62415111	Dc == \$DIA	L4 >= \$DIA * 5 + \$OFFSET + \$AUSKRAG
HM		Dc == \$DIA	L4 >= \$DEPTH * 1.2 + \$OFFSET + \$AUSKRAG
HM180		Dc == \$DIA	L4 >= \$DEPTH * 1.2 + \$OFFSET + \$AUSKRAG
HMEinsatz	62769111, 62512911	Dc == \$DIA	L4 >= \$DEPTH * 1.2 + \$OFFSET + \$AUSKRAG
HM2D	62415111	Dc == \$DIA	L4 >= \$DIA * 2 + \$OFFSET + \$AUSKRAG
HSSSB		Dc == \$DIA	L4 >= \$DEPTH * 1.2 + \$OFFSET + \$AUSKRAG
HSSSBWG4		Dc == \$DIA	L4 >= \$DEPTH * 1.2 + \$OFFSET + \$AUSKRAG
HSS5D		Dc == \$DIA	L4 >= \$DIA * 5 + \$OFFSET + \$AUSKRAG

**Abbildung 34:** Ausschnitt aus der Fertigungstechnologiedatenbank

Im Folgenden wird beispielhaft die Werkzeugsuche zu einer Operation (vgl. Abbildung 34, oberste Operation) beschrieben:

Operation „FASENWPLEinsatz“ umfasst das Anfasen von Bohrungen mit einem Wendepaltenwerkzeug (vgl. Abbildung 20 auf Seite 54, mittleres Bild). Die Operation ist speziell für die Sonderbohrung „Einsatz“ definiert. Die bevorzugten Werkzeuge sind für diese wiederholt auftretenden Bohrungen besonders lang ausgekragt und werden als Prio-Werkzeuge bei der Werkzeugsuche bevorzugt angezogen. Zwei beispielhaft ausgewählte geometrische Werkzeugsuchkriterien die für diese Operation verwendet werden sind:

Dc > MAX (\$DIAT + 2, \$DIA + 1): Das Werkzeug für die Anfas-Operation soll stets größer als der größte Durchmesser plus die doppelte Fasenbreite sein. Bei Gewindebohrungen oder Passungen konkret größer als der Nenndurchmesser plus 2 mm und bei Bohrungen ohne Gewinde und Passung größer als der Bohrungsdurchmesser plus 1 mm.

L4 >= \$OFFSET + \$AUSKRAG: Die kollisionsfreie Länge des Werkzeuges (vgl. Abbildung 26 auf Seite 73) soll mindestens so groß sein wie das Teileaufmaß addiert mit der im Pre-Prozess vorgegebenen zusätzlichen Auskraglänge.

Abbildung 35 zeigt den Prozess der Wissensverarbeitung des vorgestellten Beispiels anhand der Datenbankverbindungen und -anfragen für die Werkzeugsuche. In der ersten Abfrage werden die bereits beschriebenen Werkzeugsuchkriterien aus der FTDB abgefragt und logisch miteinander verknüpft. Die enthaltenen Standardattribute werden durch das Mapping im zweiten Schritt durch die tatsächlichen Attribute, wie z. B. Feature-Attribute ersetzt. Beim Mapping werden weitere Prozessattribute, wie die aktuelle Feature-Stufe und der Feature-Typ



aus dem KF-Navigator und aus dem CAD-Modell bezogen. Im dritten Schritt werden die tatsächlichen Attribute durch Zugriffe auf diverse Quellen durch konkrete Werte ersetzt, im dargestellten Fall durch Zugriff auf das Feature-Attribut des bearbeiteten Features im CAD-Modell. Im letzten Schritt wird der Werkzeugsuchausdruck für die TDM-Schnittstelle aufbereitet, z. B. werden logische und mathematische Operationen ausgeführt. Im Beispiel wird der maximale Wert der beiden Feature-Attribute \$DIAT und \$DIA weiter verwendet. Die TDM-Schnittstelle wandelt den Werkzeugsuchausdruck in ein SQL-Statement um und fragt in der TDM-Datenbank die gesuchten Werkzeuge ab.

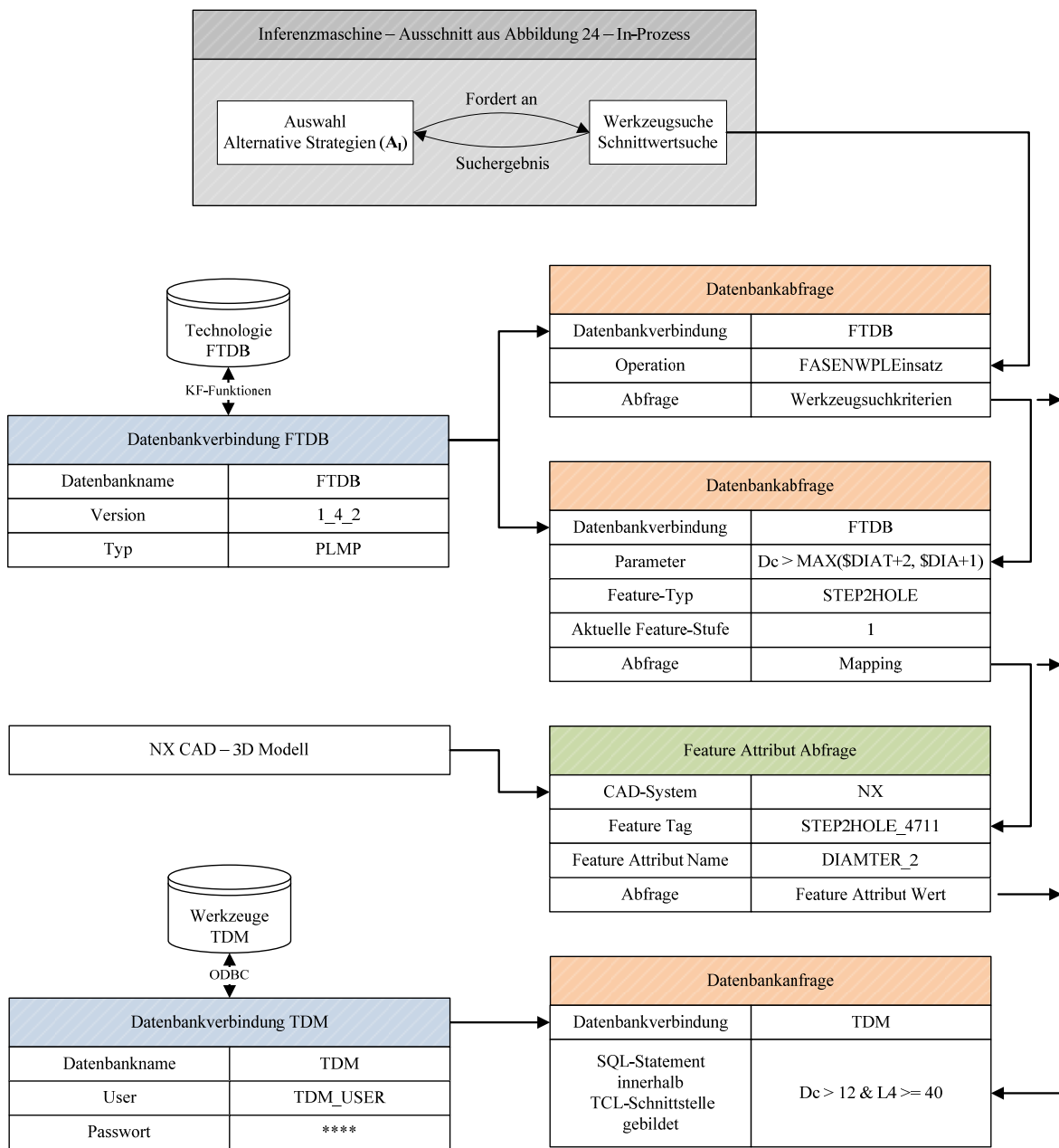


Abbildung 35: Datenbankanbindungen und -abfragen

## 5.4 Realisierung des Pre-, In- und Post-Prozesses

In diesem Kapitel wird die realisierte Inferenzmaschine vorgestellt. Das System wurde dabei konzeptionell nach den Kapiteln 3 und 4 entwickelt, diese Strukturen werden daher nicht erneut vorgestellt werden. Um den Fokus auf die Teilautomatisierung zu legen, werden nur die Anwenderinteraktionen im Pre-, In- und Post-Prozess vorgestellt.

### 5.4.1 Der Pre-Prozess im Anwendungssystem

Die Bearbeitung des Teils findet nach dem Master-Model-Ansatz statt. Fertigteil, Rohteil, Maschinenmodell und Spannmittel werden hierzu in einer Baugruppe miteinander verknüpft. Darüber hinaus werden CAM-relevante Informationen, wie Template, Werkzeugmaschine, Werkstück, Rohteilgeometrie, Spannmittel (als Kollisionsgeometrie) und Werkstoff definiert. Neben diesen grundsätzlichen Daten müssen die Randbedingungen für den 80/20-basierten In-Prozess festgelegt werden. Feature-unabhängiges und -spezifisches Wissen wird bei besonderen fertigungstechnologischen Bedingungen oder bei nicht konstruierter Modellgeometrie bzw. -semantik gezielt manuell definiert, um einen möglichst effizienten automatisiert erzeugten Fertigungsvorschlag zu erhalten. Abbildung 36 gibt einen Überblick über den realisierten Anwenderdialog für Feature-unabhängiges Wissen.

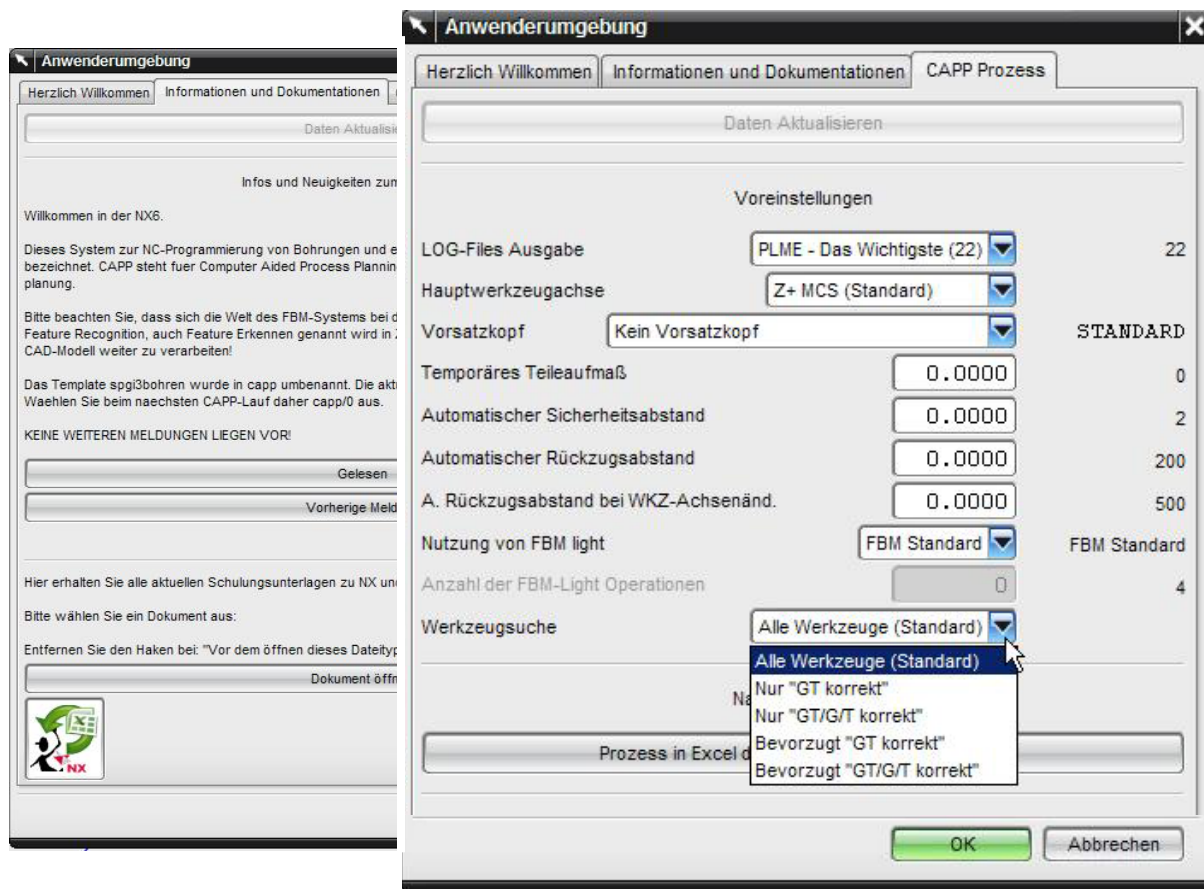
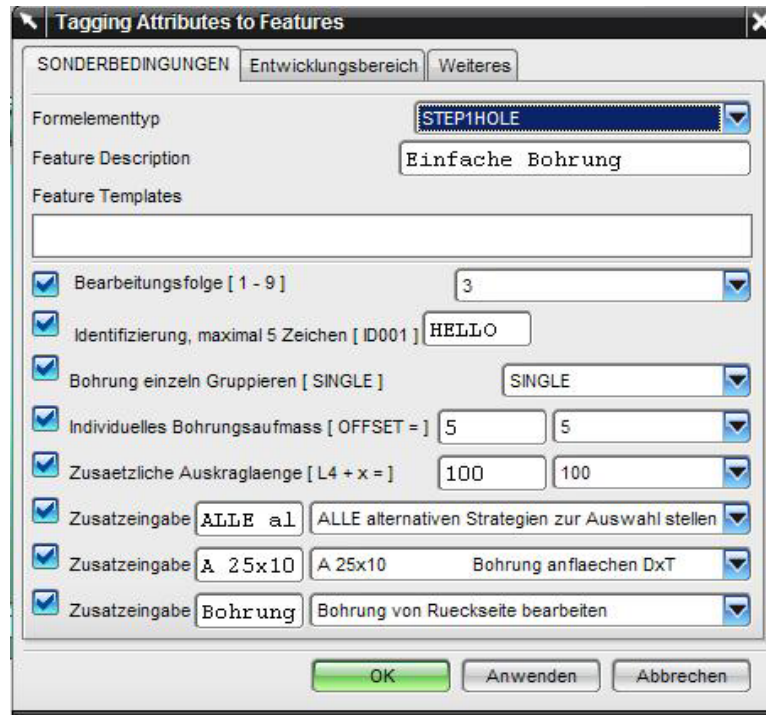


Abbildung 36: Feature-unabhängiger Anwenderdialog des Pre-Prozesses

Für die Umsetzung des Anwenderdialogs für den Feature-unabhängigen Pre-Prozess wurde eine in dieser Arbeit entwickelte Methode genutzt, die es ermöglicht den NX User Interface Styler für CAM-Interaktionen zu verwenden. Eingabedaten werden hierbei entweder im KF-Navigator als teilespezifisches Wissen in Form von Attributen abgelegt oder als grundsätzliche Anwendereinstellung in einer externen Datei, die bei der In-Prozess-Initialisierung ausgelesen wird. Darüber hinaus ist es möglich bereits im Pre-Prozess KF-Funktionen anzustoßen, die beispielsweise eine Vorab-Analyse durchführen oder in den späteren In-Prozess steuernd eingreifen. Im Einzelnen sind folgende Funktionen in der Anwenderumgebung implementiert:

- Eingabe von Feature-unabhängigen Konstruktionsdaten, wie z. B. das Bauteilmaß.
- Eingabe von Feature-unabhängigen Fertigungsbedingungen, wie z. B. Sicherheitsabstand, Rückzugsabstand, Vorzugsrichtung der Werkzeugachse bei Durchgangsbohrungen und Beeinflussung der Werkzeugsuche bzw. -auswahl.
- Definition des In-Prozessumfangs. Parallel zum In-Prozess wurde eine Not-Version des In-Prozesses entwickelt, um im Falle eines Ausfalls der Inferenzmaschine oder der Wissensbasis auf manuellem Wege eine NC-Programmierung betreiben zu können. Darüber hinaus kann dieses System bei sehr kleinen NC-Programmen oder bewusst manuell programmierten NC-Programmen verwendet werden. Das System überspringt die Feature-Gruppierung, Strategiesuche und Werkzeugsuche, und erzeugt lediglich für alle Features ein paar leere Bohroperationen.
- Definition des Ausgabeumfangs des Log-Files zum Prozessfortschritt.
- Informationsfenster mit Pflichtlesefeld, so dass Arbeitsanweisungen vor einem In-Prozess-Durchlauf gelesen werden müssen.
- Aufruf von Schulungsunterlagen und der Hilfe zum System.
- Aufruf des personalisierten Prozess-Feedback-Dokumentes.



**Abbildung 37:** Feature-spezifischer Anwenderdialog des Pre-Prozesses

Abbildung 37 gibt einen Überblick über den realisierten Anwenderdialog für Feature-abhängiges Wissen. Im Einzelnen wurden folgende Funktionen entwickelt:

- Die Bearbeitungsfolge dient zum manuellen Aufteilen aller Features in aufeinander folgende Bearbeitungsbereiche. Hierdurch ist es möglich mehrere Aufspannungen und logische Abfolgen gleichzeitig durch den NC-Programmierprozess zu führen.
- Die Operations- und Gruppen-ID am Anfang eines automatisch erzeugten Operations- oder Gruppennamens, z. B. ID015\_Bohren\_D10\_T50, kann hier individuell eingegeben werden. Allgemein hat die ID den Vorteil, dass die Kommunikation und der Feedbackprozess über alle Beteiligten der CAD/CAM-Prozesskette bis in die Fertigung deutlich vereinfacht werden kann. Die ID ermöglicht die einfache, schnelle und eindeutige Wiederfindung einer Operation oder Gruppe in den NX Navigatoren, im KF-Navigator, im NC-Programm, auf der Zeichnung und in Log-Files. Sie kann aus diesem Grund bei einem Feature auch nicht verändert, lediglich im Pre-Prozess gezielt festgelegt werden.
- Sonder-Features eignen sich dazu, spezielle Werkzeuge, Operationen, Operationsfolgen, Parameterbefüllungsregeln und Benennungslogiken bei Bedarf zuzuweisen. Tabelle 12 führt hierzu einige realisierte Funktionen auf:

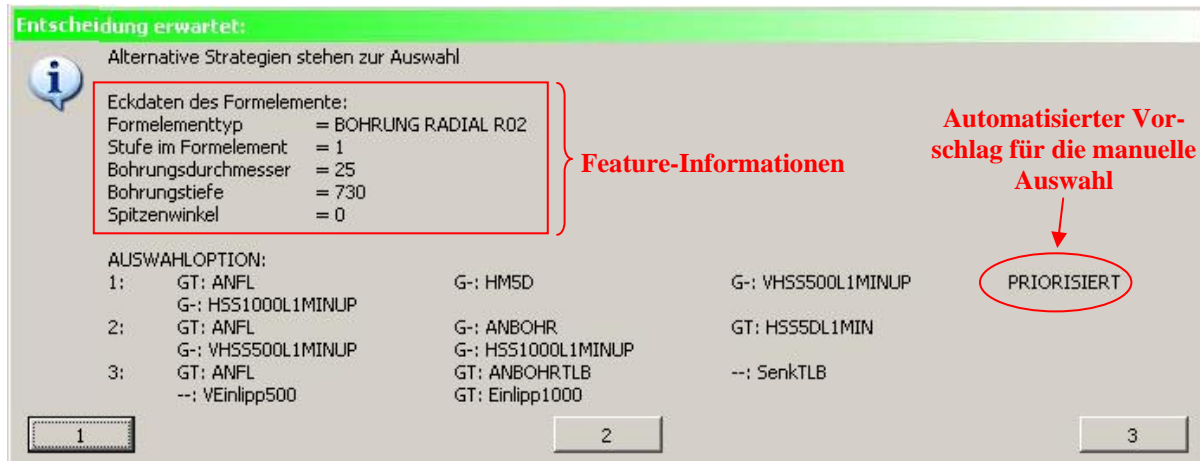
Beschreibung	Ziel / Effekt	Einfluss auf...
Sonderbohrung	Verwendung von speziellen Werkzeugen oder Operationsparametern	Werkzeugsuche, Operationsauswahl und -befüllung
Bevorzugte Fertigungsmethode	z. B. Gewinde fräsen dem Gewinde bohren bevorzugen, um den Gewindeauslauf zu verkürzen	Priorisierung und Auswahl der Alternativen Strategien
Feature einzeln gruppieren	Ein Feature soll gezielt einzeln gruppiert werden, um es im Post-Prozess manuell zu optimieren	Feature-Gruppierung
Feature anflächen	Die Bohrung taucht schräg ins Material ein und muss angefräst werden; NX kann dies nicht erkennen	Feature-Gruppierung, Operationserzeugung, Werkzeugsuche und Operationsparameterbefüllung
Individuelles Feature-Aufmaß	Einem Feature soll ein individuelles Aufmaß zugewiesen werden	Werkzeugsuche und Operationsparameterbefüllung
Zusätzliche Werkzeugauskraglänge	Aufgrund von Störkonturen im Bereich des Features wird ein längeres Werkzeug verlangt	Werkzeugsuche

**Tabelle 12:** Beispiele für Sonder-Features und deren Einflüsse auf den In-Prozess

#### 5.4.2 Der In-Prozess im Anwendungssystem

Nachdem alle notwendigen Daten im Pre-Prozess eingefügt wurden, wird der In-Prozess angestoßen. In diesem Prozessschritt kann eine NC-Programmierung über mehrere Bearbeitungsfolgen, Spannungen und Feature-Typen gleichzeitig durchgeführt werden. Im Ergebnis wird das Wissen aus der Wissensbasis durch die Inferenzmaschine konkretisiert. Gruppen und Operationen werden aus Vorlageoperationen des Templates heraus erzeugt. Operationen wird zusätzlich ein Werkzeug, das bei der Werkzeugsuche gefunden wurde, zugewiesen. Die Gruppen und Operationen werden in die benannten Navigatoren eingeordnet, dabei unterscheidet sich der KF-Navigator von den weiteren Navigatoren vor allem dadurch, dass der KF-Navigator zur Wissensablage dient und die weiteren Navigatoren als Schnittstelle zum Anwender, d. h. zur Wissensrepräsentation. Den Operationen werden über das jeweilige KF-Objekt im KF-Navigator durch Attributsbefüllung aus der Inferenzmaschine heraus, Operationsparameter zugewiesen. Fast alle Parameter können automatisiert gesetzt werden, einige wenige Parameter können aufgrund von Systemunzulänglichkeiten jedoch nicht automatisiert befüllt werden. Hierdurch begründet sich wie zu Beginn der Arbeit beschrieben auch die Teilautomatisierung. Nicht ansteuerbare Systemparameter sind aufgrund des Gebotes der Trennung von Wissensbasis und CAD/CAM-System nicht durch Voreinstellungen in verschiedenen Templates zu implementieren, sondern sind im manuellen Post-Prozess zu bearbeiten.

Während des In-Prozesses sind Anwenderinteraktionen erforderlich, um Entscheidungen, die auf dem automatisierten Wege nicht getroffen werden können, manuell durchzuführen. Im vorliegenden System wurden Anwenderdialoge im In-Prozess bei der Auswahl von Alternativen Strategien und Werkzeugen implementiert:



**Abbildung 38:** Anwenderdialog zur manuellen Auswahl einer Alternativen Strategie

Abbildung 38 zeigt das Auswahlfenster zur manuellen Auswahl einer Alternativen Strategie. Dem Anwender werden im Dialog Informationen zum Feature, sowie die Liste der Alternativen Strategien, in diesem Fall drei, dargestellt. Jede Strategie besteht dabei aus einer Abfolge von Operationen, z. B. bei Auswahloption 1:<sup>20</sup> ANFL<sup>21</sup>, HM5D<sup>22</sup>, VHSS500L1MINUP<sup>23</sup>, HSS1000L1MINUP<sup>24</sup>. Zusätzlich werden zu den Operationen Informationen zur durchgeführten Werkzeug- und Schnittwertsuche, wie in Kapitel 4.1.2.3.2 erarbeitet, präsentiert: Werkzeug zur Operation gefunden (G), Schnittdaten zur Operation gefunden (T). Anhand der im angesprochenen Kapitel entwickelten Bewertungsmethodik der Alternativen Strategien gibt der automatisierte In-Prozess dem Anwender zudem auch einen Auswahlvorschlag, mit Hilfe der Kenner „PRIORISIERT“ oder „VOLLKOMMEN“ vor. Die manuelle Auswahl der Alternativen Strategie erfolgt über die Schalter am unteren Rand des Anwenderdialoges.

<sup>20</sup> Eine leserfreundlichere Darstellung der Operationsnamen ist noch zu entwickeln, bisher werden aus Platzgründen an dieser Stelle die Operationsschlüsselwörter ausgegeben. Die Details werden in den weiteren Fußnoten erläutert.

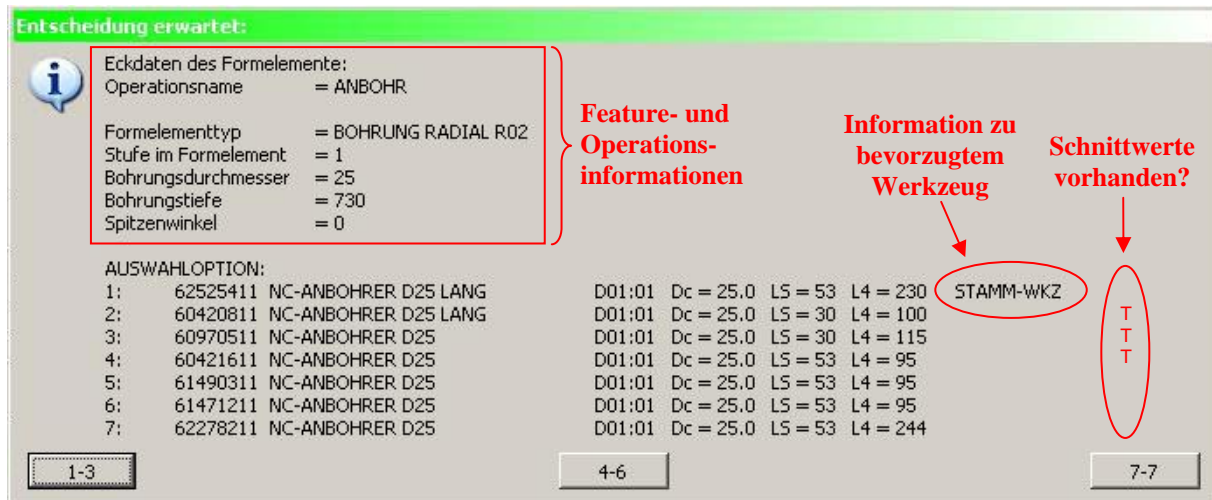
<sup>21</sup> ANFL: Operation zum Anfläachen einer schräg in die Oberfläche eintauchenden Bohrung durch Fräsen

<sup>22</sup> HM5D: Vorbohroperation, der Schneidstoff des Werkzeuges ist Vollhartmetall, Bohrtiefe ist der fünffache Durchmesser

<sup>23</sup> VHSS500L1MINUP: Vorbohroperation, der Schneidstoff des Werkzeuges ist HSS, die Bohrtiefe ist 500 mm, das Werkzeugauswahlkriterium Mindestschneidenlänge ( $L_{1min}$ ) wurde angewandt, UP steht für die Anwendung eines speziell für dieses Werkzeug und diese Werkzeugmaschine entwickelten Tieflochbohrzyklus'

<sup>24</sup> HSS1000L1MINUP: Bohroperation, der Schneidstoff des Werkzeuges ist HSS, die Bohrtiefe ist die konstruierte Bohrtiefe oder maximal 1000 mm, das Werkzeugauswahlkriterium Mindestschneidenlänge ( $L_{1min}$ ) wurde angewandt, UP steht für die Anwendung eines speziell für dieses Werkzeug und diese Werkzeugmaschine entwickelten Tieflochbohrzyklus'

Die folgende Abbildung 39 zeigt den manuellen Anwenderdialog für die Werkzeugauswahl, in dem ebenfalls im oberen Bereich des Anwenderdialogs eine Zuordnung zum Feature und auch zur Fertigungsoperation dargestellt wird:



**Abbildung 39:** Anwenderdialog zur manuellen Auswahl eines Werkzeuges

Die zur Auswahl stehenden Werkzeuge sind zusammen mit wesentlichen geometrischen Parametern in einer Werkzeugliste präsentiert. Zusätzlich wird dem Anwender angezeigt, ob Prio-, Stamm- oder Used-Werkzeuge in der Liste enthalten sind, was durch Kenner deutlich gemacht wird. In der vorliegenden Abbildung ist dies der Kenner „STAMM-WKZ“. Keines der Werkzeuge in Abbildung 39 besitzt für die vorliegende Werkstoff-Schneidstoff-Kombination Schnittwerte, andernfalls würde zudem ein „T“ in einer Spalte hinter dem Kenner für bevorzugte Werkzeuge erscheinen, angedeutet durch „T“. Die manuelle Auswahl des Werkzeugs erfolgt über die Schalter am unteren Rand des Anwenderdialoges.

### 5.4.3 Der Post-Prozess im Anwendungssystem

Im Post-Prozess wurden Rückmeldeprozess formalisiert, um eine kanalisierte und dokumentierte Prozessverbesserung erreichen zu können. Rückmeldungen leisten dabei sowohl der In-Prozess an den NC-Programmierer zur Verbesserung des konkreten NC-Programms als auch der NC-Programmierer und der Maschinenbediener an den Administrator der NC-Automatisierung, um die Inferenzmaschine und die Wissensbasis zu optimieren.

Als Beispiel wurden im Postprozessor automatisiert erzeugte Rückmeldeblätter für den Maschinenbediener eingerichtet, die über definierte Wege zurück an den Administrator gesendet werden. Vereinbart wurde dabei zwischen den Abteilungen, dass jedes NC-Programm, ob richtig oder falsch, kommentiert zurückgesandt wird. Die Prozessqualität und die Fehlerquantität, sowie die Entwicklung über die Zeit, werden dadurch messbar.

Für die automatisierte Rückmeldung des In-Prozesses wurde eine Struktur entwickelt, die individuell je nach Anwenderanforderung Operationsparameter zu allen Operationen strukturiert in tabellarischer Form dem Anwender darstellt. Im sogenannten Feedbacksheet können sowohl alle Werte einer Operation als auch gleiche Parameter über alle Operationen hinweg überblickt werden. Eine thematische Ordnung schafft hierbei zusätzlichen Überblick, alle Sichten können durch den Anwender individuell konfiguriert werden. (vgl. Abbildung 40). Um diese Qualitätssicherung im Post-Prozess nicht nur schnell, sondern auch gesichert durchführen zu können, sind die aufgelisteten Fehler und manuellen Nacharbeiten strukturiert und dokumentiert abarbeitbar. Jeder Fehler und jede Operation kann als freigegeben dokumentiert werden, so dass der NC-Programmierer effizient und gesichert zum fertigen NC-Programm gelangt. Eine strukturlose Suche nach fehlerhaften Werten in den einzelnen Operationen und NX-Navigatoren kann so vermieden werden. Das Feedbacksheet bietet zudem die Möglichkeit logische Verknüpfungen zwischen Werten zu erzeugen, so dass Werte automatisiert gegeneinander überprüft und bewertet werden können.

Zeile	Fehler aufgetreten	ERZEUGUNGSDATUM	OPERATION NAME	OPERATION STRATEGIE	OPERATION STUFE	GEOMETRIEGRUPPEN NAME	PROGRAMMGRUPPEN NAME	METHODEN NAME	FEHLER WKZ	FEHLER TECHNO	FEHLER Geometriedaten	FEHLER Operationserzeugung
1	FEHLER	Di 21	OPERATION NAME									
2	OK	Di 21	OPERATION STRATEGIE									
3	FEHLER	Di 21	OPERATION STUFE									
4	FEHLER	Di 21	GEOMETRIEGRUPPEN NAME									
5	FEHLER	Di 21	PROGRAMMGRUPPEN NAME									
6	FEHLER	Di 21	METHODEN NAME									
7	FEHLER	Di 21	ERZEUGUNGSDATUM									
8	FEHLER	Di 21	100 ANBOHR_S1_TD25									
9	FEHLER	Di 21	100 ANBOHR_S1_TD25									
10	FEHLER	Di 21	100 ANBOHR_S1_TD25									
11	FEHLER	Di 21	100 ANBOHR_S1_TD25									
12	FEHLER	Di 21	100 ANBOHR_S1_TD25									
13	FEHLER	Di 21	100 ANBOHR_S1_TD25									
14	OK	Di 21	100 ANBOHR_S1_TD25									
15	FEHLER	Di 2008-11-04 12:33:21	X2395_HM_S1_TD52									
16	FEHLER	Di 2008-11-04 12:33:36	ABCDE_HM_S1_TD52_1									
17	FEHLER	Di 2008-11-04 12:34:10	ID11_ANBOHR_S1_TD25									
18	OK	Di 2008-11-04 12:34:15	ID11_HSS_S1_TD6									
19	FEHLER	Di 2008-11-04 12:34:57	ID12_HM_S1_TD52									
20	FEHLER	Di 2008-11-04 12:35:31	ID13_HM_S1_TD52									
21	FEHLER	Di 2008-11-04 12:35:47	ID14_HM_S1_TD52									
22												
23												
24												
25												
26												
28												
29												

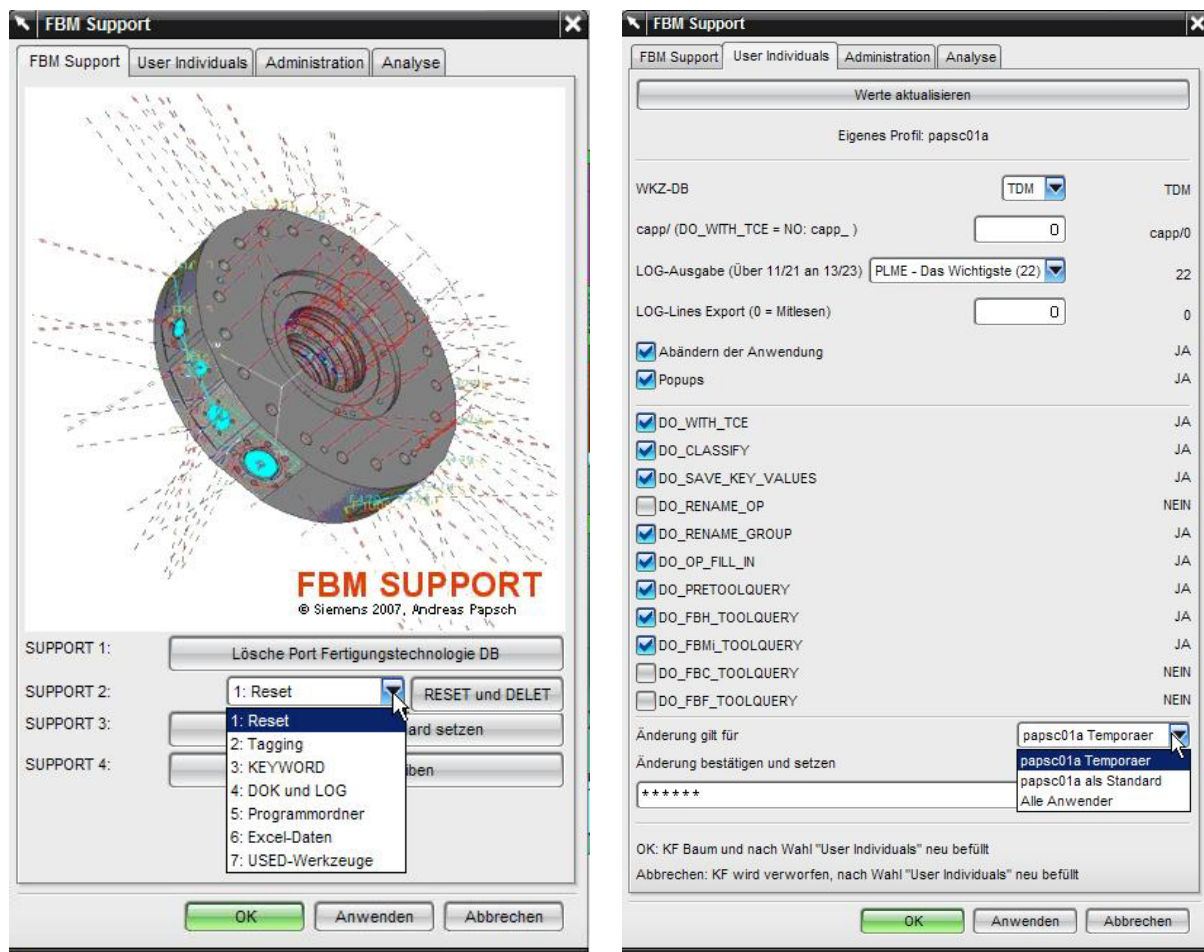
Abbildung 40: Feedbacksheet zur Unterstützung der Tätigkeiten im Post-Prozess.

Das Feedbacksheet dokumentiert zudem automatisiert getroffene Entscheidungen, für den Fall, dass im In-Prozess Anwenderinteraktionen ausgeschlossen wurden. Während des In-Prozessdurchlaufs werden dann keine manuellen Anwenderdialoge eingeblendet, sondern automatisiert die *priorisierte* Alternative Strategie oder das *erste* Werkzeug aus der Werkzeugsuche verwendet. Diese getroffenen Entscheidungen werden dokumentiert, so dass die Auswahl, für den Fall dass der automatisiert vorgeschlagene NC-Prozess nicht die manuelle Qualitätssicherung durch den Anwender besteht, erneut durchgeführt werden kann.



## 5.5 Implementierte Lösungen zur Sicherung und Steigerung der Qualität

Die in Kapitel 4.2 vorgestellten Ansätze zur Wartbarkeit des Regelwerkes, dem Aufbau und der automatisierten Pflege von Werkzeug- und Schnittdatensätzen, eine CAD- und CAM-Methodik und die Anwender- und Administratorschnittstellen zur Qualitätssicherung konnten erfolgreich im NC-Prozess und im Anwendungssystem implementiert werden. Um diese Methoden und Funktionen aus Administratorsicht gezielt einsetzen zu können wurde eine Schnittstelle entwickelt, die dem Administrator einen umfangreichen Zugriff auf das System ermöglicht:



**Abbildung 41:** Anwenderdialog: Supportumgebung

Abbildung 41 zeigt einen Ausschnitt der Administrationsumgebung, die im realisierten System „Supportumgebung“ genannt wird. Der entwickelte Anwenderdialog verfolgt zwei grundsätzliche Ziele, zum einen die gezielte Unterstützung des Anwenders im Falle eines Fehlers bzw. einer bisher nicht abgedeckten Fertigungssituation und zum zweiten die Unterstützung der Administration, um eine stetige Systemweiterentwicklung zu ermöglichen.

Die Anwendung der Supportumgebung wurde hierzu in drei Funktionsbereiche eingeteilt:

1. Der erste Funktionsbereich ist ohne Passwort anwendbar (vgl. Abbildung 41, links). Durch selbsterklärende Schaltflächen ist es möglich Teile des Prozesses bei konkreten Fehlern zurück zu setzen.
2. Der zweite Funktionsbereich ist für Anwender, sogenannte „Keyuser“, zugänglich (vgl. Abbildung 41, rechts). Durch Eingabe eines Passwortes im unteren Bereich des Anwenderdialoges können bei komplexeren Fehlern durch erfahrene Anwender weitergehende Lösungsversuche unternommen werden. Darüber hinaus ist es möglich einzelne Bereiche des In-Prozesses gezielt zu manipulieren, so dass beispielsweise ein anderes Template verwendet wird.
3. Der dritte Funktionsbereich umfasst den kompletten Dialog und ist nur für Administratoren freigeschaltet. Alle Eingaben können für den eigenen Benutzer, durch einen Benutzerwechsel für jeden anderen Benutzer (beispielsweise bei einem Telefonsupport), oder für alle Benutzer verändert werden. Wichtige Funktionen dabei sind neben den zuvor bereits erwähnten:
  - Wahl der Werkzeugdatenbank und Umschalten zwischen verschiedenen Datenbanken.
  - Ausgabeumfang der Log-Files, um den Prozessfortschritt, Statistiken, Fehler und Pflegeaufgaben zu dokumentieren. Pflegeaufgaben können automatisiert z. B. durch die logische Parameterkontrolle der Werkzeuge gefunden werden (vgl. Kapitel 4.1.2.3.2).
  - Hinzuschalten von Analysetools, um Zugriffszeiten und -häufigkeiten auf Funktionen und Features zu analysieren.

## 5.6 Kritische Bewertung der Ergebnisse der Realisierung

Ausgangssituation zu Beginn der Entwicklung des Anwendungssystems war eine erfahrungsbasierte, wenig standardisierte, teils instinktiv arbeitende und umfangreich diskret automatisierte NC-Programmierung, die auf Basis von vorhandenen NC-Programmen Anpasslösungen geschaffen hat. Die NC-Programmierung hat sich aufgrund dieser konkreten, fallbasierten Arbeitsweise zu einem hochflexiblen Teil der Fertigungsplanung entwickelt. Dazu beigetragen haben ein sehr komplexes Produkt, heterogene Strukturen in der Fertigung und ein wenig gepflegter Werkzeugdatenbestand. Inselektierungen und personengebundene Lösungsansätze entwickelten sich über die Jahre. Um in dieser komplexen Struktur dennoch eine angemessene Ergebnisqualität gewährleisten zu können, wurden vielfältige manuelle Sicherheitsmechanismen und Kontrollinstanzen in den Prozess implementiert, die die Wirtschaftlichkeit jedoch negativ beeinflussten.

Um eine wesentliche Verbesserung dessen zu erreichen, wurde eine teilautomatisierte NC-Programmierung für komplexe Bohrprozesse nach den erarbeiteten Konzepten in Kapitel 3 und 4 aufgebaut. Die wissensbasierte Fertigungsplanung wurde hierzu in eine bestehende CAD/CAM-Prozesskette integriert. Die Umsetzung dieser Konzepte, die Anwendung der Methoden und die entwickelte Software werden im Folgenden bewertet.

### **Die Inferenzmaschine**

In Knowledge Fusion konnten der größte Teil der beschriebenen Konzepte und Ziele der Inferenzmaschine umgesetzt werden. Vor allem das überbeschriebene Ablaufmodell (Pre, In und Post), die Schnittstellen zu den notwendigen Wissensbasen und die beschriebenen Konzepte zur Auswahl der Alternativen Strategien und der Werkzeug- und Schnittwertsuche sind erfolgreich implementiert worden. Im Besonderen ist die bidirektionale Integration durch KF zu erwähnen, da hierdurch z. B. assoziative Parameterwerte und eine nachträgliche regelbasierte Werkzeugsuche im Post-Prozess realisiert werden konnten.

Die größten Hindernisse für die Entwicklung und den Betrieb der Inferenzmaschine bildeten NX-Unzulänglichkeiten, die vergleichsweise lange Rechenzeit von Knowledge Fusion und die Anfangs hohe Fehleranfälligkeit der Inferenzmaschine im Zusammenwirken mit NX. Die UMF-Technologie konnte aufgrund fehlender Featurezugriffe nur methodisch angelehnt entwickelt werden, durch Überführung des Systems in den Machine Knowledge Editor von NX kann die notwendige Feature-Nähe jedoch erreicht werden und diese Technologie vollständig angewendet werden.

### **Die Wissensbasis**

Grundsätzlich zeigte sich bei der Wissensakquisition, dass die zeitliche Dauer und die Aufwände für die Ableitung aller Regeln deutlich größer als erwartet waren. Verglichen mit dem Entwicklungsaufwand der Inferenzmaschine, übersteigt der Aufwand für die Wissensbasis den Aufwand für die Entwicklung der Inferenzmaschine sogar deutlich. Gründe hierfür waren die Fertigungskomplexität, sowie die in der Umfeldanalyse des Verdichters festgestellte Variantenvielfalt und kombinatorische Komplexität. Menschliche Blockaden und Black-Box-Effekte kamen außerdem hinzu. Durch die Umsetzung der Methodik zur Modellierung der Wissensbasis konnte der Mensch jedoch erfolgreich in den Aufbau der Wissensbasis eingebunden werden.

Die Trennung der Wissensbasis in die regelnintensive FTDB und die datenintensive Werkzeugdatenbank TDM war hierbei von großem Vorteil, da mehrere Personen eigenverantwort-

lich den Aufbau der Wissensbasis unterstützten konnten. Die FTDB war als Excel-Dokument hierbei hilfreich, da sie allgemein verständlich und überall zugänglich war. Die Überführung der FTDB in eine Datenbank sollte zu einem späteren Zeitpunkt aufgrund der zu erwartenden höheren Performance jedoch angestrebt werden.

Besonders hervorzuheben ist der Ansatz zur automatisierten Pflege der Schnittwertdatensätze, die Statuskenner bei Werkzeugen und Schnittwerten, sowie die bedarfsorientierte Pflege der Werkzeuge nach automatisierten Log-File-Einträgen durch Werkzeugparameteranalysen. Durch diese computerunterstützte Pflege der Wissensbasen ist ein deutlich schnelleres Erreichen des angestrebten Automatisierungsgrades und der Wirtschaftlichkeit möglich. Die Implementierung dieser Konzepte konnte jedoch nicht vollautomatisiert durchgeführt werden, da in NX nicht auf alle notwendigen Daten zugegriffen werden konnte.

### **Der 80/20-Automatisierungsgrad**

Der Ansatz eine 80/20-Teilautomatisierung anzustreben und diese in Pre-, In- und Post-Prozess aufzugliedern, brachte wesentliche Erfolge:

- Schnelle Anwendung erster Automatisierungsansätze
- Gezielte Implementierung von Wissen nach Wichtigkeit und Relevanz
- Begrenztes System, wodurch die Regeltransparenz erhalten bleibt
- Der Anwender fühlt sich weniger *seiner* Arbeit „beraubt“, vielmehr sieht er eine Chance, dass er langweilige Routinetätigkeiten „loswerden“ kann

Kompliziert gestaltet sich die Trennung und Kennzeichnung zwischen richtig ermittelten In-Prozess-Ergebnissen und Ergebnissen, die fehlerhaft oder mit Optimierungspotential ausgegeben werden. Durch das Feedbacksheet sind vom Ansatz her gute Möglichkeiten gegeben, den NC-Vorschlag systematisch auf Optimierungspotentiale und Fehler zu untersuchen. Durch die unterschiedlichen Anwenderdialoge bestehen zum Teil jedoch Probleme beim Anwender, die Übersicht über alle Methoden, Funktionen und Informationen zu behalten.

### **Die CAD-Methodik**

Ein wichtiger Erfolgsfaktor für das realisierte System ist eine für Methodenvorgaben offene Konstruktion. Durch formalisierte Rückmeldeprozesse und gemeinsame Entwicklungsrounds zur wissensbasierten Fertigungsplanung ist eine durchgängige CAD/CAM-Prozesskette geschaffen worden, die Inseloptimierungen und innerbetriebliche Mauern vermeidet. Die entwickelte CAD-Methodik ist erfolgreich in die Konstruktionsprozesse eingebracht worden und wird im Zuge von Software-Updates kontinuierlich an die veränderten Bedingungen ange-

passt. Dies konnte beim Update von der NX4 zur NX6 erfolgreich durchgeführt werden, da die Einführung der Feature-Erkennung wesentlichen Einfluss auf die CAD-Methodik und die bis dahin rein Feature-basierte Konstruktion hatte.

### **Pflege von Daten, Strukturen und Softwarekomponenten**

Das vorgestellte Konzept mit den klar getrennten Bereichen Inferenzmaschine, Wissensbasis und CAD/CAM-Ankopplung konnte ausführlich bei Versionsupdates getestet werden. Es sind Updates von Daten und Datenstrukturen in der FTDB, der Werkzeug- und Schnittdatenbank und den Templates durchgeführt worden. Darüber hinaus wurde die Software der Werkzeug- und Schnittdatenbank TDM auf V4, NX4 auf NX6, TeamCenter 2005 auf TeamCenter 2007 und die Inferenzmaschine regelmäßig upgedatet.

### **Gesamtwirtschaftlichkeit**

Verglichen mit dem Standard-NX-System erbringt das entwickelte teilautomatisierte NC-Programmiersystem für Bohrungen wesentliche Aufwandseinsparungen, da viele Entscheidungen erfolgreich durch das wissensbasierte System durchgeführt werden können. Die Gesamtwirtschaftlichkeit wurde gesteigert, da Wissen zentral, standardisiert und in neuester Form für alle Anwender zur Verfügung steht. Durch die automatisierte Regelverarbeitung wird zudem gewährleistet, dass das Fertigungswissen immer stets vollständig beachtet und keine Randbedingungen übergangen werden. Die Teilautomatisierung eröffnet zudem Vorteile in anderen Bereichen, so können gezielt Werkzeuge zur Verwendung bevorzugt und andere herausgenommen werden. Der Werkzeugschrank kann verkleinert und performante, kostengünstige Werkzeuge können bevorzugt werden.

Die Gesamtwirtschaftlichkeit wird jedoch durch die schwache Performance der Interpretersprache KF und die vielen (notwendigen) Datenbankzugriffe gedrückt. Rechenzeiten von durchschnittlich 30 Sekunden für ein Feature sind zwar deutlich schneller als die manuelle NC-Programmierung, führen jedoch zu längeren Wartezeiten und schmälern eine agile NC-Programmiertätigkeit. Trotz umfangreicher, Rechenzeit-optimierender Analysen (Messung der Zugriffszeiten auf Datenbanken, der Rechenzeiten und der Zugriffshäufigkeiten auf Funktionen, Objekte und Attribute) und Maßnahmen (beispielsweise Veränderung einzelner Algorithmen im Programmcode, Zwischenspeichern und Wiederverwenden von Teilergebnissen und das Vorhalten von Teilen der Wissensbasis im KF-Baum) konnte die Rechenzeit für ein Feature nicht auf wenige Sekunden gesenkt werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die komplexer werdenden unternehmensübergreifenden Produktionsstrukturen, der steigende Kostendruck und die individuellen Ansprüche der Kunden im Maschinenbau fordern eine Nutzung der CAx-Tools über die Standard-Anwendung hinaus. Wissensbasierte Ansätze entlang der gesamten CAD/CAM-Prozesskette bis in die Fertigung können hierbei eine mögliche Lösungsstrategie sein. Bohrungen gehören dabei – als eine der am häufigsten konstruierten geometrischen Formen – zu den Geometrien mit besonderem Potential für eine wissensbasierte Fertigungsplanung. Die NC-Programmierzzeit ist gegenüber der Zerspanzeit, verglichen mit dem Drehen oder Fräsen, relativ groß.

Als Ziel dieser Arbeit wurde hierzu ein Ansatz zur wissensbasierten Fertigungsplanung mit dem Fokus auf eine 80/20-teilautomatisierte NC-Programmierung von komplexen Bohrprozessen entwickelt. Basierend auf bestehenden Forschungsergebnissen und in Bezug zu kommerziellen Softwareherstellern, die NC-Automatisierung beim Bohren anbieten, wurden zunächst Defizite erarbeitet. Anhand dieser konnte der kausale Schluss gezogen werden, dass eine *Teil*automatisierung im Umfeld eines Unikat- oder Kleinserienfertigers aufgrund der hohen Innovationskraft und der Variantenvielfalt sinnvoll ist.

Aufbauend auf diesem Zwischenergebnis wurden fünf unterschiedliche Automatisierungsgrade klassifiziert, bezüglich wesentlicher Merkmale beurteilt und unter Betrachtung der Kosten für Erstimplementierung sowie der laufenden Kosten und ihres Nutzen auf ihre relative Wirtschaftlichkeit hin untersucht. Die höchste Wirtschaftlichkeit stellt sich hiernach bei einem 80%igen Automatisierungsgrad ein, was durch eine Sensitivitätsanalyse der Annahmen zudem überprüft werden konnte. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit sind daher gezielt Anforderungen an und eine Methodik zur Modellierung einer 80/20-teilautomatisierte Fertigungsplanung mit dem Fokus auf die NC-Programmierung entwickelt worden. Zur Erarbeitung einer Wissensbasis als Teil des Expertensystems, wurden Methoden zur Wissensakquisition angewandt und eine Modellierungsmethodik der Wissensbasis nach Waterman et al. aufgebaut. Zusätzlich wurden Ursache-Wirkungs-Prinzipien in einem Ishikawa-Diagramm aufgezeigt und im Detail, wie z. B. im Hinblick auf menschliche Blockaden und Black-Box-Effekte ausgearbeitet. Die Inferenzmaschine wurde, aufbauend auf etablierten Grundlagen, wie der Featuretechnologie, die Rückwärtsverkettung im Planungsprozess und die UMF-Technologie, zusammen mit der Wissensbasis entwickelt. Im Besonderen wurde bereits bei der Entwicklung sehr auf die anschließende Administration während der Betriebsphase geachtet, so dass Softwareupdates möglich und die Wartbarkeit gegeben sind.

Die entwickelten Methoden und Konzepte sind in einem Ablaufmodell einer teilautomatisierten NC-Programmierung von komplexen Bohrprozessen verarbeitet worden. Es wurde zwischen kognitiv-basierter manueller und computerbasierter automatisierter Wissensverarbeitung unterschieden und der Prozess in Pre-, In- und Post-Prozess dreigeteilt. Vor- und Nachbearbeitung der automatisierten Ergebnisse wurden jedoch eng miteinander verbunden, so dass nicht automatisierte Strukturen vor, während und nach dem In-Prozess, wie beispielsweise fehlerhafte und optimierungswürdige Automatisierungsergebnisse, schnell und gezielt manuell bearbeitet werden können. Im Besonderen wurden eine Werkzeug- und Schnittwertsuche basierend auf eingebundenen bestehenden Datenbanken entwickelt, die die Suchmöglichkeiten verglichen mit bestehenden deutlich verbessert. Die Administration wurde durch Softwarelösungen, Fehlerdiagnosen und Feedback-Konzepte unterstützt, so dass die Wissensbasis auch im Betriebszustand pflegbar bleibt. Der Mangel an Datenqualität und -quantität in der Werkzeug- und Schnittwertdatenbank aufgrund veränderter Anforderungen, wurde gezielt mit Pflegekonzepten gelöst. Besonders die automatisierte Schnittwertpflege ist hier herauszuheben, da hierdurch eine Datenpflege nach Werkzeugbedarf erreicht werden kann.

Das entwickelte Ablaufmodell wurde in einem Realisierungsbeispiel bei der Firma Siemens in Duisburg validiert. Das Unikatprodukt *Großverdichter* besitzt eine sehr variantenreiche Bohrungsstruktur, welche in einer Umfeldanalyse nachgewiesen wurde. Die Inferenzmaschine wurde in NX Knowledge Fusion aufgebaut. Die Wissensbasis wurde, gesplittet in die datenintensive Werkzeug- und Schnittdatenverwaltung sowie die wissensintensiven Fertigungstechnologieregeln, in der TDM-Datenbank und der Fertigungstechnologiedatenbank aufgebaut. Die Ziele der Teilautomatisierung wurden nach den beschriebenen Konzepten umgesetzt. Die größten Herausforderungen hierbei waren Black-Box-Effekte, komplexe Regel- und Prozessstrukturen, sowie die in NX bidirektional implementierte Sprache Knowledge Fusion, die nicht genügend performant war. Gelöst werden konnte dies durch die Anwendung der entwickelten Konzepte und Methoden bei der Wissensakquisition und der Entwicklung der Inferenzmaschine und in der Test- und Betriebsphase durch CAD/CAM-Methodiken und strukturierte Feedbackprozesse. Abschließend konnte nachweislich eine optimierte Gesamtwirtschaftlichkeit, verglichen mit dem Standard-NX-System erreicht werden.

Die in dieser Arbeit entwickelten Ansätze, Konzepte und Methoden zur wissensbasierten Fertigungsplanung mit Konzentration auf eine 80/20-teilautomatisierte NC-Programmierung bieten eine Grundlage für weitere Arbeiten zu verwandten Themen, wie die wissensbasierte Fertigungsplanung beim Fräsen oder für tiefer gehenden Details:

Die vorgestellten Ansätze zur Inferenzmaschine bieten Raum für weitergehende wissenschaftliche Überlegungen zur Teilautomatisierung der Spannmittelplanung, der Maschinenauswahl und der Aufteilung der Bearbeitungsfolgen. Eine In-Prozess-Kopplung zur Maschinensimulation kann zudem eine vollständige Kollisionsüberwachung des Maschineninnenraumes während der automatisierten NC-Programmierung gewährleisten, wodurch wiederum die Werkzeugauswahl und Operationsparameterbelegung optimiert werden können. Beim Aufbau der Wissensbasis sind computerunterstützte Prozesse zum Erfassen von anwenderindividuellen Regeln eingehender zu diskutieren, wobei Ansätze bei der datenintensiven Wissensbasis aufgezeigt werden konnten. Im Realisierungsbeispiel zeigte sich, dass der größte Aufwand beim Aufbau der NC-Automatisierung in der Ersterfassung und Pflege sowohl der regelintensiven als auch der datenintensiven Wissens Elemente lagen.

Als besondere Details wurden drei Elemente der Teilautomatisierung identifiziert, die es weiter zu untersuchen gilt: Erstens sind Ansätze für standort- und zuliefererübergreifende Konzepte zu durchdenken. Eingangs wurden hier bereits web-basierte oder STEP-basierte Ansätze angesprochen, die vertiefend zu diskutieren wären. Zweitens konnten die Themen Toleranzen und Toleranzbezüge, sowie Nennmaß- und Mittenmaßmodellierung in dieser Arbeit nicht diskutiert werden, da das Thema in sich sehr umfangreich ist. Diese sind jedoch wichtig für eine optimale Detailkoppelung von CAD und CAM. Zum Dritten ist die Frage zu untersuchen, wann bei immer weiter wachsenden Automatisierungsstrukturen, eine erzeugte Operation als veraltet gekennzeichnet werden sollte und Nacharbeiten erforderlich werden. Im Sinne der Gesamtwirtschaftlichkeit sollten Veränderungen in der vorgelagerten Prozesskette nicht pauschal zu veralteten Fertigungsoperationen führen, die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge sind hierzu zu erarbeiten und gezielt in das CAD/CAM-Prozessnetz einzuarbeiten.



## Literaturverzeichnis

- [AP03] Arnold, F.; Podhl, G.: *Features and Design Patterns – A Comparison. Research Group for Computer Application in Engineering Design*. Department of Mechanical and Chemical Engineering, University of Kaiserslautern. 2003
- [BAY04] Baykasoglu, A.; *Special issue: techniques and practices to improve responsiveness in industry*. Journal of manufacturing technology management, 15.2004, 1. Bradford, Emerald, 2004
- [BHS07] Boersch, I.; Heinsohn, J.; Socher, R.: *Wissensverarbeitung*. Spektrum Akademischer Verlag, München, 2007
- [BIN03] Binner, F.: *Prozessorientierte Arbeitsvorbereitung*. Carl Hanser Verlag, München, 2003
- [BK06] Beierle, C.; Kern-Isberner, G.: *Methoden wissensbasierter Systeme*. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2006
- [BNB03] Bronsvort, W. F.; Noort, A.; Berg, J.: *Product Development with Multiple-View Features Modeling*. Aus Feature Based Life-Cycle Modeling, p. 57-76. International Federation for Information Processing, Dordrecht, Netherlands, 2003
- [BNM08] Babic, B.; Nestic, N.; Miljkovic, Z.: *A review of automated feature recognition with rule-based pattern recognition*. Aus Computer in industry : an international journal, Vol. 59, No. 4 (4.2008), p. 321-337. Amsterdam, North Holland Publ. Co., 2008
- [BSB08] Bommer, C.; Spindler, M.; Barr, V.: *Softwarewartung*. dpunkt.verlag, Heidelberg, 2008
- [BSM06] Bullinger, H.-J.; Stender, S.; Moderich, K.-U.: *Innovation für eine Produktion 2020 in Deutschland*. Aus Industrie Management, Februar 2006, p. 39-43. GI-TO mbH Verlag, Berlin, 2006
- [BT91] Belaen, S.; Tilley, S.: *PRESS, A Knowledge Based Process Planer For Sheet Metal Fabrication*. Scientific and technical research centre of the metalworking industry, Brüssel, 1991
- [CAI07] Cai, J.: *Development of a Reference Feature-based Machining Process Planning Data Model for Web-enabled Exchange in Extended Enterprise*. Shaker Verlag, Aachen, 2007
- [CM09] Campos, J. G.; Miguez, L. R.: *Manufacturing bidirectional data flows in advanced collaborative CAD/CAM/CNC chains*. International journal of manu-

- facturing technology and management*. Vol. 16, No. 4, pp. 343-360. Inder-science Enterprises, Milton Keynes, 2009
- [DES08] Dassault Systems: CAD/CAM-Software CATIA. www.3ds.com
- [DIN8589] DIN 8589. *Fertigungsverfahren*. Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [DIN19222] DIN 19222. *Leittechnik – Begriffe*. Beuth Verlag, Berlin, 2001
- [DIN19233] DIN 19233. *Prozessautomatisierung. Automatisierung mit Prozessrechnensystemen*. Beuth Verlag, Berlin, 1998
- [DTX07] Dean, P.; Tu, Y.; Xue, D.: *Process Planning, Scheduling and Control for One-of-a-Kind Production*. Aus *Process Planning and Scheduling for Distributed Manufacturing*, p. 109-136. Springer Verlag, London, 2007
- [EAT08] Ebrahim, N. A.; Ahmed, S.; Taha, Z.: *Concurrent Collaboration in Research and Development*. DECON 2008, National Conference of Design and Concurrent Engineering. Universiti Teknikal Malaysia Melaka. 2008
- [ELD94] Ewert, W.; Leidholdt, F.; Dürr, H.: *Repräsentation technoloischer Wissensbasen für die Wissensakquisition durch maschinelles Lernen in der generierenden Arbeitsplanerstellung*. Lehrstuhl für Fertigungslehre, TU Chemnitz-Zwickau. Chemnitz, 1994
- [ERV88] Van't Erve, A.H.: *Generative Computer Aided Process Planning for Part Manufacturing – An Expert System Approach*. PhD-Thesis. University of Twente. 1988
- [EVE94] Eversheim, W.; Müller, G.; Katzy, B. R.: *NC-Verfahrenskette*. Beuth Verlag, Berlin, 1994
- [FC00] Fitzsimmons, V.; Collier, R.: *Standards*. Aus *Handbook of Industrial Automation*, p. 733-748. Marcel Dekker, Inc., New York, 2000
- [FL96] Feldhusen, J.; Lashin, G.: *CAD-Systemwechsel 2D → 3D*. Aus *Effiziente Anwendung und Weiterentwicklung von CAD/CAM-Technologien*. VDI-Berichte Nr. 1289, p. 485-501. VDI Verlag, Düsseldorf, 1996
- [FS08] Fritz, A.; Schulze, G.: *Fertigungstechnik*. Springer Verlag, Berlin, 2008
- [FVP07] Forschungsvereinigung Programmiersprachen (FVP); WZL der RWTH Aachen: *Automatische Feature-Erkennung als Beitrag zur Effizienzverbesserung in der CAD/CAM-Integration*. AIF 14289N. 2007
- [GF07] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: *Dubbel*. Springer Verlag, Berlin, 2007
- [GS96] Grimm, R.; Stichsel, B.: *Erfahrungsbericht über die Einführung einer 3D-CAD-Software in der Konstruktion*. Aus *Effiziente Anwendung und Weiter-*

- entwicklung von CAD/CAM-Technologien. VDI-Berichte Nr. 1289, p 543-558. VDI Verlag, Düsseldorf, 1996
- [GT07] Gerhards, S.; Trauner, B.: *Wissensmanagement*. Carl Hanser Verlag, München, 2007
- [GÜL03] Güldenbergh, S.: *Wissensmanagement und Wissenscontrolling in lernenden Organisationen*. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2003
- [HAL03] Halevi, G.: *Process and Operation Planning*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (Netherlands), 2003
- [HFR03] Haasis, S.; Frank, D.; Rommel, B.; Weyrich, M.: *Frature-Based Integration of Product, Process and Resurces*. Aus Feature Based Life-Cycle Modelling, p. 93-108. International Federation for Information Processing, Dordrecht, Netherlands, 2003
- [HGJ07] Henning, K.; Gramatke, A.; Jakobs, J. S.: *Informatik im Maschinenbau*. Druckerei und Verlagsgruppe Mainz, Aachen, 2007
- [HHE05] Hoffmann, M.; Hack, O.; Eickenberg, S.: *CAD/CAM mit CATIA V5 – NC-Programmierung, Postprocessing, Simulation*. Carl Hanser Verlag, München, 2005
- [HOF01] Hoffmann, R.: *Integration höherwertiger Feature-Elemente in den rechnergestützten Konstruktionsprozess*. Aus Fortschrittsberichte VDI-Reihe 20 Nr. 344. VDI Verlag, Düsseldorf, 2002
- [HW83] Hayes-Roth, F.; Waterman, D.: *Building expert systems*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1999
- [HYU08] Hyun, Y. T.: *Erfahrungsgelietete NC-Programmierung auf Basis einer featurebasierten NC-Programmiersprache (STEP-NC)*. Apprimus Verlag, Aachen, 2008
- [INT08] CNC Software, Inc.: *CAM-Software Mastercam*. Vertrieb Deutschland Inter-CAM-Deutschland GmbH. [www.mastercam.de](http://www.mastercam.de), 2008
- [INT10] CNC Software, Inc.: *CAM-Software Mastercam*. Vertrieb Deutschland Inter-CAM-Deutschland GmbH. [www.mastercam.de](http://www.mastercam.de), 2010
- [JON92] Jonkers, F.J.: *A software architecture for CAPP systems*. PhD-Thesis, University of Twente, 1992
- [KC07] Kendal, S.; Creen, M.: *An Introduction to Knowledge Engineering*. Springer Verlag, London, 2007
- [KK02] König, W.; Klocke, F.: *Fertigungsverfahren Drehen, Fräsen, Bohren*. Springer

- Verlag, Berlin, 2002
- [KK06] Klar, M.; Klar, S.: *Einfach Generieren*. Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [KKK03] Ko, K.; Kim, B. H.; Kim, D. H.; Choi, B. K.: *A Hierarchical CAPP System Architecture for Die Cavity Machining*. Aus Feature Based Life-Cycle Modeling, p. 129-145. International Federation for Information Processing, Dordrecht, Netherlands, 2003
- [KOC04] Koch, R.: *Das 80/20-Prinzip*. Campus Verlag, Frankfurt, 2004
- [KÖH02] Köhler, P.: *Moderne Konstruktionsmethoden im Maschinenbau*. Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG, Würzburg, 2002
- [KR07] Kief, H. B.; Roschiwal, H. A.: *NC/CNC Handbuch 2007/2008*. Carl Hanser Verlag, München, 2007
- [KR09] Kief, H. B.; Roschiwal, H. A.: *NC/CNC Handbuch 2009/2010*. Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [KRI06] Krieg, U.: *Konstruieren mit Unigraphics NX4*. Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [LAN04] Langmann, R.: *Taschenbuch der Automatisierung*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2004
- [LEH08] Lehner, F.: *Wissensmanagement*. Carl Hanser Verlag, München, 2008
- [LI07] Li, S.: *Entwicklung eines Verfahrens zur Automatisierung der CAD/CAM-Kette in der Einzelfertigung am Beispiel von Mauerwerkssteinen*. Dissertation. Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, 2007.
- [LM06] Lück-Schneider, D.; Maninger, S.: *Wissensmanagement*. Statistisches Bundesamt, Bonn, 2006
- [LUP09] Lupa, N.: *Einsatz wissensbasierter Features für die automatische Konfiguration von Produktkomponenten*. Cuvillier Verlag, Göttingen, 2009
- [MCC93] McClure, C.: *Software-Automatisierung*. Carl Hanser Verlag, München, 1993
- [MYW08] Ming, X. G.; Yan, J. Q.; Wang, X. H.; Li, S. N.; Lu, W. F.; Peng, Q. J.; Ma, Y. S.: *Collaborative process Planning and manufacturing in product lifecycle management*. Aus Computers in industry: an international journal, Vol. 59, No. 2/3, p. 154-166. North Holland Publ. Co., Amsterdam, 2008
- [OPE10] OPEN MIND Technologie AG: CAM-Software HyperMill. [www.openmind-tech.com](http://www.openmind-tech.com), 2010
- [PAU96] Paucksch, E.: *Zerspanungstechnik*. Vieweg, Wiesbaden, 1996
- [PC07] Peng, Q.; Chung, C.: *The integration of manufacturing systems using visual-*

- ised CAPP for agile manufacturing*. Aus International journal of manufacturing technology and management, 2007, Vol. 11, No. 3/4, p. 338-354. Inderscience Enterprises, Milton Keynes, 2007
- [PTC08] PTC: CAD-Software Pro/Engineer und CAM-Software ProNC. www.ptc.com
- [RIC03] Richter, S.: *Feature-based Programming*. Addison-Wesley Verlag, München, 2003
- [RIS06] Risse, K.: Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl. Dissertation. Fakultät für Maschinenwesen, RWTH Aachen. 2006
- [SAG07] Sormaz, D. N.; Arumugam, J.; Ganduri, C.: *Integration of Rule-based Process Selection with Virtual Machining for Distributed Manufacturing Planning*. Aus Process Planning and Scheduling for Distributed Manufacturing, p. 61-90. Springer Verlag, London, 2007
- [SAR00] Saridis, G. N.: *Intelligent Manufacturing in Industrial Automation*. Aus Handbook of Industrial Automation, p. 485-488. Marcel Dekker, Inc., New York, 2000
- [SC06] Scheer, A.-W.; Cocchi, A.: *Bausteine und Prozesse im PLM*. Aus Prozessorientiertes Produkt-Lifecycle-Management, p. 27-42. Springer Verlag, Berlin, 2006
- [SCA03] Scallan, P.: *Process Planning*. Butterworth-Heinemann, Burlington, 2003
- [SCH97] Schneipers, P.: *Handbuch der Metallbearbeitung*. Europa-Lehrmittel Verlag, Haan-Gruiten, 1997
- [SCH99] Schnieder, E.: *Methoden der Automatisierung – Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme*. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1999
- [SCH00] Schöning, U.: *Logik der Informatik*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2000
- [SCH03] Schmid, M.: *CAD mit Unigraphics NX*. J. Schlembach Fachverlag, Wilburgstetten, 2003
- [SCH06] Schanz, G.: *Implizites Wissen*. Rainer Hampp Verlag, München, 2006
- [SCH07] Schöffler, J.: *Nutzung von 3D-Objekten in den Folgeprozessen*. Aus CAD/CAM Report – Engineering Magazin, Teil 1 Ausgabe August 2007, p.38-41, Teil 2 Ausgabe September 2007, p. 34-37. Dressler Verlag, Darmstadt, 2008

- [SCL06] Suh, S.-H.; Chung, D.-H.; Lee, B.-E.; Shin, S.; Choi, I.; Kim, K.-M.: *STEP-compliant CCN system for turing. Data model, architecture and implementation*. Computer Aided Design, Vol. 38, No. 6, pp. 677-688. 2006
- [SIE08b] Siemens AG: *NX Knowledge Fusion – Knowledge Based Engineering*. [http://www.plm.automation.siemens.com/de\\_de/Images/knowledge\\_fusion\\_tcm73-62405.pdf](http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/Images/knowledge_fusion_tcm73-62405.pdf). 2008
- [SIE08c] Siemens AG: *NX Feature Based Holemaking*. [http://www.plm.automation.siemens.com/de\\_de/Images/holemaking\\_tcm73-62401.pdf](http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/Images/holemaking_tcm73-62401.pdf). 2008
- [SIE10] Siemens AG: CAD/CAM-Software NX und weitere PLM Produkte. [www.plm.automation.siemens.com](http://www.plm.automation.siemens.com), 2010
- [SOL08] SolidCAM GmbH: [www.solidcam.de](http://www.solidcam.de)
- [SOM95] Sommer, M.: *Ein Beitrag zur automatischen NC-Programmierung gezeigt am Beispiel der Fertigungsplanung zur spanenden Bearbeitung von Leiterplatten*. Shaker Verlag, Aachen, 1995
- [SP08] Stekolschik, A.; Papsch, A.: „Nur“ 3D-CAD ist nicht genug! Aus *CAD/CAM Report – Engineering Magazin*. Ausgabe Dezember 2008, p.12-16. Dressler Verlag, Darmstadt, 2008
- [SSP04] Schnauffer, H.-G.; Stieler-Lorenz, B.; Peters, S.: *Wissen vernetzen. Wissensmanagement in der Produktentwicklung*. Springer-Verlag, Berlin, 2004
- [SW07] Sundararajan, V.; Wright, P.: *CyberCut: A Coordinated Pipeline of Design, Process Planning and Manufacture*. Aus *Process Planning and Scheduling for Distributed Manufacturing*, p. 91-108. Springer Verlag, London, 2007
- [SD07] Schneider, U.; Disterer, G.: *Taschenbuch der Informatik*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, München, 2007
- [TAS05] Tassi, E. J.: *Knowledge-Features für die Produkt- und Technologieentwicklung in umformtechnischen Prozessketten*. Zwickau, Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2005
- [TF08] Theodorou, P.; Florou, G.: *Manufacturing strategies and financial performance – The effect of advanced information technology: CAD/CAM systems*. Aus *Omega : the international journal of management science*, Vol. 36, No. 1, (2. 2008), p. 107-121. Elsevier, Oxford, 2008
- [TNH07] Tsang, V. Y.; Ngai, B. K.; Huang, G. Q.; Lo, V. H.; Cheng, K. C.: *Web-based Polishing Process Planning Using Data-mining Techniques*. Aus *Process*

- Planning and Scheduling for Distributed Manufacturing, p. 31-60. Springer Verlag, London, 2007
- [VD93] Vosniakos, G.C.; Davies, B.J.: *Knowledge-Based Selection and Sequencing of Hole-Making Operations for Prismatic Parts*. Aus The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 8, p. 9-16. Springer-Verlag, London, 1993
- [VDI1322] Verein Deutscher Ingenieure: *Features verbessern die Produktentwicklung – Integration von Prozessketten*. Tagung Berlin, 20./21. Februar 1997 / VDI Gesellschaft Entwicklung, Konstruktion, Vertrieb. Aus VDI Berichte – Bericht Nr. 1322. VDI Verlag, Düsseldorf, 1997
- [VDI2218] Verein Deutscher Ingenieure: *Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Feature Technologie*. Aus VDI-Richtlinien, Richtlinie Nr. 2218. VDI Verlag, Düsseldorf, 2003
- [VS05] Vanja, S.; Schmidt, R.: *Ein Beitrag für eine vereinfachte technische Bewertung von CAx-Systemen*. Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik, Magdeburg, 2005
- [VWS94] Vajna, S.; Weber, C.; Schlingensiepen, J.; Schlottmann, D.: *CAD/CAM für Ingenieure*. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1994
- [WAS99] Wassermann, O.: *Das intelligente Unternehmen*. Springer-Verlag, Berlin, 1999
- [WAT99] Waterman, D.: *A guide to expert systems*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1999
- [WEG07] Wegner, H.: *Ein System zum fertigungstechnologischen Wissensmanagement*. Aus *Berichte aus der Produktionstechnik*. Shaker Verlag, Aachen, 2007
- [WEN07] Wendenburg, M.: *Geballtes Wissen für die Produktentwicklung*. WIN-Verlag, Vaterstetten, 2007
- [WFC07] Wang, L.; Feng, H.-Y.; Cai, N.; Jin, W.: *An Effective Approach for Distributed Process Planning Enabled by Event-driven Function Blocks*. Aus *Process Planning and Scheduling for Distributed Manufacturing*, p. 1-30. Springer Verlag, London, 2007
- [WIT06] Witt, G.: *Taschenbuch der Fertigungstechnik*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [WOL07] Wolfangel, C.: *Wartung objektorientierter Software – Empirische Untersuchung von Maintenance-Prozessen*. VDM Verlag, Saarbrücken, 2007
- [WS07] Wang, L.; Shen, W.: *Process Planning and Scheduling for Distributed Manufacturing*. Springer Verlag, London, 2007

- [WTW02] Wang, K.; Tang, M.; Wang, Y.; Estensen, L.: *Knowledge-Based CAD/CAPP/CAM Integration System for Manufacturing*. Aus Digital enterprise challenges / life-cycle approach to management and production / ed. by George L. Kovacs, Ausgabe 2002, p. 406-415. Kluwer, Boston, 2002
- [WP07] Witt, G.; Papsch, A.: *Flexible Automatisierung der CAD/CAM-Prozesskette*. Aus CAD/CAM Report – Engineering Magazin, Ausgabe Juli 2007, p.30-35. Dressler Verlag, Darmstadt, 2007
- [ZA94] Zhang, H. C.; Alting, L.: *Computerized Manufacturing – Process Planning Systems*. 1<sup>st</sup> Edition. Chapman & Hall, London, 1994.
- [ZOE07] Zöller-Greer, P.: *Künstliche Intelligenz*. Composita Verlag, Wächtersbach, 2007



Wirtschaftlichkeitsbewertung einer automatisierten NC-Programmierung von komplexen Bohrprozessen integriert in eine geschlossene CAD/CAM-Prozesskette für Kleinserien- und Unikatfertiger. Betrachtung **mittlerer** Kosten.

<b>Annahmen zu rel. Nutzen und Aufwand</b>	<b>Einheit</b>	<b>manuell</b>	<b>diskret</b>	<b>50 / 50</b>	<b>MAX</b>	<b>80 / 20</b>	<b>quasi</b>
Anteil Automatisierung	%	0,0	20,0	50,0	78,84	80,0	95,0
Anteil Manuell	%	100,0	80,0	50,0	21,2	20,0	5,0
Rel. Aufwand Erstinvestition	%	0,0	0,2	2,3	25,6	28,3	100,0
Rel. Aufwand QS automatisch	%	0,0	21,1	52,6	83,0	84,2	100,0
Rel. Aufwand QS manuell	%	100,0	80,0	50,0	21,2	20,0	5,0
Rel. Aufwand Konstruktionsmethodik	%	25,0	25,1	26,7	44,2	46,2	100,0
Rel. Aufwand Fertigungstechnologie/-methodik	%	25,0	25,1	26,7	44,2	46,2	100,0
Rel. Aufwand Systemadministration	%	0,0	0,2	2,3	25,6	28,3	100,0
Rel. Nutzen der Automatisierung	%	0,0	20,0	50,0	78,8	80,0	95,0
<b>Personalaufwand</b>							
Personalkosten für einen Administrator relativ zu einem Anwender							
Aufwand Erstinvestition				20 Adm.jahre	1,5		
Aufwand QS automatisch				2 Admin/a	1,5	30,0 Anw./a	
Aufwand QS manuell				4 Anw/a	1,0	4,0 Anw/a	
Aufwand Konstruktionsmethodik2				1 Admin/a	1,5	1,5 Anw/a	
Aufwand Fertigungstechnologie/-methodik				1 Admin/a	1,5	1,5 Anw/a	
Aufwand Systemadministration				5 Admin/a	1,5	7,5 Anw/a	
Nutzen der Automatisierung				20 Anw/a	-1,0	-20,0 Anw/a	
<b>Produkt aus Nutzen/Aufwand und Personalaufwand</b>							
Aufwand Erstinvestition	Anw/a	0,0	0,1	0,7	7,7	8,5	30,0
Aufwand QS automatisch	Anw/a	0,0	0,6	1,6	2,5	2,5	3,0
Aufwand QS manuell	Anw/a	4,0	3,2	1,9	0,7	0,6	0,0
Aufwand Konstruktionsmethodik	Anw/a	0,4	0,4	0,4	0,7	0,7	1,5
Aufwand Fertigungstechnologie/-methodik	Anw/a	0,4	0,4	0,4	0,7	0,7	1,5
Aufwand Systemadministration	Anw/a	0,0	0,0	0,2	1,9	2,1	7,5
Nutzen der Automatisierung	Anw/a	0,0	-4,0	-10,0	-15,8	-16,0	-19,0
Summe einmalige Aufwände	Anw/a	0,0	0,1	0,7	7,7	8,5	30,0
Summe laufende Aufwände und Nutzen	Anw/a	4,8	0,6	-5,6	-9,3	-9,3	-5,5
<b>Rel. Wirtschaftlichkeit laufender Aufwände und Nutzen</b>	%	<b>-51</b>	<b>-6</b>	<b>60</b>	<b>100,13</b>	<b>100</b>	<b>59</b>
<b>Rel. Vergleich der Automatisierungsgrade</b>	%	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>73</b>	<b>100,09</b>	<b>100</b>	<b>73</b>
<b>Amortisationszeit der Erstinvestition</b>	a	<b>0,0</b>	<b>-0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>	<b>5,5</b>

Wirtschaftlichkeitsbewertung einer automatisierten NC-Programmierung von komplexen Bohrprozessen integriert in eine geschlossene CAD/CAM-Prozesskette für Kleinserien- und Unikatfertiger. Betrachtung um 20 % niedrigerer Kosten.

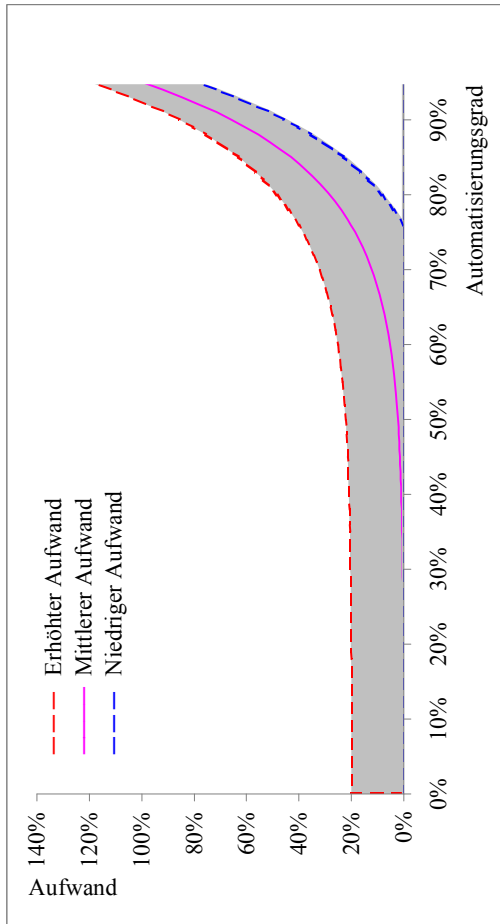
Annahmen zu rel. Nutzen und Aufwand		Einheit	manuell	diskret	50 / 50	MAX	80 / 20	quasi
Anteil Automatisierung		%	0,0	20,0	50,0	81,85	80,0	95,0
Anteil Manuell		%	100,0	80,0	50,0	18,2	20,0	5,0
Rel. Aufwand Erstinvestition		%	0,0	0,0	0,0	13,0	8,3	80,0
Rel. Aufwand QS automatisch		%	0,0	1,1	32,6	66,2	64,2	80,0
Rel. Aufwand QS manuell		%	80,0	60,0	30,0	0,0	0,0	0,0
Rel. Aufwand Konstruktionsmethodik		%	5,0	5,1	6,7	29,8	26,2	80,0
Rel. Aufwand Fertigungstechnologie/-methodik		%	5,0	5,1	6,7	29,8	26,2	80,0
Rel. Aufwand Systemadministration		%	0,0	0,0	0,0	13,0	8,3	80,0
Rel. Nutzen der Automatisierung		%	0,0	0,0	30,0	61,9	60,0	75,0
<b>Personalaufwand</b>								
Personalkosten für einen Administrator relativ zu einem Anwender								
Aufwand Erstinvestition					20 Adm./Jahre	1,2	24,0	Anw./a
Aufwand QS automatisch					2 Admin/a	1,2	2,4	Anw/a
Aufwand QS manuell					4 Anw/a	1,0	4,0	Anw/a
Aufwand Konstruktionsmethodik2					1 Admin/a	1,2	1,2	Anw/a
Aufwand Fertigungstechnologie/-methodik					1 Admin/a	1,2	1,2	Anw/a
Aufwand Systemadministration					5 Admin/a	1,2	6,0	Anw/a
Nutzen der Automatisierung					20 Anw/a	-1,0	-20,0	Anw/a
<b>Produkt aus Nutzen/Aufwand und Personalaufwand</b>								
Aufwand Erstinvestition		Anw/a	0,0	0,0	0,0	3,1	2,0	19,2
Aufwand QS automatisch		Anw/a	0,0	0,0	0,8	1,6	1,5	1,9
Aufwand QS manuell		Anw/a	4,0	4,0	2,7	1,4	1,4	0,8
Aufwand Konstruktionsmethodik		Anw/a	0,1	0,1	0,1	0,4	0,3	1,0
Aufwand Fertigungstechnologie/-methodik		Anw/a	0,1	0,1	0,1	0,4	0,3	1,0
Aufwand Systemadministration		Anw/a	0,0	0,0	0,0	0,8	0,5	4,8
Nutzen der Automatisierung		Anw/a	0,0	-4,0	-10,0	-16,4	-16,0	-19,0
Summe einmalige Aufwände		Anw/a	0,0	0,0	0,0	3,1	2,0	19,2
Summe laufende Aufwände und Nutzen		Anw/a	4,1	0,1	-6,4	-11,9	-11,9	-9,6
<b>Rel. Wirtschaftlichkeit laufender Aufwände und Nutzen</b>		%	-35	-1	53	100,25	100	80
<b>Rel. Vergleich der Automatisierungsgrade</b>		%	0	25	65	100,18	100	85
<b>Amortisationszeit der Erstinvestition</b>		a	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2	2,0

Wirtschaftlichkeitsbewertung einer automatisierten NC-Programmierung von komplexen Bohrprozessen integriert in eine geschlossene CAD/CAM-Prozesskette für Kleinserien- und Unikatfertiger. Betrachtung um 20 % erhöhter Kosten.

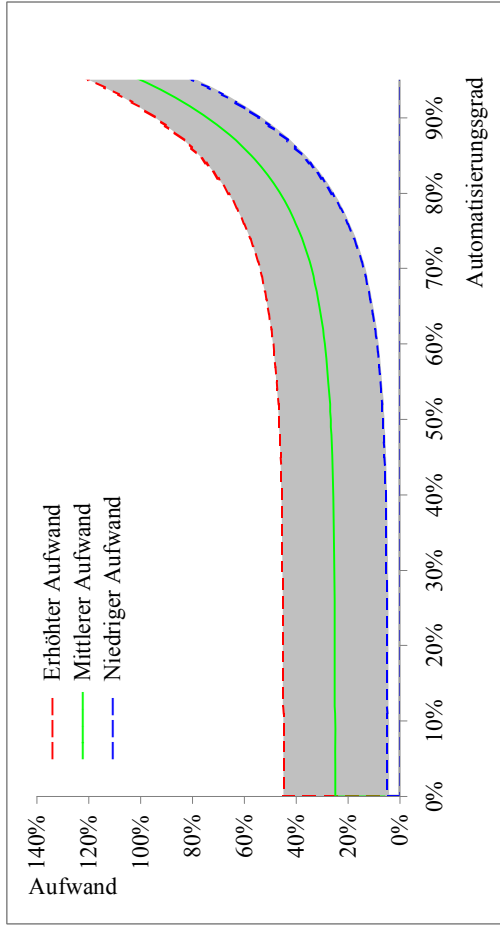
<b>Annahmen zu rel. Nutzen und Aufwand</b>	<b>Einheit</b>	<b>manuell</b>	<b>diskret</b>	<b>50 / 50</b>	<b>MAX</b>	<b>80 / 20</b>	<b>quasi</b>
Anteil Automatisierung	%	0,0	20,0	50,0	76,79	80,0	95,0
Anteil Manuell	%	100,0	80,0	50,0	23,2	20,0	5,0
Rel. Aufwand Erstinvestition	%	20,0	20,2	22,3	41,6	48,3	120,0
Rel. Aufwand QS automatisch	%	20,0	41,1	72,6	100,8	104,2	120,0
Rel. Aufwand QS manuell	%	120,0	100,0	70,0	43,2	40,0	25,0
Rel. Aufwand Konstruktionsmethodik	%	45,0	45,1	46,7	61,2	66,2	120,0
Rel. Aufwand Fertigungstechnologie/-methodik	%	45,0	45,1	46,7	61,2	66,2	120,0
Rel. Aufwand Systemadministration	%	20,0	20,2	22,3	41,6	48,3	120,0
Rel. Nutzen der Automatisierung	%	20,0	40,0	70,0	96,8	100,0	115,0
<b>Personalaufwand</b>							
Personalkosten für einen Administrator relativ zu einem Anwender							
Aufwand Erstinvestition				20 Adm.jahre	1,8	36,0	Anw/jahre
Aufwand QS automatisch				2 Admin/a	1,8	3,6	Anw/a
Aufwand QS manuell				4 Anw/a	1,0	4,8	Anw/a
Aufwand Konstruktionsmethodik2				1 Admin/a	1,8	1,8	Anw/a
Aufwand Fertigungstechnologie/-methodik				1 Admin/a	1,8	1,8	Anw/a
Aufwand Systemadministration				5 Admin/a	1,8	9,0	Anw/a
Nutzen der Automatisierung				20 Anw/a	-1,0	-20,0	Anw/a
<b>Produkt aus Nutzen/Aufwand und Personalaufwand</b>							
Aufwand Erstinvestition	Anw/a	7,2	7,3	8,0	15,0	17,4	43,2
Aufwand QS automatisch	Anw/a	0,7	1,5	2,6	3,6	3,8	4,3
Aufwand QS manuell	Anw/a	3,8	2,8	1,3	0,0	-0,2	-1,0
Aufwand Konstruktionsmethodik	Anw/a	0,8	0,8	0,8	1,1	1,2	2,2
Aufwand Fertigungstechnologie/-methodik	Anw/a	0,8	0,8	0,8	1,1	1,2	2,2
Aufwand Systemadministration	Anw/a	1,8	1,8	2,0	3,7	4,3	10,8
Nutzen der Automatisierung	Anw/a	0,0	-4,0	-10,0	-15,4	-16,0	-19,0
Summe einmalige Aufwände	Anw/a	7,2	7,3	8,0	15,0	17,4	43,2
Summe laufende Aufwände und Nutzen	Anw/a	8,0	3,7	-2,4	-5,8	-5,7	-0,5
<b>Rel. Wirtschaftlichkeit laufender Aufwände und Nutzen</b>	%	<b>-140</b>	<b>-65</b>	<b>42</b>	<b>101,77</b>	<b>100</b>	<b>9</b>
<b>Rel. Vergleich der Automatisierungsgrade</b>	%	<b>0</b>	<b>31</b>	<b>76</b>	<b>100,74</b>	<b>100</b>	<b>62</b>
<b>Amortisationszeit der Erstinvestition</b>	a	<b>-0,9</b>	<b>-1,9</b>	<b>3,4</b>	<b>2,6</b>	<b>3,0</b>	<b>83,1</b>

**Sensitivitätsanalyse zur Berechnung der relativen Wirtschaftlichkeit**

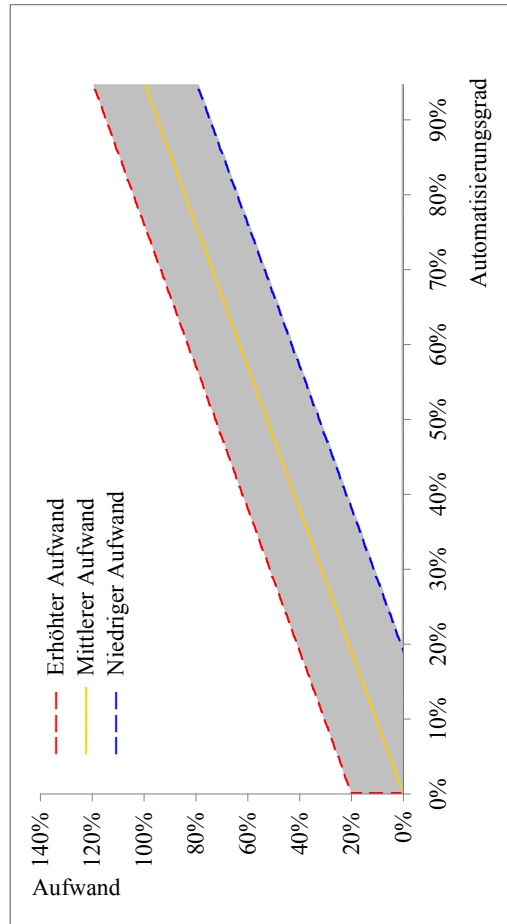
Relativer Aufwand Erstinvestition und Systemadministration



Relativer Aufwand Konstruktions- und Fertigungsmethodik



Relativer Aufwand für die automatische Qualitätssicherung



Relative Wirtschaftlichkeit laufender Aufwände und Nutzen (normiert)

