

Lehrstuhl für
Montagesystemtechnik und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung

Andreas Sprengel

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ. Prof. Dr. rer. nat. H. Bubb

Prüfer der Dissertation:

1. Univ. Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ. Prof. Dr.-Ing. H. Hoffmann

Die Dissertation wurde am 29.11.1999 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 21.03.2000 angenommen.

Forschungsberichte

iwb

Band 141

Andreas Sprengel

***Integrierte Kostenkalkulations-
verfahren für die Werkzeug-
maschinenentwicklung***

***herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart***

Herbert Utz Verlag



Forschungsberichte iwb

Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
Technische Universität München
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme
Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2000

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2000

ISBN 3-89675-757-1

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089/277791-00 · Fax: 089/277791-01

Geleitwort des Herausgebers

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

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

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

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

Gunther Reinhart

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, dem Leiter dieses Instituts, möchte ich mich für das dieser Arbeit entgegengebrachte Interesse und die großzügige Unterstützung bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann, dem Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München, danke ich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich.

München, im Mai 2000

Andreas Sprengel

1 Einleitung	1
1.1 Problembeschreibung	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2 Situationsanalyse	6
2.1 Besondere Situation des Werkzeugmaschinenbaus	6
2.1.1 Unternehmenscharakteristika	6
2.1.2 Konstruktion von Werkzeugmaschinen	9
2.1.2.1 Konstruktionsphasen	9
2.1.2.2 Konstruktionsarten	13
2.1.2.3 Konstruktionshilfsmittel	15
2.1.3 Kostenrechnung im Werkzeugmaschinenbau	17
2.1.3.1 Grundbegriffe	17
2.1.3.2 Kalkulation	19
2.1.3.3 Zeitpunkte der Kalkulation	22
2.2 Ansätze zur konstruktionsbegleitenden Kalkulation	24
2.2.1 Einteilung konstruktionsbegleitender Kalkulationsmethoden	24
2.2.2 Informationssysteme zur konstruktionsbegleitenden Kalkulation	26
2.3 Zusammenfassung der Defizite bisheriger Ansätze	31
3 Anforderungen und Ziele bei der rechnerintegrierten Kostenbewertung	33
3.1 Anforderungen	33
3.2 Zielsetzung für ein neues System	36
4 Das Konzept der rechnerintegrierten Konstruktion als Basis für eine Kostenbewertung	39
4.1 Ansatz	39
4.2 Informationsarten / Datentypen	45

4.3 Wiederholteilsuche	48
4.4 Zusammenfassung	52
5 Konstruktionsbegleitende Kostenabschätzung von Werkzeugmaschinen.....	54
5.1 Prinzipielles Vorgehen	54
5.2 Eingesetzte Verfahren zur Kalkulation und Kalkulationsunterstützung.....	55
5.2.1 ABC-Analyse	55
5.2.2 Regressionsrechnung.....	57
5.2.2.1 Prinzip der Regression	57
5.2.2.2 Vorgehen bei der Regression	59
5.2.3 Bearbeitungssimulation.....	60
5.3 Integration zu einem Gesamtkonzept.....	65
5.3.1 Grundprinzipien	65
5.3.2 Kalkulationsvorbereitende ABC-Analyse.....	68
5.3.3 Entwicklung der Kalkulationsmethoden für die jeweiligen Entwicklungsphasen und Kalkulationsstufen	69
6 Systembeschreibung und softwaretechnische Umsetzung	74
6.1 Systemstruktur	74
6.1.1 Kalkulationsablauf und Datenfluß	74
6.1.2 Datenmodell - Voraussetzung im PDM-System	77
6.2 Realisierungskonzept	80
6.2.1 Integration von PDM, CAD und Kalkulationssoftware.....	80
6.2.2 Kalkulationssoftware.....	83
7 Exemplarische Anwendung	85
7.1 Beispielszenario	85
7.2 Herstellkosten von Kaufteilen	86
7.3 Herstellkosten von Eigenfertigungsteilen.....	88
7.4 Materialkosten von Eigenfertigungsteilen	90

7.5 Fertigungskosten von Eigenfertigungsteilen.....	95
7.5.1 Abschätzung über Regressionsformeln.....	95
7.5.2 Abschätzung über NC-Simulation.....	99
7.5.3 Abschätzung über analytisch hergeleitete Formeln.....	104
7.6 Diskussion des vorgeschlagenen Kalkulationskonzepts.....	108
8 Zusammenfassung und Ausblick	110
9 Literaturverzeichnis	115
10 Anhang	123
10.1 Abkürzungen	124
10.2 Formelkurzzeichen.....	125
10.3 Regressionsrechnung	128
10.3.1 Lineare Regression.....	128
10.3.2 Nichtlineare Regression	133

1 Einleitung

1.1 Problembeschreibung

Zunehmender Preiswettbewerb und kurze Innovationszyklen zwingen die Unternehmen des Werkzeugmaschinenbaus in stets kürzer werdenden Abständen, qualitativ hochwertige und kostengünstige Maschinen zu entwickeln. Während die Produktion in dieser Branche bis 1990 stetig stieg, erlebte sie danach einen starken Einbruch, der 1994 seinen Tiefpunkt fand. Damit verbunden war ein dramatischer Arbeitsplatzabbau von 103.000 Arbeitsplätzen im Jahr 1990 auf derzeit ca. 64.000 [VDMA 1997]. Zwar ist die wohl bisher größte Krise im deutschen Werkzeugmaschinenbau überwunden und die Umsätze sind seitdem wieder ständig gestiegen, doch erzielt die Mehrzahl der Unternehmen nur geringe Gewinne. Die schwierige Situation gerade im Bereich spanender Werkzeugmaschinen zeigt in Abbildung 1.1 auch der Verlauf des Preisindex verglichen mit dem des allgemeinen Maschinenbaus [VDMA 1997]. Die Preisentwicklung bei den spanenden Metallbearbeitungsmaschinen zeigt einen deutlich flacheren Anstieg als diejenige des allgemeinen Maschinenbaus und weist damit auf die besonders geringen Möglichkeiten der eigenen Preisgestaltung hin. Ursachen hierfür sind die verstärkt in Deutschland agierende Konkurrenz aus dem Osten sowie der starke Preisdruck den Kunden der Werkzeugmaschinenbranche, wie z.B. die Automobilindustrie, ausüben.

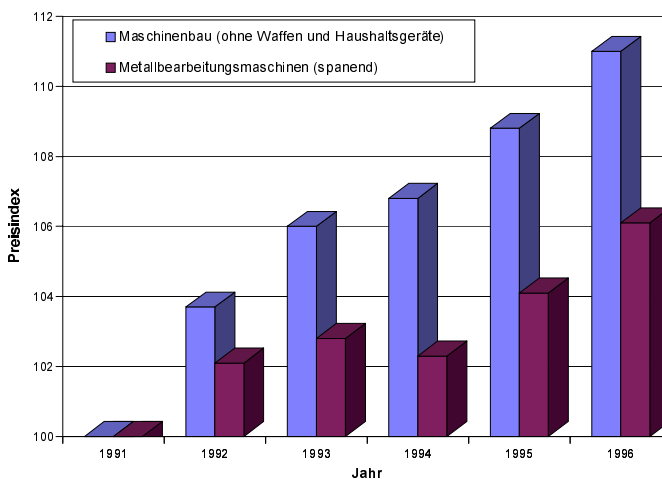


Abb. 1.1: Entwicklung des Preisindex im Maschinenbau allgemein und bei spanenden Metallbearbeitungsmaschinen

1 Einleitung

Die in der Rezession vorgenommenen Kostensenkungen sind vorwiegend auf drastische Personalreduzierungen zurückzuführen. Für weitergehende Ansätze bieten sich aufgrund der wirtschaftlichen Randbedingungen in Deutschland weniger die Optimierung der Produktion an, als die Verstärkung der Bemühungen technologisch führende Werkzeugmaschinen zu entwickeln. Maßnahmen zur Verbesserung der Wettbewerbsposition müssen daher ihren Fokus auf effizienzsteigernde Veränderungen in der Entwicklung legen.

Die frühzeitige Kenntnis und Beeinflussung der Kosten eines in der Entwicklung befindlichen Produktes wird vor diesem Hintergrund zum entscheidenden Wettbewerbsfaktor. Die Leistungsfähigkeit des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses beeinflusst die wettbewerbsfähige Herstellung technischer Produkte in erheblichem Maß. Angesichts eines Anteils der Konstruktion von etwa 50% an der Gesamtdurchlaufzeit der Produkte erscheint die Bereitstellung von Hilfsmitteln zur wirksamen Reduzierung der Entwicklungszeit dringend geboten. [EHRENSPIEL & WOLFRAM 1994]

Weiterhin werden in der Konstruktion nicht nur der überwiegende Anteil an technischen Produkteigenschaften festgelegt, sondern auch der größte Anteil an den Kosten. So verantwortet die Konstruktion 60-80% der Herstellkosten, während in dieser Phase nur ein Bruchteil von ca. 5-10% verursacht wird (vgl. Abb. 1.2) [VDI 2235; EVERSHEIM 1990]. Den Herstellkosten kommt somit eine besonders starke Bedeutung bei der Entwicklung von Werkzeugmaschinen zu und die Phase der Konstruktion/Entwicklung birgt daher ein beachtliches Potential zur Reduzierung der Produktkosten und der Durchlaufzeit.

Abbildung 1.2 zeigt auch, daß jede technologische Festlegung des Konstrukteurs gleichzeitig in einer Festlegung der Kosten ihren Niederschlag findet. Problematisch ist dabei die Tatsache, daß sich der Konstrukteur in der Regel einer äußerst unzureichenden Kostentransparenz gegenüber sieht [MILBERG & ROMANOW 1993]. Es besteht daher ein hoher Bedarf, dem Entwickler detailliert Kosteninformationen schon möglichst früh im Entwicklungsprozeß zur Verfügung zu stellen. Werden die Zielkosten während der Konstruktion außer acht gelassen und Überschreitungen des zulässigen Kostenrahmens erst in einer sich an die Arbeitsvorbereitung anschließenden Kalkulation aufgedeckt, kann dies zu zeitintensiven Korrekturläufen führen [BECKER 1990]. So kann die Überarbeitung nur einer Baugruppe des Gesamtsystems bei komplexen Produkten, wie den hier betrachteten Werkzeugmaschinen, mit ihren vielfältigen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zu Nachbarbaugruppen kostspielige Änderungen nach sich ziehen [BOCK U.A. 1990; SCHNEIDER U.A. 1997].

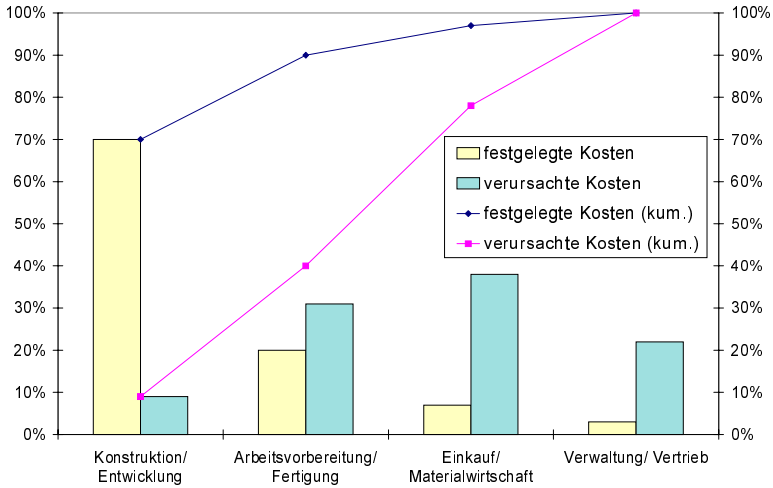


Abb. 1.2: Kostenfestlegung und -verursachung

Dies zeigt auch die als „Rule-of-Ten“ bekannte Kurve in Abbildung 1.3. Sie besagt, daß sich mit jedem wichtigen Prozessschritt die Kosten einer Fehlerbehebung verzehnfachen [VDI 2247].

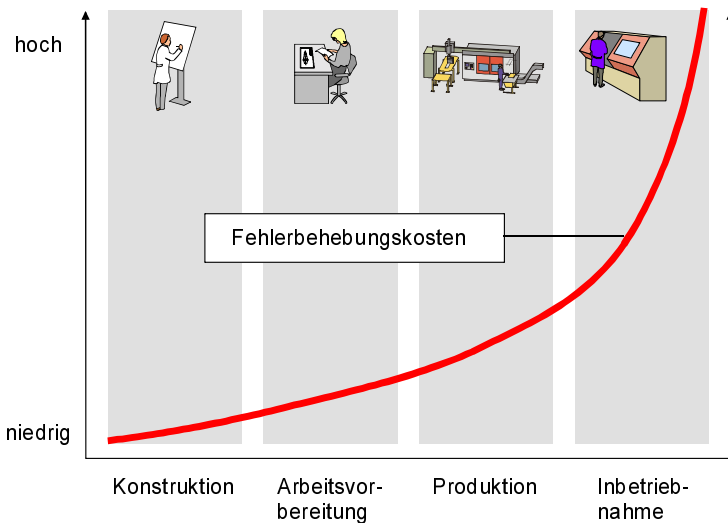


Abb. 1.3: „Rule-of-Ten“

1 Einleitung

Obwohl dieser Zusammenhang schon lange bekannt ist und die Forderung nach einer frühzeitigen und konstruktionsbegleitenden Kalkulation vielfach erhoben worden sind [EHRENSPIEL 1985; FERREIRINHA 1985; BOOTHROYD 1988], scheitert die effiziente Anwendung von Kalkulationsmethoden in der Praxis noch häufig. Wichtige Hemmnisse sind dabei:

- zu geringe Aus- und Weiterbildung der Konstrukteure im Hinblick auf kostengünstiges Konstruieren [EHRENSPIEL 1988],
- ungenügende Verfügbarkeit und Aufbereitung kalkulationsrelevanter Daten,
- mangelnde organisatorische und systemtechnische Schnittstellen zwischen Konstruktion und Kalkulation,
- zu hoher Aufwand für die Kalkulation komplexer Produkte im frühen Konstruktionsstadium.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die grundlegende Bedeutung einer konstruktionsbegleitenden Kostenprognose zur Optimierung der Gesamtkosten eines Maschinenentwurfs muß in der Konstruktionspraxis ihren Ausdruck finden. Ziel dieser Arbeit ist es daher, ein Kostenabschätzungsprogramm für die frühen Phasen der Werkzeugmaschinenentwicklung, der Konzept- und Entwurfsphase, bereitzustellen, das zudem in der Lage ist, über ein neutrales Informationsmanagementsystem Daten mit anderen Konstruktionswerkzeugen (wie z.B. dem 3D-CAD) auszutauschen.

Um die Akzeptanz eines solchen Systems zu gewährleisten, werden in Kapitel 2 zunächst die besondere Situation in der Werkzeugmaschinenbranche untersucht. Eingegangen wird dabei auf die Unternehmenscharakteristika, den Prozeß des Konstruierens und der Kalkulation. Es schließt sich eine Analyse und kritische Diskussion bereits vorhandener vornehmlich universitärer Ansätze zur konstruktionsbegleitenden Kalkulation an.

Aus den Ergebnissen dieser Analyse werden in Kapitel 3 die Anforderungen an eine rechnerintegrierte Konstruktion und Kostenbewertung abgeleitet und die Zielsetzung dieser Arbeit konkreter formuliert.

In Kapitel 4 soll zunächst ein allgemeines Konzept zur rechnerintegrierten Konstruktion und Bewertung aufgezeigt werden. Ein Hauptaspekt dabei ist die Auf-

hebung der Trennungen bzw. Informationsbarrieren zwischen verschiedenen Entwicklungsbereichen, ihren rechnergestützten Konstruktionswerkzeugen (CAE/CAx-Systeme¹ und EDM/PDM²) und Software-Tools zur wirtschaftlichen Bewertung.

Der Konstrukteur soll nicht nur die technische, sondern auch die erste wirtschaftliche Bewertung von Werkzeugmaschinen mit Unterstützung integrierter Softwarewerkzeuge selbst durchführen können. In Kapitel 5 wird deshalb ein Lösungsansatz für eine konstruktionsbegleitende Kostenkalkulation im Werkzeugmaschinenbau vorgestellt.

Kapitel 6 beschreibt ausführlich die Systemstruktur sowie die Hard- und Softwarearchitektur zur Realisierung des vorgeschlagenen Kalkulationssystems.

Vor dem Hintergrund der Entwicklung eines Horizontalbearbeitungszentrums sollen in Kapitel 7 die vorgestellten Methoden zur Entwicklung von Kalkulationsverfahren und -formeln beispielhaft für die verschiedenen Konstruktionsphasen näher erläutert werden. Durch eine Gegenüberstellung von Ist-Kosten und geschätzten Kosten wird die Güte der zum Einsatz kommenden Methoden aufgezeigt.

Die Arbeit schließt mit einem Ausblick und einer Zusammenfassung (Kapitel 8).

¹ CAx/CAE (Computer Aided Engineering): Rechnerbasierte Systeme, die in Entwicklung und Produktion Ingenieurstätigkeiten unterstützen.

² EDM/PDM (Engineering/Product Data Management): Systeme zur Verwaltung aller Daten und Prozesse, die während des gesamten Produktlebenszyklus entstehen [ABRAMOVICI & BICKELMANN 1993]. Die Bezeichnungen für Programme dieser Art sind in der Literatur noch nicht einheitlich, so daß in dieser Arbeit EDM und PDM synonym verwendet werden (vgl. auch Abschnitt 4.1).

2 Situationsanalyse

2.1 Besondere Situation des Werkzeugmaschinenbaus

2.1.1 Unternehmenscharakteristika

Die vorliegende Arbeit zielt speziell auf die Belange der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie, die typischerweise der Gruppe kleinerer und mittlerer Unternehmen (KMU bzw. SME³) zuzurechnen ist [JORISSEN 1996]. Deshalb soll zunächst eine Wesensbestimmung der KMU vorgenommen werden. Für die branchenspezifische Abstimmung und Bereitstellung eines konstruktionsbegleitenden Kosteninformationssystems ist die genaue Betrachtung der firmenseitigen Begebenheiten unerlässlich, um später aus diesen Randbedingungen die Anforderungen an ein solches System ableiten zu können [STEINER U.A. 1993].

Innerhalb der umfangreichen mittelstandsorientierten Literatur gibt es trotz der wachsenden Anzahl von Begriffsdefinitionen keine eindeutige und allgemein anerkannte Definition des Begriffes Mittelstand [PFOHL 97]. Die Begriffe "Mittelständische Unternehmen", "Kleine und mittlere Unternehmen", "Klein- und Mittelunternehmen" werden synonym benutzt, wobei die Begriffe "Unternehmung", "Unternehmen" als sinngleich anzusehen sind [BMW 1993]. Um dennoch eine Wesensbestimmung kleiner und mittlerer Unternehmen vornehmen zu können, wird im folgenden eine Abgrenzung mittelständischer Unternehmen von großen Unternehmen anhand quantitativer und qualitativer Unterscheidungsmerkmale vorgenommen.

Aus quantitativer Sicht ist unter dem Begriff "Mittelständisches Unternehmen" ein Unternehmen zu verstehen, welches über alle Branchen hinweg eine bestimmte Größe nicht überschreitet. Die am häufigsten vorzufindende quantitative Bemessungsgröße für Unternehmen ist die Beschäftigtenzahl. Darüber hinaus wird zur Bemessung der Unternehmensgröße in Literatur und Statistik vor allem der Umsatz verwandt. Quantitative Bemessungsgrößen lassen jedoch nur eine ungefähre Klassifizierung zu, wobei regional unterschiedliche Gegebenheiten unberücksichtigt bleiben. Tabelle 2.1 stellt drei häufig vorgenommene Abgrenzungen der KMU von Großunternehmen in der Industrie vor. Die starken Abweichungen zeigen deutlich, daß keine allgemeingültigen Kriterien zur quantitativen Klassifizierung zur Verfügung stehen.

³ SME = Small and Medium Enterprise

2.1 Besondere Situation des Werkzeugmaschinenbaus

PFOHL (1997)	Bundesministerium für Wirtschaft	Bundesministerium für Bildung und Forschung
--------------	-------------------------------------	---

Größenklasseneinteilung nach Beschäftigten			
klein/mittel	bis 499	bis 500	bis 1000
groß	über 499	über 500	über 1000

Größenklasseneinteilung nach Umsatz in [DM]			
klein/mittel	bis 25 Mio. DM	bis 100 Mio. DM	bis 200 Mio. DM
groß	über 25 Mio. DM	über 100 Mio. DM	über 200 Mio. DM

Tabelle 2.1: Quantitative Abgrenzung der KMU von Großunternehmen [PFOHL 97; BMWI 1993]

Deshalb scheint es im Hinblick auf die zielgruppenspezifische Bereitstellung von Kosteninformationen im Konstruktionsbereich von Vorteil, auch qualitative Unterscheidungskriterien zu untersuchen, da aus diesen Größen die Eigenarten der verschiedenen Unternehmenstypen schärfer zum Ausdruck kommen.

Die Tabelle 2.2 bietet eine Übersicht zur betriebswirtschaftlichen Unterscheidung zwischen mittelständischen und großen Unternehmen anhand qualitativer Merkmale, indem für die Bereiche Unternehmensführung, Organisation, Finanzierung, Personal sowie Forschung und Entwicklung die Art der Aufgabenerfüllung in beiden Unternehmensgrößenklassen inhaltlich charakterisiert und typologisierend gegenübergestellt wird.

In Ergänzung zu dieser Tabelle können spezifisch für mittelständische Unternehmen die folgenden Merkmale herausgehoben werden:

- Beschränktes Planungspotential, da kaum Planungsspezialisten eingesetzt werden. Dies bedeutet, betriebliche Abläufe sind nicht bewußt gestaltet, sondern historisch gewachsen. Persönliche, unregelmäßige Kontakte übernehmen Funktion des Betriebsablaufs. Das Funktionieren dieser „inoffiziellen Organisation“ ist daher sehr stark von Personen und deren Kooperation miteinander abhängig [DEUTSCHLE 1995].
- Starkes Spartendenken mit häufig einhergehender zu geringer Berücksichtigung der Gesamtzusammenhänge. Vielfach werden Mitarbeiter nicht systematisch in Probleme der Aufgabenbewältigung miteinbezogen, d.h. Wechselwirkungen der durch Arbeitsteilung künstlich zergliederten Teilaufgaben werden auch nicht erkannt und kontinuierliche Verbesserungen unterbleiben [HAMEL 1997].

2 Situationsanalyse

Unternehmensführung	
Mittelständisches Unternehmen	Großes Unternehmen
Eigentümerunternehmer	Manager
technisch orientierte Ausbildung	gutes technisches Wissen in Fachabteilungen und Stäben verfügbar
unzureichendes Informationswesen zur Nutzung vorhandener Flexibilitätsvorteile	ausgebautes formalisiertes Informationswesen
große Bedeutung von Improvisation und Intuition	geringe Bedeutung von Improvisation und Intuition
kaum Planung	umfangreiche Planung
Organisation	
Mittelständisches Unternehmen	Großes Unternehmen
Funktionshäufung	Arbeitsteilung
kurze direkte Informationswege	vorgeschriebene Informationswege
starke persönliche Bindungen	geringe persönliche Bindungen
Finanzierung	
Mittelständisches Unternehmen	Großes Unternehmen
kein Zugang zum anonymen Kapitalmarkt, dadurch nur begrenzte Finanzierungsmöglichkeiten	ungehinderter Zugang zum anonymen Kapitalmarkt, dadurch vielfältige Finanzierungsmöglichkeiten
Personal	
Mittelständisches Unternehmen	Großes Unternehmen
häufig unbedeutender Anteil von ungelerten und angelernten Arbeitskräften	häufig großer Anteil von ungelerten und angelernten Arbeitskräften
kaum Akademiker beschäftigt	Akademiker in größerem Umfang beschäftigt
überwiegend breites Fachwissen	starke Tendenz zum ausgeprägten Spezialistentum
Forschung und Entwicklung	
Mittelständisches Unternehmen	Großes Unternehmen
kurzfristig-intuitiv ausgerichtete Forschung und Entwicklung	langfristig- systematisch angelegte Forschung und Entwicklung

Tabelle 2.2: *Qualitativer Vergleich von KMU und Großunternehmen (Auszug aus Tabelle nach [PFOHL 1997])*

- Mangelhaftes Innovationsmanagement. Innovationstätigkeiten werden nicht kontinuierlich durchgeführt. Dies bedeutet, Erfahrungen über die Durchführung werden nicht sukzessive angesammelt und das Wissen darüber bleibt bruchstückhaft

[GESCHKA 97]. Darüber hinaus ist das angesammelte Know-how ungeordnet und personengebunden und wird in der Regel nicht dokumentiert und anderen Mitarbeitern zur Verfügung gestellt [ABELN 1990]. Ein wirkungsvolles Informationsmanagement hat jedoch zum Ziel, alle Stellen mit Informationen zu versorgen, die zur Erreichung der Unternehmensziele erforderlich sind [ERNST 1994].

- Geringer Rechneinsatz im technischen Bereich. Die Auftragsabwicklung in der Konstruktion ist geprägt von mangelnder Abstimmung durch zu geringen EDV-Einsatz [DEUTSCHLE 1995]. Insbesondere die über die reine Modellierung hinausgehende Verwendung von CAD-Systemen ist wenig verbreitet. Schnittstellen, z.B. zu kaufmännischer Software, sind selten eingerichtet. Die niedrige Informationsqualität bringt einen hohen Abstimmungsbedarf mit sich und Hemmnisse, z.B. bei einer Kostenfrüherkennung, werden nur z.T. durch hohe Qualifikation, Motivation und langjährige Erfahrung aufgewogen.
- Begrenzte Finanzierungsmöglichkeiten. Hard- und Softwarekosten, z.B. Aufbau und Wartung von neuen Rechnersystemen, sowie die für Schulungen anfallenden Kosten übersteigen oft den Rahmen vom KMUs. Darüber hinaus bestehen oft Zweifel am Nutzen neuer EDV-Lösungen, da den Investitionskosten meist nur schwer monetär bewertbare Vorteile gegenüberstehen.

Der Versuch der Wesensbestimmung kleiner und mittlerer Unternehmen zeigt sowohl bei der quantitativen, als auch bei der qualitativen Abgrenzung von Merkmalen mittelständischer zu großen Unternehmen, daß eine allgemeingültige Unterscheidung nur schwer möglich ist. Auch wird nicht jedes mittelständische Unternehmen alle die in den Tabellen 2.1 und 2.2 aufgeführten Kriterien erfüllen. Eine Grundtendenz mittelständischer Probleme ist jedoch zu erkennen und es läßt sich somit eine grobe Charakterisierung vornehmen, die die Hintergründe der aktuellen Situation deutscher Werkzeugmaschinenhersteller transparent macht. Neue Methodiken und Systeme müssen daher diesen Umständen Rechnung tragen.

2.1.2 Konstruktion von Werkzeugmaschinen

2.1.2.1 Konstruktionsphasen

Die Konstruktion nimmt eine zentrale Stellung innerhalb der Produktentwicklung ein, denn hier werden der Großteil der Produkteigenschaften und -kosten festgelegt. Die

2 Situationsanalyse

VDI-RICHTLINIE 2221 (1993) definiert Konstruieren als „... *Gesamtheit aller Tätigkeiten, mit denen ausgehend von einer Aufgabenstellung die zur Herstellung und Nutzung eines Produkts notwendigen Informationen erarbeitet werden und in der Festlegung der Produktdokumentation enden*“. KOLLER (1994) sieht in seiner Definition nicht nur Synthesetätigkeiten als Konstruktionsaufgaben, sondern „... *alle jene Synthese-, Analyse-, Bewertungs- und Selektionstätigkeiten, die notwendig sind, um für eine bestimmte technische Aufgabe eine zu einem bestimmten Zeitpunkt bestmögliche Lösung anzugeben*“.

Unabhängig von bestimmten Industriezweigen und Erzeugnissen werden bei der Entwicklung und Konstruktion technischer Produkte verschiedene Konstruktionsphasen durchlaufen. In der Literatur finden sich unterschiedliche Einteilungen und Bezeichnungen für die einzelnen Konstruktionsabschnitte [ROTH 1982; RODENACKER 1984; KOLLER 1994; PAHL & BEITZ 1993]. Allen verschiedenen Konstruktionsschulen ist jedoch der „Top-Down“-Ansatz gemein. Es werden dabei folgende Grundprinzipien angewandt:

- vom Allgemeinen zum Speziellen
- vom Abstrakten zum Konkreten
- vom Qualitativen zum Quantitativen

In dieser Arbeit wird die Einteilung der Konstruktionsphasen nach PAHL & BEITZ (1993) verwendet, die auch in die VDI-RICHTLINIE 2222, BLATT 1 (1997) Eingang gefunden hat. Ausgehend von einer Produktidee wird in der Planungsphase die Aufgabenstellung geklärt. In den anschließenden Phasen des Konzipierens, Entwerfens und Ausarbeitens wird die Produktspezifikation so weit verfeinert, daß am Ende des Konstruktionsprozesses ein konkretes, den technischen Anforderungen entsprechendes Produkt entsteht. Bei der Entwicklung komplexer Produkte lassen sich zeitlich aufeinander folgende Phasen allerdings nur unscharf gegeneinander abgrenzen, da beispielsweise Entwurf und Ausarbeitung verschiedener Bauteile bzw. Baugruppen zu unterschiedlichen Zeitpunkten gestartet werden und parallel verlaufen können. Die Parallelisierung und Koordination der Konstruktionsschritte bei immer komplexer werden Produkten stellt somit auch einen Ansatzpunkt für die moderne Produktentwicklung dar [LINDEMANN 1997]. Hauptthemen sind dabei die Entwicklung von Modellen für effektive Konstruktionsprozesse sowie die Integration der Produktentwicklung in den gesamten Produkterstellungsprozeß (z.B. mit Simultaneous Engineering) [EHRENSPIEL 1995; AMBROSY 1997; GIAPOULIS 1998].

Planen und Klären der Aufgabenstellung

Vor dem Konstruktionsprozeß muß eine Bedarf vorliegen, der es lohnend erscheinen läßt, im Konstruktionsbereich nach technisch und wirtschaftlich günstigen Lösungen zu suchen und diese über den gesamten Konstruktionsprozeß bis zur Fertigungsreife auszuarbeiten. Die Produktplanung beinhaltet daher die systematische Suche und Auswahl zukunftssträchtiger Produktideen nach Trendstudien und Marktanalysen. Bereits hier halten methodische Ansätze Einzug, um Zeit und Kosten einer Produktplanung und -entwicklung besser überschauen zu können.

Eine systematische Produktplanung beinhaltet folgende Vorgehensweise [PAHL & BEITZ 1993]:

- Analysieren der Situation,
- Aufstellen von Suchstrategien,
- Finden von Produktideen,
- Auswählen von Produktideen,
- Definieren von Produkten,
- Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung.

Das wichtigste Ergebnis dieser Entwicklungsphase ist die Anforderungsliste, die die Ziele und Randbedingungen für das neue Produkt, insbesondere auch die infolge der Marktanalyse ermittelten zulässigen Kosten und Termine enthalten muß. Bei der späteren Produktevaluierung ist sie die Grundlage für die Überprüfung auf Zielerfüllung. Als Hilfsmittel beim Ermitteln der Anforderungen dienen einfache Checklisten bis hin zum umfassenden Anforderungsmanagementsystem „QFD“ (Quality Function Deployment) [AKAO 1992; DANNER 1996].

Konzipieren

Um bei der Lösungssuche Vorfixierungen zu vermeiden, empfiehlt sich ein Abstrahieren der Aufgabe. Das Ergebnis dieser Maßnahme ist die abstrakte, lösungsneutrale Formulierung des Gesamtproblems. Es folgen das Aufgliedern der sich dabei ergebenden Gesamtfunktion in Teilfunktionen und das Suchen nach Lösungsprinzipien für die entsprechenden Teilfunktionen, wobei der Einsatz von Konstruktionskatalogen hilfreich ist [ROTH 1982]. Die für die Teilfunktionen gefundenen Lösungsprinzipien sind durch Berechnungen oder Versuche zu stützen. Anhand dieser Ergebnisse ist eine nach

technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten orientierte Vorauswahl zu treffen. Die günstigsten Lösungsprinzipien sind zu Prinzipkombinationen für die Gesamtfunktion und unter Beachtung der Gesamtanordnung zu Konzeptvarianten zusammenzufassen. Hier werden bereits grobmaßstäbliche Skizzen oder Schemata angefertigt. Nach technisch-wirtschaftlicher Bewertung der Konzeptvarianten wird das Lösungsprinzip gewählt und während des Entwerfens weiter detailliert [PAHL & BEITZ 1993; VDI 2222, BLATT 1].

Entwerfen

Das Entwerfen vollständiger technischer Erzeugnisse beginnt, basierend auf dem Lösungskonzept, mit einem ersten maßstäblichen Entwurf. Bei diesem Stand der Realisierung kann nun entschieden werden, welche technischen Eigenschaften außer den Mindestforderungen und Wünschen der Bewertung zugrunde zu legen sind. Nach Korrektur der technischen und wirtschaftlichen Schwachstellen, ist zu entscheiden, ob der so zustande gekommene verbesserte maßstäbliche Entwurf bereits derart ausgereift ist, daß mit der zeit- und kostenaufwendigen Detaillierung der Ausführungsunterlagen begonnen werden kann [PAHL & BEITZ 1993; HUBKA 1976]. Anderenfalls ist ein weiterer Entwurf aufgrund einer anderen Konzeptvariante oder auch basierend auf einer anderen Prinzipkombination auszuarbeiten.

Detaillierung

Das Ausarbeiten umfaßt das Gestalten und Optimieren der Einzelteile, insbesondere das Erarbeiten der Ausführungsunterlagen in Form von Zeichnung, Stücklisten, Anweisungen und dergleichen. Hierin wird die Baustruktur eines technischen Produktes durch endgültige Vorschriften für Form, Bemessung und Oberflächenbeschaffenheit aller Einzelteile, Festlegen aller Werkstoffe, Prüfung der Herstellungs- und Gebrauchsmöglichkeiten sowie der Kosten ergänzt.

Im Werkzeugmaschinenbau wird meist ein Prototyp gebaut und Funktionstest durchgeführt. In besonderen Fällen werden zusätzliche experimentelle Untersuchungen wie dynamische Strukturanalysen (Modalanalysen) vorgenommen. Sind die Ausführungsunterlagen, insbesondere die Einzelteil- und Gruppenzeichnungen sowie die Stücklisten anhand der Prüfergebnisse nochmals überholt worden und ergibt die Überprüfung der Kosten eine befriedigende Übereinstimmung mit den Zielvorgaben, kann die Fertigungsfreigabe erfolgen.

2.1.2.2 Konstruktionsarten

Abhängig von Umfang und Inhalt der Konstruktionsaufgabe werden im wesentlichen drei Konstruktionsarten unterschieden [PAHL & BEITZ 1993; BREIING & FLEMMING 1993]:

- Neukonstruktion,
- Anpassungskonstruktion,
- Variantenkonstruktion.

Konstruktionsarten	Hauptphasen des Konstruktionsprozesses			
	Konzipieren	Entwerfen		Ausarbeiten
Neukonstruktion	[Progressive Schattierung]			
	Funktionsstruktur	Element	Anordnung	Form Abmessung
Anpassungskonstruktion		[Progressive Schattierung]		
		Element	Anordnung	Form Abmessung
Variantenkonstruktion			[Progressive Schattierung]	
			Anordnung	Form Abmessung

Abb. 2.1: Konstruktionsarten (nach [VDI 2210])

Neukonstruktion

Die Neukonstruktion ist durch eine bisher nicht ausgeführte Anordnung neuer oder bekannter Elemente zu einem neuen Lösungs- bzw. Arbeitsprinzip gekennzeichnet [WIENDAHL 1989]. Neukonstruktionen erfordern in der Regel ein Durchlaufen aller erläuterten Konstruktionsphasen (vgl. Abb. 2.1). Darüber hinaus werden physikalische und verfahrenstechnische Grundlagen sowie eine umfassende technische wie auch wirtschaftliche Aufgabenklärung in den Prozeß miteinbezogen [PAHL & BEITZ 1993].

Anpassungskonstruktion

Die Anpassungskonstruktion ändert einzelne Elemente in der Anordnung, der Gestalt oder bezüglich des Arbeitsprinzips, um Anpassungen einer bewährten Standardkonstruktion an neue Randbedingungen (z.B. Kundensonderwünsche) durchzuführen [WIENDAHL 1989]. Bei dieser Konstruktionsart stehen geometrische, die Festigkeit betreffende, fertigungs- und werkstofftechnische Fragestellungen im Vordergrund [PAHL & BEITZ 1993], wobei nur teilweise die Phase des Konzipierens, meist jedoch eine vollständige Entwurfs- und Ausarbeitungsphase erforderlich ist.

Variantenkonstruktion

Innerhalb der Variantenkonstruktion werden die Gestalt und die Dimensionen der Elemente einer Standardkonstruktion verändert, so daß hierbei ausschließlich die Entwurfs- und Ausarbeitungsphase zu durchlaufen ist [WIENDAHL 1989]. Allerdings erfordern Variantenkonstruktionen zuerst den Konstruktionsaufwand der zugrundeliegenden Neukonstruktion.

Die innerhalb des Werkzeugmaschinenbaus vorherrschende Konstruktionsart ist die Erweiterung der bestehenden Modellpalette oder die Entwicklung von Nachfolgemodellen [MILBERG & ROMANOW 1993]. Im Durchschnitt stellen ca. 85% aller Entwicklungen dieser Branche Varianten- bzw. Anpaßkonstruktionen dar, der restliche Anteil entfällt im wesentlichen auf Neukonstruktionen (vgl. Abbildung 2.2) [ROMANOW 1994]. Eine Befragung von 224 Unternehmen des VDMA im Jahre 1992 ergab einen Anteil der Anpassungs- und Variantenkonstruktion von ca. zwei Dritteln an den gesamten Konstruktionsarten [VDMA 1992]. Die Abweichung dürfte aufgrund unterschiedlicher begrifflicher Auffassungen und der Schwierigkeit, die einzelnen Konstruktionsarten exakt abzugrenzen zustande kommen.

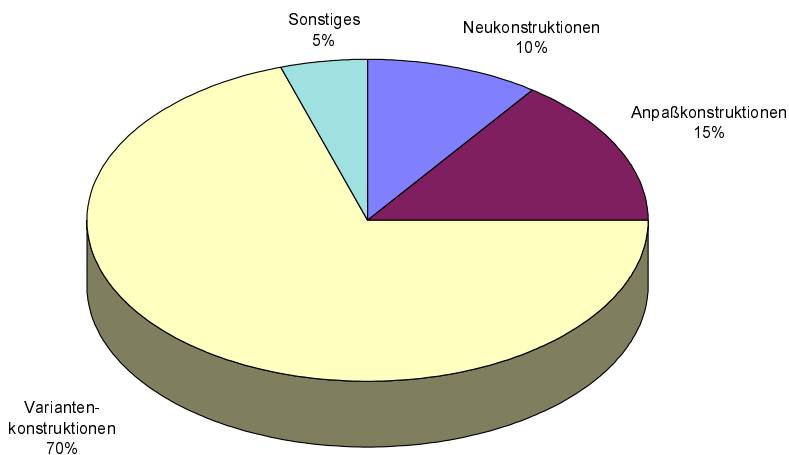


Abb. 2.2: Anteile der Konstruktionsarten im Werkzeugmaschinenbau
[ROMANOW 1995]

2.1.2.3 Konstruktionshilfsmittel

Als Hilfsmittel für Konstrukteure sind in erster Linie CAD-Systeme zu nennen. Sie sind heute das Standardkonstruktionssystem. Allerdings werden immer noch überwiegend 2D-CAD-Systeme als „elektronisches Zeichenbrett“ genutzt [REINHART & SPRENZEL 1995]. Dies zeigt auch eine Umfrage des CADCIRCLE. 57,9% aller Maschinenbauunternehmen verwendeten 1997 als Schwerpunkt in ihrer Konstruktion 2D-CAD-Systeme. 39,4 % setzen daneben mit steigender Tendenz auch 3D-CAD Systeme ein. Allerdings liegt die Zahl der Anwender, die ausschließlich 3D-CAD Systeme einsetzen weit unter 10% [PRODUKTION 1998]. Dies ist ein deutlicher Hinweis darauf, daß die Vorteile der Volumenmodellierung noch nicht umfassend, methodisch genutzt werden. Unter Konstruktion wird immer noch zu sehr das Erarbeiten der Fertigungszeichnungen verstanden. Dabei wird der Konstruktionsprozeß zu wenig in seiner Gesamtheit betrachtet. Der Gedanke an den Aufbau eines zentralen Produktmodells⁴, das die Basis für viele sich anschließende Entwicklungstätigkeiten sein kann, wird viel zu wenig berücksichtigt [KLENK 1997]. Insbesondere integrierte Analysewerkzeuge könnten bei der Evaluierung des Produktentwurfs bereits auf die einmal im 3D-CAD-System erzeugte Information zurückgreifen. Vielfach wird schon generierte Information erneut in einem weiteren System erzeugt. Als Beispiel kann hierbei die Nachmodellierung von Geometrie in FE-Preprozessoren für eine anschließende Finite-Element-Simulation aufgeführt werden. Viele verschiedene, nicht integrierte Softwarewerkzeuge benötigen jedoch entsprechend viele Modelle, die einen hohen Erstellungsaufwand verursachen. Die These der wenig verketteten Konstruktions Schritte wird auch durch die Ergebnisse einer 1997 durchgeführten Untersuchung bei vier namhaften europäischen Werkzeugmaschinenherstellern gestützt (vgl. Abb. 2.3).

Auch hier zeigt sich, daß mit einer Ausnahme (Unternehmen 4), ausschließlich zweidimensional konstruiert wird. Aufgrund dessen werden auch keine integrierten Analysetools für die Bewertung des Maschinenentwurfs herangezogen. Für eine FE-Berechnung wird zwar angegeben, daß die Geometrie aus dem CAD übernommen wird, aber da es sich um zweidimensionale Geometrie handelt, werden hiermit in der Regel lediglich statische Festigkeitsrechnungen kleinerer Details durchgeführt. Für die Simulation z.B. des Eigenschwungsverhaltens der Gesamtmaschine werden die FE-

⁴ Produktmodell: Ein Modell, das alle relevanten Informationen über ein Produkt in hinreichender Vollständigkeit enthält. Darin können nicht nur geometrische Informationen, sondern auch technische, technologische und baustrukturelle Informationen sowie solche über Konstruktions- und Fertigungsprozeß enthalten sein [PAHL & BEITZ 1993].

2 Situationsanalyse

Modelle, sofern überhaupt durchgeführt, überwiegend separat in speziellen FE-Preprozessoren aufgebaut. Unternehmen 4 befindet sich gerade in der Einführungsphase eines 3D-Modellierers und setzt dieses Tool bereits in den frühen Konstruktionsphasen z.B. bei der Layoutfindung und Kollisionsprüfungen ein. Aber auch hier ist ein durchgängiges Informationsmodell nicht vorhanden, da z.Zt. zumindest noch die Doppelstrategie eines kombinierten 2D-CAD und 3D-CAD Einsatzes verfolgt wird.

	Unternehmen 1				Unternehmen 2				Unternehmen 3				Unternehmen 4			
	Planung	Konzeption	Entwurf	Ausarbeitung	Planung	Konzeption	Entwurf	Ausarbeitung	Planung	Konzeption	Entwurf	Ausarbeitung	Planung	Konzeption	Entwurf	Ausarbeitung
Konstruktions-Tools																
Papier	x	x	x	x		x	x	x		x				x	x	
2D-CAD	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x			x	x
3D-CAD														x	x	
E-CAD																
FEM		x	x	x						x	x	x				
FE aus CAD																
Geometrie aus CAD				x			x				x				x	
Erneute Modellierung				x												
Kostenabschätzung																
PPS integriert										x	x	x				
CAD integriert																
Stand alone																
Office Tools		x	x	x						x	x	x		x		
Papier	x	x	x	x						x	x	x			x	x
Persönliche Erfahrung	x	x	x	x						x	x	x		x		
Kostenabschätzung durch																
Konstrukteur				x*				x*		x	x	x		x	x	x
Arbeitsplaner		x	x	x						x	x	x		x	x	x
Controlling	x	x	x	x						x	x	x		x	x	x
Installationsplanung																
3D-CAD integriert																
E-CAD integriert			x	x												
Stand alone																
Persönliche Erfahrung																
EDM/PDM-Einsatz																
(hoch, mittel, niedrig, nicht)				niedrig				niedrig				niedrig				mittel

* = nur für Materialkosten

Abb. 2.3: CAx-Einsatz bei vier europäischen Werkzeugmaschinenherstellern

Die konstruktionsbegleitende Kalkulation wird zwar durchgeführt, aber in keiner der untersuchten Firmen wird auf die mit dem CAD erzeugte Geometrie zurückgegriffen. Geometrische Informationen, wie z.B. Volumina, Massen, Längen müssen mühsam bestimmt und für die verwendeten Hilfsmittel aufbereitet werden. Die wichtigsten Werkzeuge sind Papier und nicht integrierte Tabellenkalkulationsprogramme aus der im Betrieb eingesetzten Office-Software. Die Durchführung einer konstruktionsbegleitenden Kalkulation und das Erzielen zuverlässiger Ergebnisse mit diesen datentechnisch und organisatorisch nicht den Konstruktionsprozeß eingebundenen Werkzeugen ist in hohem Maße von der Erfahrung der Kalkulatoren abhängig. In nur zwei

Firmen ist der Konstrukteur, der ja mit seinen Entwürfen größtenteils die Kosten festlegt, auch bei der Kalkulation in stärkerem Maße beteiligt. Die Erfahrung zeigt, daß das Kalkulations-Know-How in der Regel in der Arbeitsvorbereitung und im Controlling liegt. Eine Kostenabschätzung wird daher nicht vom Konstrukteur vorgenommen, sondern von Kalkulatoren. Die Durchführung dieser Aufgabe verursacht nicht nur einen Wechsel des DV-Systems (CAD → Tabellenkalkulation), sondern auch einen Zuständigkeitenwechsel. Dies bedeutet Erklärungsaufwand und bringt gerade in den frühen Konstruktionsphasen aufgrund der noch unvollständigen Angaben die Gefahr von Mißverständnissen mit sich, insbesondere bei Personen mit nicht-technischer Ausbildung.

Zusammenfassend läßt sich feststellen:

- es findet kaum Datenaustausch zwischen CAx-Systemen statt (insbesondere zwischen CAD und Berechnungsprogrammen),
- es werden keine integrierten CAE-Werkzeuge (Computer Aided Engineering) eingesetzt,
- es erfolgt kein Aufbau eines integrierten Produktmodells.

Dies führt zu einer langen Konstruktionsphase. Es müssen entweder aufwendig viele einzelständige Partialmodelle erzeugt werden oder aber es wird auf eine frühzeitige Bewertung verzichtet, was wiederum die Gefahr einer zu späten Fehlererkennung und teuren Fehlerbehebung in sich birgt..

2.1.3 Kostenrechnung im Werkzeugmaschinenbau

2.1.3.1 Grundbegriffe

Die Kosten- und Leistungsrechnung dient der zielgemäßen Steuerung des innerbetrieblichen Leistungserstellungsprozesses. Während die internen Aufgaben der Kosten- und Leistungsrechnung sich aus der Erfordernis der Bereitstellung entscheidungsrelevanter Daten zu Planungs- und Kontrollzwecken ergeben, resultieren die externen Aufgaben aus der Dokumentationsfunktion des Rechnungswesens, die sich aus Handels- und Steuerrecht ergeben [COENENBERG 1993].

2 Situationsanalyse

Definiert werden dabei Kosten als „*der bewertete Verbrauch von Gütern und Dienstleistungen für die Herstellung und den Absatz von betrieblichen Leistungen und die Aufrechterhaltung der dafür erforderlichen Kapazitäten*“ [WÖHE 1986].

Die Kostenrechnung gliedert sich in die Kostenarten-, die Kostenstellen- und Kostenträgerrechnung.

Die **Kostenartenrechnung** steht am Anfang der Kostenrechnung. Sie dient der Erfassung und Gliederung aller im Laufe der jeweiligen Abrechnungsperiode angefallenen Kostenarten. Die Kostenartenrechnung differenziert die Kosten nach

- Art und Höhe des Anfallens,
- Zurechenbarkeit nach Einzel-, Gemein- und Sondereinzelkosten,
- Abhängigkeit von der Beschäftigung in fixe und variable Kosten [OLFERT 1994].

Die **Kostenstellenrechnung** verteilt die Kosten auf die Betriebsbereiche (Kostenstellen), in denen sie angefallen sind. Zu unterscheiden sind in diesem Zusammenhang relative Kostenstelleneinzelkosten und Kostenstellengemeinkosten. Kostenstelleneinzelkosten werden einer Kostenstelle direkt zugeordnet., während Kostenstellengemeinkosten hingegen über den Umweg der Umlage auf die jeweiligen Kostenstellen vereinzelt werden müssen. Die Kostenstellenrechnung übernimmt dabei die Gemeinkosten aus der Kostenartenrechnung. Die Verteilung wird in der Regel mit Hilfe des Betriebsabrechnungsbogens (BAB) vorgenommen. Innerhalb dieser Rechnung werden Zuschlagssätze ermittelt, die später in der Kostenträgerrechnung eine anteilige Zurechnung der Gemeinkosten auf die Kostenträger ermöglicht. Die Kostenstellenrechnung stellt somit ein Bindeglied zwischen der Kostenarten- und der Kostenträgerrechnung dar [COENENBERG 1993]. Dabei verfolgt die Kostenstellenrechnung einen zweifachen Zweck. Sie dient zum einen der Kontrolle Kostenentstehung und zum anderen ist eine genaue Stückkostenrechnung nur dann möglich, wenn die betrieblichen Leistungen mit den Kosten derjenigen Stellen belastet werden, die diese Leistungen erbringen [HABERSTOCK 1987].

In der **Kostenträgerrechnung** werden die Kosten den Kostenträgern (selbständige Leistungs- und Produktionseinheiten) zugewiesen. Hierbei werden aus der Kostenartenrechnung die Einzelkosten und aus der Kostenstellenrechnung die Gemeinkosten übernommen (vgl. Abb. 2.4). Die Kalkulation stellt einen Teilbereich der Kostenträgerrechnung dar. Synonym wird sie als Kostenträgerstückrechnung bezeichnet [EBERT 1991].

Wegen der zentralen Bedeutung der Kostenträgerstückrechnung bzw. Kalkulation in dieser Arbeit schließt sich im folgenden eine detaillierte Betrachtung an.

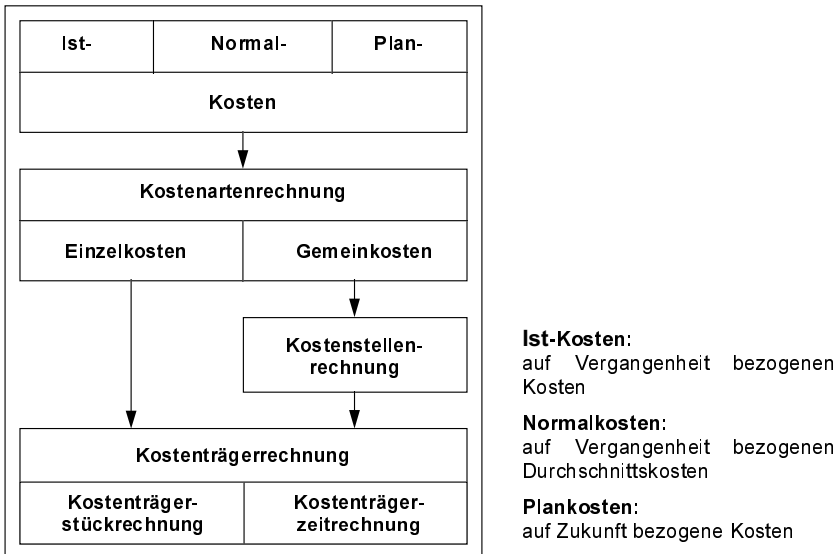


Abb. 2.4: Zusammenhang zwischen Kostenarten-, Kostenstellen- und Kostenträgerrechnung [WILDEMANN 1994]

2.1.3.2 Kalkulation

Innerhalb der Kostenträgerstückrechnung bzw. Kalkulation wird ermittelt, welche Kosten für die Herstellung einer Produkt- oder Leistungseinheit angefallen sind. Zentraler Aspekt ist die Preisfindung bzw. -bildung. Die Darstellung innerhalb dieser Arbeit konzentriert sich auf die Kalkulation der Herstellkosten.

Je nach Art der Fertigung und Zielsetzung der Kostenrechnung werden unterschiedliche Kalkulationsverfahren eingesetzt. Als typisch für die innerhalb dieser Arbeit betrachtete Werkzeugmaschinenindustrie läßt sich die Einzel- und Serienfertigung anführen [WARNECKE 1993]. Bei Vorliegen dieser Fertigungsart werden üblicherweise die Verfahren der differenzierenden Zuschlagskalkulation eingesetzt [EVERSHEIM U.A. 1994]. Daher begrenzt sich die Darstellung der einzelnen Kalkulationsverfahren auf die für die Zielgruppe der Werkzeugmaschinenindustrie typische

2 Situationsanalyse

Zuschlagskalkulation. Die im Bereich der Zuschlagsrechnung zu unterscheidenden Kosten sind in Abbildung 2.5 dargestellt.

Fertigungsmaterial (Einzelkosten)	Material- kosten	Herstell- kosten	Selbst- kosten
Materialgemeinkosten (Zuschlag bezogen auf Fertigungsmaterial)			
Fertigungslohn (Einzelkosten)	Fertigungs- kosten		
Fertigungsgemeinkosten (Zuschlag bezogen auf Fertigungslohn)			
Sondereinzelkosten der Fertigung (Einzelkosten)			
Forschungs- und Entwicklungskosten (Zuschlag bezogen auf Herstellkosten)		F+E-, Verwal- tungs- und Ver- triebs- kosten	
Verwaltungsgemeinkosten (Zuschlag bezogen auf Herstellkosten)			
Vertriebsgemeinkosten (Zuschlag bezogen auf Herstellkosten)			
Sondereinzelkosten des Vertriebs (Einzelkosten)			

Abb. 2.5: Kalkulationsschema der differenzierenden Zuschlagskalkulation (nach [COENENBERG 1993])

Grundidee der Zuschlagskalkulation ist die Differenzierung nach Einzel-, Sonder-einzel- und Gemeinkosten. Die Gemeinkosten werden über einen in der Kostenstellen-rechnung ermittelten Zuschlagssatz den Einzelkosten zugeschlagen. In der differenzierenden Zuschlagskalkulation werden die Gemeinkosten in mehrere Blöcke aufgeteilt, für die jeweils getrennte Zuschlagssätze gebildet werden. Die Zuschlags-sätze beziehen sich teils auf die entsprechenden Einzelkosten, teils auf die Herstell-kosten. Die generelle Schlüsselung der Gemeinkosten ist aber auch kritisch zu sehen. Die Zuweisung der Fertigungsgemeinkosten auf Basis der Fertigungslöhne entspricht nur unter speziellen Voraussetzungen der tatsächlichen Kostenverursachung. Es ist daher insbesondere in der automatisierten Fertigung verursachungsgerechter die Dauer der Maschinennutzung als Basis für Verrechnung der Fertigungsgemeinkosten zu verwenden.

Dieser Gedanke wird von der Maschinenstundensatzrechnung aufgegriffen. Die Über-wälzung der Fertigungsgemeinkosten auf die Kostenträger erfolgt nicht auf Basis wertmäßiger Schlüssel, sondern auf der Grundlage des mengenmäßigen Schlüssels „Bearbeitungszeiten von Produkten an den jeweiligen Kostenplätzen [Maschinen]“ [KLOCK U.A. 1993]. So werden die maschinenabhängigen Gemeinkosten proportional

2.1 Besondere Situation des Werkzeugmaschinenbaus

zur Bearbeitungszeit eines Produkts diesem zugewiesen. Der Maschinenstundensatz ist der Betrag der maschinenabhängigen Gemeinkosten pro Maschinenstunde.

Selbstkosten	Herstellkosten	Fertigungsmaterialkosten	Maschinenkosten	Fertigungsmaterialkosten	Platzkosten	Fertigungsmaterialkosten
		Materialgemeinkosten		Materialgemeinkosten		Materialgemeinkosten
		Fertigungslohn + Lohnnebenkosten		Fertigungslohn + Lohnnebenkosten		
		Fertigungsgemeinkosten		Kalkulatorische Abschreibungen		
				Kalkulatorische Zinsen		
				Raumkosten		
				Energiekosten		
				Instandsetzungskosten		
				Werkzeugkosten		
				Restfertigungsgemeinkosten		
Sondereinzelkosten der Fertigung	Sondereinzelkosten der Fertigung	Sondereinzelkosten der Fertigung				
Konstruktions- + Entwicklungskosten	Konstruktions- + Entwicklungskosten	Konstruktions- + Entwicklungskosten				
Verwaltungs- + Vertriebskosten	Verwaltungs- + Vertriebskosten	Verwaltungs- + Vertriebskosten				

Zuschlagskalkulation

Maschinenstundensatzrechnung

Platzkostenrechnung

Abb. 2.6: Gegenüberstellung von Zuschlagskalkulation, Maschinenstundensatz- und Platzkostenrechnung [EHRENSPIEL 1985]

Das Kalkulationsschema entspricht dem der differenzierenden Zuschlagskalkulation, jedoch wird der zu tragende Fertigungsgemeinkostenanteil berechnet, indem der Maschinenstundensatz mit der Bearbeitungszeit an der Maschine multipliziert wird und die Restfertigungsgemeinkosten addiert werden.

Die Platzkostenrechnung entspricht dem Verfahren der Maschinenstundensatzrechnung mit dem Unterschied, daß im Platzkostensatz auch die Fertigungslöhne enthalten sind. Abbildung 2.6 stellt die Zuschlagskalkulation der Maschinenstundensatz- und Platzkostenrechnung gegenüber.

Das überwiegend eingesetzte Kalkulationsverfahren in der Werkzeugmaschinenbranche ist die differenzierende Zuschlagskalkulation ausgebaut zur Maschinenstundensatzrechnung oder evtl. Platzkostenrechnung. Darüber hinaus wird häufig das hier vorgestellte prinzipielle Kalkulationsschema weiter verfeinert, um verursachungsgerechter kalkulieren zu können. So werden beispielsweise für bestimmte Teileklassen oft unterschiedliche Materialgemeinkostensätze verwendet. Mit dieser Methode der weiteren Differenzierung lassen sich somit auch hinsichtlich ihrer Gemeinkosten-

verursachung unterschiedliche Klassen von Kostenträgern über die Zuschlagskalkulation ausreichend genau kalkulieren.

2.1.3.3 Zeitpunkte der Kalkulation

Je nach Kalkulationszeitpunkt wird allgemein eine Vor-, Zwischen- und Nachkalkulation unterschieden. Während die Vorkalkulation auf einer groben Vorplanung des Produktionsablaufs basiert [EHRENSPIEL 1985] und somit auch als Plan-kalkulation bezeichnet werden kann [HORVÁTH U.A. 1996], erfolgt die Nachkalkulation anhand des tatsächlichen Fertigungsablaufs. Es wird also mit den bereits verursachten Kosten, den Ist-Kosten, gerechnet. Bei zeitlich länger andauernden Projekten werden bereits während der Produktion Zwischenkalkulationen zur Kostenkontrolle durchgeführt [EHRENSPIEL 1985]. Werden bereits während der Konstruktionsphase Kostenkontrollen durchgeführt, so spricht man von einer konstruktionsbegleitenden oder mitlaufenden Kalkulation.

Umfragen und Gespräche mit Werkzeugmaschinenherstellern haben ergeben, daß entwicklungsbegleitende Kalkulationen im Hinblick auf eine frühzeitige Kostenprognose von der Planungsphase bis zum Bau des ersten Prototyps sinnvoll und anzustreben sind. Bisher werden allerdings nur in der Planungsphase mit Hilfe des Target Costing (Zielkostenmanagement) die Zielkosten für das Gesamtprodukt und die wichtigen Baugruppen systematisch ermittelt. Bis zum Ende der Detaillierungsphase fehlen geordnete Methoden und in den Konstruktionsprozeß integrierte Rechnerhilfsmittel für eine Kostenkontrolle (vgl. Tabelle 2.3). In diesen Phasen ist man zur Zeit allein auf die Erfahrung des Konstrukteurs und seine Möglichkeiten zur Zusammenarbeit mit der Arbeitsvorbereitung bzw. dem Controlling angewiesen. Erfahrene Kalkulatoren können aufgrund genauer Nachkalkulationen von Vorgängermodellen die Herstellkosten abschätzen. Dies ist allerdings ein zeitraubender Prozeß, da die naturgemäß noch unvollständigen Konzepte und Entwürfe erläutert werden müssen und immer die Gefahr von Mißverständnissen besteht, auch aufgrund der häufig unterschiedlichen Ausbildungen⁵ und Sichtweisen. Darüber hinaus ist das Wissen für konstruktionsbegleitende Kalkulationen sehr stark an Personen gebunden und meist nicht dokumentiert. Ein Ausscheiden der betreffenden Personen aus dem Betrieb kann deshalb zu großen Problemen führen.

⁵ vgl. auch Abschnitt 2.1.1 Unternehmenscharakteristika und Abschnitt 2.1.2.3 Konstruktionshilfsmittel

2.1 Besondere Situation des Werkzeugmaschinenbaus

Erst wenn eine Kalkulation auf Basis von Arbeitsplänen, NC-Programmen oder Zeitmessungen bei der Produktion des Prototyps möglich ist, kann eine exakte Kostenprognose für die Serienmaschine getroffen werden.

Entwicklungsphase	Planungsphase	Konzeptphase	Entwurfsphase	Detail- und Prototypphase
Kostenarten	Herstellkosten als Zielkosten	Herstellkosten	Material- und Fertigungskosten	Material- und Fertigungskosten
Kostenträger	Gesamtmaschine und Hauptbaugruppen	kostentreibende Baugruppen und Einzelteile	kostentreibende Einzelteile und Features	alle Einzelteile und Features
Realisierung	bereits praktiziert als Target Costing	systematische Durchführung fehlt, aber als wünschenswert erkannt	systematische Durchführung fehlt, aber als wünschenswert erkannt	bereits praktiziert als exakte klassische Kalkulation auf Basis von Arbeitsplänen bzw. vom Prototyp verursachten Kosten

Tabelle 2.3: State-of-the-Art der entwicklungsbegleitenden Kalkulation im Werkzeugmaschinenbau

Zusammenfassend läßt sich feststellen:

- Kostenplanung (Zielkostenmanagement) bei Projektbeginn und eine Vorkalkulation der Serienmaschine nach dem Prototypbau werden durchgeführt, aber eine umfassende, systematische und integrierte konstruktionsbegleitende Bewertung in Konzept- bzw. Entwurfsphase erfolgt nicht,
- die Kostenabschätzung erfolgt mit Hilfe von Vorgängerdaten auf die der Konstrukteur meist keinen Zugriff hat (z. B. es besteht keine effiziente Möglichkeit die für die Konstruktion relevante Kostendaten von Vorgängermodellen zu ermitteln),
- Kostenkalkulationsverfahren sind in der Regel undokumentiertes Wissen eines erfahrenen Kalkulators,

- es besteht das Risiko von Schnittstellen- und Kommunikationsproblemen beim Informationsaustausch zwischen Konstrukteur und Kalkulator,
- es stehen keine geeigneten Hilfsmittel für eine in den Konstruktionsprozeß integrierte Kostenabschätzung zur Verfügung.

2.2 Ansätze zur konstruktionsbegleitenden Kalkulation

2.2.1 Einteilung konstruktionsbegleitender Kalkulationsmethoden

Für die Kostenabschätzung in den frühen Konstruktionsphasen werden auch heute schon verschiedene Verfahren eingesetzt. Sie lassen sich prinzipiell in qualitative und quantitative Verfahren zur Kostenfrüherkennung einteilen (vgl. Tab. 2.4).

Qualitative Kosteninformationssysteme	Quantitative Kosteninformationssysteme
Heuristische Regeln	Kostenabschätzung
Gut-Schlecht-Beispiele	Kurzkalkulationsformeln
Relativkostenkataloge	a) Theoretische Ermittlung
Kostenstrukturen	b) Empirische Ermittlung
	Suchkalkulation
	Analogieverfahren
	Simulation

Tabelle 2.4: Systematik der Kosteninformationssysteme (nach [EITRICH 96])

Zu den qualitativen Kosteninformationssystemen zählen heuristische Regeln (plakativ formulierte Erfahrung), Gut-Schlecht-Beispiele (Tabellenwerke mit einer Gegenüberstellung von gut und schlecht konstruierten Konstruktionselementen hinsichtlich eines Kriteriums vgl. z.B. [PAHL & BEITZ 1993]), Relativkostenkataloge (Kosten von Varianten werden über einen Multiplikator bezogen auf den Standard angegeben) und Kostenstrukturen (Tabellen, die die Anteile an den gesamten Herstellkosten für einzelne Baugruppen und Bauteile ausweisen). Obwohl diese Verfahren keine absoluten Kostenwerte liefern und somit für eine entwicklungsbegleitende Kalkulation nicht geeignet sind, können sie doch direkt beim Konstruieren helfen, kostengünstige Lösungsvarianten zu bevorzugen.

Für eine echte entwicklungsbegleitende Kalkulation kommen nur die quantitativen Kosteninformationssysteme in Frage, da nur sie absolute Kostenwerte zur Verfügung stellen, die den Zielkosten gegenübergestellt werden können und somit eine Über-

prüfung der Einhaltung des Kostenziels ermöglichen. Ein sehr häufig angewandtes Verfahren ist die Kostenabschätzung durch ein oder mehrere Experten auf Basis exakter Nachkalkulationen ähnlicher Vorgängermodelle⁶.

Der Aufwand, der durch das Hinzuziehen der Experten entsteht, soll durch die Verfahren der Kurzkalkulation vermieden werden. EHRENSPIEL (1985) versteht „... unter Kurzkalkulation alle Methoden, die im jeweiligen Bearbeitungsstadium des Produkts, also z.B. in Konstruktion oder Projektierung anwendbar sind und mit den dort verfügbaren Parametern auskommen. Typische fertigungstechnische Größen wie Vorschub oder Schnittgeschwindigkeit sind ausgeschlossen“. Die Kurzkalkulation basiert typischerweise auf Kostenfunktionen, die entweder analytisch oder empirisch ermittelt, vereinfacht Herstell-, Material- oder Fertigungskosten berechnen können.

Analytisch ermittelte Kurzkalkulationsformeln können Kostenwachstumsgesetze sein [PAHL & RIEG 1982], bei denen auf Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen Kosten und konstruktiven Parametern zurückgegriffen wird oder Bemessungsgleichungen, die die Kosten eines Produkts mit den wesentlichen technischen Einflußgrößen verknüpfen [KESSELRING 1954].

Empirisch ermittelte Kostenfunktionen basieren entweder auf Erfahrungswerten oder statistischen Berechnungen. Grundlage für das Ableiten von Kostenfunktionen sind in jedem Fall exakte Nachkalkulationen von Vorgängermodellen. Die wichtigsten mathematischen Verfahren zur Ermittlung der Kostenfunktionen sind die Optimierungsrechnung und vor allem die lineare und nicht-lineare Regressionsrechnung. Zu den empirischen Kurzkalkulationsverfahren sind auch die bekannten Methoden der Gewichtskostenkalkulation und der Kilogramm-Kosten-Methode (auch: Materialkostenmethode) zu zählen. Mit Hilfe der Gewichtskostenkalkulation lassen sich gleichartige Produkte über die Proportionalität Gewicht - Herstellkosten berechnen, während die Kilogramm-Kosten-Methode, davon ausgeht, daß das Verhältnis der Materialkosten zu den gesamten Herstellkosten bei ähnlichen Maschinen und gleichem Fertigungsverfahren konstant bleibt. Einen Sonderfall stellen Systeme auf Basis neuronaler Netze dar. Sie arbeiten zwar nicht mit Kostenfunktionen, sondern mit während eines Lernprozesses verschieden gewichteten Neuronen. Sofern sie aber als Eingangsgrößen nur die in der Konstruktion unmittelbar verfügbaren Daten verwenden, können auch sie zu den Kurzkalkulationsverfahren gezählt werden.

⁶ vgl. Abschnitt 2.1.3.3 Zeitpunkte der Kalkulation

Mit dem Verfahren der Suchkalkulation werden die Produktkosten nicht im eigentlichen Sinn berechnet, sondern mit den Kosten eines ähnlichen Bauteils gleichgesetzt. Hierzu wird eine Datenbank mit den Daten von Vorgängerprodukten nach Ähnlichkeitsmerkmalen durchsucht und die Kosten des Bauteils mit der größten Übereinstimmung werden als die Kosten für das neue Bauteil übernommen [PICKEL 1988].

Kalkulationen auf Basis von Analogieverfahren werten einer Teileklasse zugewiesene Standardarbeitspläne hinsichtlich der Fertigungszeiten aus oder generieren selbst mit Hilfe einer Wissensbasis Grobarbeitspläne. Zusammen mit Maschinenstundensätzen und Lohnkosten lassen sich somit die Fertigungskosten ermitteln [HILLEBRAND 1991; SCHAAL 1992].

Lassen sich in schwierigen Fällen die Kosten nicht mehr über ein analytisches Modell berechnen, in dem die Zusammenhänge als geschlossene mathematische Ausdrücke formuliert sind, so kann über den Aufbau eines Simulationsmodells und anschließenden Simulationsexperimenten versucht werden, die gewünschten Ergebnisse zu erzielen. „*Simulation ist die Nachbildung eines dynamischen Systems in einem Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind*“ [VDI 3633]. Mit der Simulation wird versucht, die Wirklichkeit in einem Modell abzubilden und über Simulationsläufe (Experimente) die im Zeitablauf unterschiedlichen Zustände zu erfassen und zu beschreiben. In der Produktionstechnik wird Simulation von der Ablaufsimulation zur Optimierung des zeitlichen und kapazitiven Verhaltens von Produktionsanlagen bis hin zur 3D-Bewegungssimulation zur Layout- oder Prozeßoptimierung eingesetzt [TROSSIN 1995].

2.2.2 Informationssysteme zur konstruktionsbegleitenden Kalkulation

HKB (Herstellkostenberechnungsprogramm) ist eines der ersten kommerziell vertriebenen Programme zur Herstellkostenberechnung in der Entwurfsphase. Es wurde von der Fa. Mirakon zusammen mit der ETH Zürich entwickelt. Das System erlaubt Konstrukteuren ohne tiefes fertigungstechnisches Wissen die Kostenabschätzung von Einzelteilen. Möglich ist dies durch Entscheidungstabellen mit deren Hilfe das System Arbeitspläne ausarbeitet, Fertigungszeiten bestimmt und daraus die Kosten berechnet. Grundlage für die automatische Arbeitsplanung ist die detaillierte Beschreibung der Features des zu kalkulierenden Bauteils [FERREIRINHA 1985]. In dem Programmpaket CADCOST ist eine Schnittstelle zu einem CAD-System realisiert, so daß zwar eine manuelle Featureidentifikation direkt im Konstruktions-system möglich ist, aber auch dies immer noch einen erheblichen Aufwand bedeutet. Zur Berechnung dient wiederum HKB [FLEMMING 1990].

Auch an der Universität in Rhode Island/USA wurde bereits 1988 die Notwendigkeit einer frühzeitigen Kalkulation erkannt. Ziel war es, die Herstellkosten von einzelnen zu fertigenden Teilen ausreichend genau ohne vorherige Arbeitsplanung abschätzen zu können. Dazu wurde ein Programmsystem unter MS-DOS entwickelt, das im wesentlichen die Fertigungszeiten für einzelne Bearbeitungsfeatures berechnet. Hierfür werden die Zeiten für das Schruppen über das Zerspanungsvolumen, für das Schlichten über die bearbeitete Fläche und die Nebenzeiten über die Anzahl der Werkzeugwechsel und Werkstückumspannungen berechnet. Die Materialkosten und Rüstzeiten müssen direkt angegeben werden. Eine Koppelung zu einem CAD-System existiert nicht [BOOTHROYD 1988; BOOTHROYD & RADOVANOVIC 1989].

Mit dem Kosteninformationssystem KIS wurde am Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinenbau an der TU München ein Kalkulationssystem für Neukonstruktionen geschaffen, das zudem einen Anschluß an ein 3D-CAD System vorsah. Für eine Kostenberechnung wird das CAD-Modell interaktiv in eine Featurestruktur (Struktur von Herstellungselementen) überführt. Die Geometrie selbst und alphanummerische Attribute, die mit den Features verknüpft sind, erlauben sowohl eine globale als auch eine detaillierte Kostenberechnung. Das System aktiviert dabei selbständig nach einem hinterlegten Regelwerk die für die Kostenberechnung des jeweiligen Herstellungselements notwendigen Kalkulationsalgorithmen. Verwendet werden sowohl fertigungsorientierte Kalkulationsformeln, als auch empirisch ermittelte Kurzkalkulationsformeln. Über die reine Kostenberechnung hinaus, ist in KIS ein Suchsystem enthalten, um Daten von evtl. vorhandenen Vorgängervarianten wiederzufinden. Der Schwerpunkt bestand allerdings in der Bereitstellung und Bewertung von Kosteninformationen für Einzelteile und einfachere Baugruppen bei Neukonstruktionen [HILLEBRAND 1991].

Das System XKIS (Extendiertes Kosten Informationssystem) verbindet wissensbasierte Methoden und relationale Datenbanktechnik mit einem traditionellen CAD-System. Das Modul zur arbeitsplanbasierten Kostenkalkulation berechnet auf der Grundlage der detailliert einzugebenden Geometriedaten eines einzelnen Bauteils (manuelle Identifikation von Formelementen bzw. Features) unter Berücksichtigung der erforderlichen Bearbeitungsschritte und -verfahren zunächst die Stückzeiten für sämtliche erforderlichen Arbeitsgänge. Die Stückzeiten können dabei über Regressionsformeln oder aber über neuronale Netze bestimmt werden. In einem zweiten Schritt werden die Fertigungskosten aus den anfallenden Fertigungszeiten, den Maschinenstundensätzen, den Stundenlöhnen, den Gemeinkostenzuschlagsätzen und diversen anderen Zuschlägen ermittelt. Material-, Härte- oder Waschkosten werden über gewichtsproportionale Faktoren berechnet. Die entsprechenden Daten werden in

2 Situationsanalyse

Frame-Form in einer relationalen Datenbank verwaltet [SCHAAL 1992]. XKIS wurde auf einem IBM-Großrechner in das CAD-System CADAM integriert. Um den Nachteil der nicht überall einsetzbaren Hard- und Software auszugleichen, wurden von STEINER (1995) speziell für den praktischen Einsatz moderner Kleinrechner und featurbasierter 3D-CAD-Systeme die Randbedingungen und Anforderungen an rechnergestütztes Kostenkalkulieren und -senken neu formuliert. Darüber hinaus hat er zusätzliche Verfahren zur Fertigungszeitbestimmung, wie z.B. die gewichtete Regression, vorgeschlagen.

Das Kalkulationssystem FEKIS (Feature-basiertes Kosten Informationssystem) ist aus dem Programm XKIS entwickelt worden. Dabei sollte vor allem der gravierende Nachteil der langen Featureidentifikation in KIS/XKIS vermieden werden. Der Grundgedanke ist Features nicht nachträglich mit den für ihre Klasse typischen Parametern zu versehen, sondern nur mit bereits vordefinierten Features, die mit entsprechender Information und Grobarbeitsplänen verknüpft sind, zu arbeiten. Demzufolge findet es seine Anwendung bei der Kostenabschätzung von Bauteilen der Einzel- und Serienfertigung mit hohem Ähnlichkeitsgrad während der Konstruktion. FEKIS ist in ein Modellierungs- und ein Definitionsmodul aufgeteilt. Im Definitionsmodul werden von Fertigungsspezialisten neue Features mit den geometrischen, technologischen und administrativen Daten erstellt. Die Geometrie des Bauteils, also die Gesamtheit seiner Features, wird mit einem kommerziellen CAD-System unter Verwendung der vordefinierten Konstruktionselementen (Masterfeatures) modelliert. Ähnlich wie mit XKIS werden die Bearbeitungszeiten für die Herstellung der Features wie für das Bauteil aus den Daten über die erforderlichen Fertigungstechnologien und -operationen sowie den eingesetzten Maschinen ermittelt. Die Konvertierung der Zeiten in Kosten geschieht über die Platzkostenrechnung. Kosten, die nicht auf Fertigungszeiten beruhen, wie z.B. Materialkosten, werden durch „Verrechnung des entsprechenden Kostensatzes mit dem Gewicht des Teils kalkuliert“ [WOLFRAM 1994; EHRENSPIEL & WOLFRAM 1994].

Das Kostenmodell zur Bewertung von Produktvarianten KOMO wurde von der Firma GPS zusammen mit 7 weiteren Unternehmen entwickelt. Der Grundansatz in diesem System ist die ressourcenorientierte Prozeßkostenrechnung. Vor dem Hintergrund steigender Gemeinkostensätze, die zudem in der Regel als Fixkosten aufgefaßt werden, sollen mit KOMO Varianten über den Ressourcenverbrauch auch in Bereichen wie Entwicklung und Arbeitsvorbereitung verursachungsgerecht kalkuliert werden. Für eine Kalkulation sind zuerst die Varianten bestimmenden Merkmale zu identifizieren, die anschließend vom System über Ressourcenverbrauchs- und Kostenfunktionen bewertet werden. Demzufolge dokumentiert das Ergebnis weniger die

Gesamtherstellkosten des untersuchten Bauteils bzw. der Baugruppe als vielmehr die jeweiligen Mehrkosten der Einzelvarianten. Das System ist individuell konfigurierbar und besitzt Schnittstellen zur Übernahme von Daten aus dem betrieblichen Rechnungswesen. Der Einsatz von KOMO setzt allerdings eine umfangreiche Prozeßanalyse des eigenen Unternehmens voraus, um so ein Unternehmensmodell mit den Ressourcenverbrauchs- und Kostenfunktionen aufzubauen. Eine Integration in ein CAD-System ist derzeit noch nicht realisiert [EVERSHEIM & CAESAR 1990; SCHUH & STEINFATT 1993].

Auch das im Rahmen eines EU-Projekts entwickelte Kalkulationssystem PICANT (Process Integrated Cost Analysis Tool) basiert auf einem prozeßorientierten Kostenmodell. Das Tool ist speziell auf die Anforderungen der Luft- und Raumfahrtindustrie zugeschnitten. Durch die dort große Anzahl an eingesetzten Verfahren in der Fertigung und Montage ist das sonst weit verbreitete Verfahren der Zuschlagskalkulation nicht mehr verursachungsgerecht und es wurde deshalb ein prozeßorientierter Ansatz gewählt. Bei der Kalkulation werden mit Hilfe einer Wissensbasis⁷ die durchzuführenden Prozesse mit ihrem Ressourcenverbrauch den einzelnen Komponenten des Produkts zugewiesen. Über zuvor statistisch ermittelte Funktionen, die einen Zusammenhang zwischen Ressourcenverbrauch, Produktparametern und Prozeßkosten herstellen, werden sukzessive die gesamten Produktkosten berechnet. Das System bietet die Möglichkeit sowohl Produktparameter aus dem 3D-CAD zu übernehmen als auch eine Kalkulation in den unterschiedlichen Konstruktionsphasen durchzuführen, sofern entsprechende Prozeßmodelle zur Verfügung stehen [EITRICH 1996].

Simulation Based Costing (SBC) von LORENZEN (1997) ist ein auf eine relationale Datenbank basierendes Kalkulationssystem zur monetären Bewertung von Fertigungsstrukturen. Grundlage ist eine Bewertungssystematik, die eine produkt-, eine ressourcen- und eine prozeßorientierte Sichtweise integriert und bereits in der Planungsphase verschiedene Varianten von Fertigungsanlagen hinsichtlich der kostenoptimalen Fertigung eines Produkts vergleichen kann. Die Hauptzielsetzung des Systems ist zwar die wirtschaftliche Bewertung der Produktionseinrichtung und nicht des Produkts selbst, doch läßt sich das System umgekehrt auch zur Kostenbewertung verschiedener Produktvarianten bei genau einer vorgegebenen Fertigungsstruktur heranziehen. Voraussetzung ist allerdings eine detaillierte Beschreibung des Produkts in Form von Arbeitsplänen und NC-Programmen. Mit SBC sind deshalb keine frühzeitigen Kostenabschätzungen in der Konzept- und Entwurfsphase möglich, aber

⁷ In einer wissensbasierten Datenbank wird anwendungsspezifisches Wissen (Faktenwissen) getrennt von einer anwendungsunabhängigen Schlußfolgerungskomponente (Methodenwissen) verwaltet [BLUMBERG 1991].

2 Situationsanalyse

dafür hochgenaue und verursachungsgerechte Kalkulationen am Ende der Detaillierungsphase. Durch die ursprünglich andere Zielsetzung sind Schnittstellen zu 3D-CAD und PDM nicht vorgesehen.

Bei dem System CATWISEL (Computer Aided Transmission Design with Intelligent Support of Engineering Logic) handelt es sich um ein wissensbasiertes Konstruktionsverbundsystem, das bei der Getriebeprojektierung Kosteninformationen zur Verfügung stellt. Außerdem erstellt es automatisch Stücklisten, Arbeitspläne und NC-Programme. Die Ermittlung der Herstellkosten greift auf Feature-Informationen (z.B. Fertigungstechnologien, Kosteninformationen) zurück, die im CAD-System generiert werden. Jedem Feature wird ein Kostenanteil zugeordnet, der sich aus der jeweils erforderlichen Bearbeitung ergibt. Das System hat seinen Schwerpunkt in der Berechnung von Material- und Fertigungskosten von Wellenteilen und Gußgetriebegehäusen [HAASIS 1994].

Mit OmniCOST wurde ein Kalkulationssystem speziell für den Werkzeugmaschinenbau vorgestellt. Das Programm erlaubt eine regelbasierte Ableitung eines ersten Vorschlags der Funktionsstruktur einer Werkzeugmaschine aus den Vorgaben im Pflichtenheft. Der Anwender ist jedoch jederzeit in der Lage den Vorschlag zu verändern oder zu erweitern. In einem nächsten Schritt werden den einzelnen Funktionselementen technische Parameter zugewiesen und zusammen mit regressionsanalytisch ermittelten Kostenfunktionen die Kosten sukzessive von Elementarfunktionen bis hin zur Gesamtfunktion berechnet [STEITZ 1992]. Das Kalkulationstool ermöglicht die Bewertung kompletter Werkzeugmaschinen und fördert einen strukturierten Ablauf der Entwicklung von der Aufstellung der Anforderungsliste über die Bestimmung der Funktionsstruktur bis hin zur wirtschaftlichen Bewertung des Entwurfs. Allerdings ist keine Schnittstelle zu einem CAD-System realisiert. Kalkulationsrelevante geometrische Daten werden auf Basis von Fertigungszeichnungen manuell in das Berechnungsprogramm eingegeben, so daß hier kein durchgängiger Datenfluß von Synthese- zu Analysetools möglich ist .

Im Rahmen der Variantenkonstruktion von Werkzeugmaschinen können auch mit dem System *kalwic* (Kalkulation von Werkzeugmaschinen im CAD-System) die Herstellkosten für die gesamte Werkzeugmaschine bereits ab der Konzeptionsphase kalkuliert werden. Grundprinzip des Programmsystems ist es, nur stark kostentreibende, sogenannte A-Teile zu kalkulieren. Die Herstellkosten werden sukzessive auf Bauteil-, Baugruppen-, und Maschinenebene berechnet. Das System ist vollständig in ein parametrisches, volumen-orientiertes 3D-CAD-System integriert und differenziert bei der Kostenkalkulation nach selbstgefertigten Komponenten und Zukaufteilen. Während bei den Zukaufteilen eine Stückliste der für den zu kalkulierenden

Maschinentyp zutreffenden A-Teile zusammengestellt und ausgewertet wird, werden bei der Kalkulation der selbstgefertigten Komponenten zusätzlich zu den Material- auch Rüst- und Fertigungskosten unterschieden. Die Fertigungskosten für ein Bauteil werden als Funktion der an ihm bearbeiteten Flächen aufgefaßt, so daß auch ohne Kenntnis exakter fertigungstechnologischer Parameter (die erst später festgelegt werden) eine hinreichend genaue Kostenprognose möglich ist [ROMANOW 1995; SPRENZEL 1995]. Kalwic ist vollständig in das CAD-System Pro/Engineer integriert und kann nicht zusammen mit anderen CAD-Systemen betrieben werden. Eine Anbindung an ein PDM-System ist nicht vorgesehen.

FRECH stellt 1998 in seiner Dissertation das Kalkulationssystem ASCET (Assembly Oriented Cost Estimation Tool) zur integrierten, prozeßbegleitenden Vorkalkulation vor. Mit diesem System lassen sich die Herstellkosten von gesamten Produktstrukturen in den unterschiedlichen Konstruktionsstadien abschätzen bzw. berechnen. Der Schwerpunkt der Arbeit bildet die Berechnung der Montagekosten, die auf Basis von Systemen vorbestimmter Zeiten ermittelt werden. In das System ist eine objektorientierte Datenbank integriert, in der das Gegenstandsmodell für Produkte, das Montage- und Teilefertigungsmodell mit den entsprechenden Montageoperationen und Fertigungsmethoden als auch das Kostenrechnungsmodell abgelegt sind. Durch dieses Datenbankkonzept ist vor allem auch die für eine Vorkalkulation wichtige Wiederhol- und Ähnlichteilsuche möglich. ASCET besitzt eine Dateischnittstelle zum CAD-System KONSYS 2000. Die Berechnungsalgorithmen setzen ihren Schwerpunkt auf die Erfassung der Montagekosten. Eine Anbindung an ein kommerzielles EDM/PDM-System ist derzeit aufgrund der Abbildung einiger EDM-Funktionalitäten in ASCET selbst, wie z.B. Aufbau eines Artikelstamms mit entsprechenden Suchmöglichkeiten, noch nicht realisiert.

2.3 Zusammenfassung der Defizite bisheriger Ansätze

Viele der untersuchten Kalkulationssysteme arbeiten auf Basis von Fertigungsfeatures, die entweder manuell, aufwendig identifiziert werden müssen oder aus einer Featurebibliothek ausgewählt werden können. Die Kalkulationsalgorithmen arbeiten über eine Fertigungszeitbestimmung auf Basis von zugeordneten Grobarbeitsplänen oder mit Hilfe von wissensbasierten Systemen abgeleiteten featurespezifischen Arbeitsplänen. Diese Systeme liefern dadurch zwar relativ genaue Ergebnisse für Einzelteile und einfachere Baugruppen, aber die Berechnung nach diesem Verfahren setzt allerdings auch eine genaue Featurebeschreibung voraus, die in der Konzept- und der frühen Entwurfsphase noch nicht möglich ist. Für eine frühzeitige Abschätzung komplexer

2 Situationsanalyse

Produkte sind sie daher aufgrund des geringen Detaillierungsgrads der vorhandenen Informationen wenig geeignet.

Eine Reihe der Kosteninformationssysteme sind ohne Ankopplung an CAD-Systeme, was im allgemeinen eine aufwendige wiederholte Dateneingabe geometrischer bzw. geometrieabhängiger Informationen bedeutet und zusätzlich die Gefahr von Übertragungsfehlern in sich birgt. Andere Systeme sind direkt in die Benutzeroberfläche eines CAD-Systems integriert und haben weitestgehend Zugriff auf das CAD-Datenmodell. Die vollkommene Integration hat allerdings auch eine starke Abhängigkeit vom verwendeten CAD-System zur Folge. Ein Systemwechsel oder der Einsatz eines weiteren CAD-Systems verlangt automatisch die weitgehende Neuprogrammierung des Kalkulationsprogrammes. Darüber hinaus benötigen andere CAX-Systeme oft ähnliche CAD-Daten, die sie sich erneut über eine Analyse der CAD-Datenbasis beschaffen müssen. Dabei werden häufig auch neue Datenfiles und Formate angelegt die nur eine unnötige Redundanz schaffen und sehr zeitaufwendig bei der Erstellung sein können.

Die meisten Kalkulationsprogramme sind zudem nicht in ein EDM/PDM-System integriert bzw. mit ihm verbunden. Sie implementieren daher oft vieles, was Standard-systeme einer integrierten Produktentwicklung bereits zur Verfügung stellen (z.B. Wiederholteilsuche im EDM, Stücklisteneingabemodule, eigene Materialdatenbanken usw.). Gerade aber die Verknüpfung mit EDM/PDM als dem Datenmanagement-System der Entwicklung mit den Möglichkeiten Daten global zur Verfügung zu stellen, Versionsmanagement zu betreiben, Zugriffsrechte zu kontrollieren und Konstruktionsfreigaben zu steuern, ist besonders wichtig für die moderne Produktentwicklung. Dieses Potential wird zunehmend von den Werkzeugmaschinenherstellern erkannt und die Einführung von PDM-Systemen ist absehbar.

Schließlich sind auch eine Vielzahl der verfügbaren Kostentools unter anderen Zielsetzungen entwickelt worden, so daß sie eine geringe Kompatibilität mit der Werkzeugmaschinenbranche aufweisen. Sie bauen beispielsweise entweder auf prozeßorientierten Kostenrechnungssystemen auf oder sind speziell auf bestimmte Branchen und Produkte zugeschnitten. Vielfach wird dem mittelständischen Umfeld im Werkzeugmaschinenbau zu wenig Rechnung getragen und die wirtschaftliche und technische Leistungsfähigkeit dieser Unternehmen bei der Lösungsfindung zu wenig berücksichtigt.

3 Anforderungen und Ziele bei der rechnerintegrierten Kostenbewertung

3.1 Anforderungen

Die konstruktionsbegleitende Kalkulation soll eine frühzeitige Zielkostenkontrolle ermöglichen und somit das späte Erkennen von Fehlentwicklungen vermeiden helfen. Kalkulationssysteme, die dem Konstrukteur hierbei helfen können, müssen für einen effizienten Einsatz eine Reihe von Anforderungen erfüllen, die hier noch einmal zusammengestellt werden sollen. (vgl. Abbildung 3.1).



Abb. 3.1: Anforderungen an die konstruktionsbegleitende Kalkulation im Werkzeugmaschinenbau

Quantitative Kostenbereitstellung

Wie in Abschnitt 2.2.1 (Einteilung konstruktionsbegleitender Kalkulationsmethoden) angesprochen, werden prinzipiell qualitative und quantitative Kosteninformationssysteme unterschieden (vgl. auch [GRÖNER 1991]). Qualitative Kosteninformationssysteme können dem Konstrukteur von Beginn an helfen zielgerichtet zu konstruieren. Sie erlauben aber keinen Vergleich mit den Zielkosten aus der Anforderungsliste. Es

3 Anforderungen und Ziele bei der rechnerintegrierten Kostenbewertung

ist deshalb für konstruktionsbegleitende Kalkulationssysteme unabdingbar Kosteninformation auch quantitativ bereitzustellen.

„Mitwachsendes“ Kostenmodell

Wichtig für eine ständige Zielkontrolle ist ein dem Konstruktionsfortschritt angepaßtes Kostenmodell. Dies bedeutet, eine Kostenschätzung muß auch schon in der Konzeptphase mit den noch wenigen und unsicheren Daten durchgeführt werden können. Mit zunehmender Detaillierung der Konstruktion stehen auch der Kalkulation umfassendere Daten zur Verfügung, so daß entsprechend der Konstruktionsphase auch genauere Verfahren angewandt werden können. Im Werkzeugmaschinenbau werden wenigstens eine Kalkulation nach der Konzept- und nach der Entwurfsphase gefordert⁸.

Komplettbewertung von gesamten Maschinen

Für die Abschätzung der Herstellkosten von Werkzeugmaschinen ist es ebenso notwendig die Kosten der Zukaufteile zu berücksichtigen. Der Materialkostenanteil bei Werkzeugmaschinen liegt teilweise bei über 60%, wobei der größte Teil dabei von den zugekauften Komponenten und Baugruppen verursacht wird [ROMANOW 1994]. Für ein Kalkulationstool muß deshalb die Integration von Kaufteilkosten aus dem EDM/PDM-System bzw. PPS gefordert werden, um so durch sukzessives Zusammenfassen der Herstellkosten von Kauf- und Eigenfertigungskomponenten zu Baugruppenkosten zu gelangen und diese den Zielkosten gegenüberstellen zu können.

Konstruktionsparallele Kalkulation

Für einen schnellen und effizienten Ablauf des Konstruktionsprozesses ist eine Verzahnung zwischen Modellierung und Evaluierung (technisch wie wirtschaftlich) notwendig. Ideal ist es, wenn der Konstrukteur parallel zur Geometrieerzeugung ohne große Unterbrechung des Konstruktionsprozesses die Kalkulation selbst durchführen kann. Voraussetzungen hierfür sind eine Bedienung ohne tiefere fertigungstechnische Kenntnisse sowie Schnittstellen bzw. Integration in die wichtigen Softwarewerkzeuge des Konstruktionsarbeitsplatzes. Dies erlaubt die in den jeweiligen Systemen erzeugte Information für die Kalkulation zu übernehmen, z.B. Geometrieinformation aus dem CAD oder Stücklisten unverändert übernommener Baugruppen aus dem EDM-System, und eine erneute Generierung von bereits vorhandener Information zu vermeiden. Die Ergebnisse werden so nach kurzer Zeit direkt dem Entwickler zur Verfügung gestellt. Der Konstruktionsfluß wird nicht unterbrochen und wiederholtes Einarbeiten nach

⁸ vgl. Abschnitt 2.1.3.3 Zeitpunkte der Kalkulation

kalkulationsbedingten Unterbrechungen durch den Arbeitsplaner oder Kalkulator werden vermieden [REINHART U.A. 1997].

Zentrale Datenverwaltung

Für eine sinnvolle Kalkulation muß sichergestellt werden, daß bei der Evaluierung

- alle benötigten Daten zur Verfügung stehen und gelesen werden können,
- nur die aktuellen Daten Verwendung finden,
- die berechnete Kosteninformation global dem leseberechtigten Personenkreis zur Verfügung gestellt werden kann.

Gewährleistet werden kann dies nur durch ein zentrales Datenmanagement und dem Aufbau eines integrierten Produktmodells [SPRENZEL & MEINLSCHMIDT 1997].

Vermeidung von Akzeptanzproblemen

Die Integration der Kalkulation in die Konstruktion bringt auch Gefahren mit sich. Der Konstrukteur wird angehalten, zusätzlich zu der ihm bekannten Aufgabe für die er ausgebildet worden ist, auch noch betriebswirtschaftliche Aufgaben auszuführen. Um hier keine Ablehnung zu provozieren, muß das System leicht zu erlernen sein und dem Konstrukteur nur betriebswirtschaftliche und fertigungstechnische Grundkenntnisse abverlangen. Ein Hilfsmittel hierzu kann die Integration des Kalkulationssystems in gängige Benutzeroberflächen am Arbeitsplatz des Konstrukteurs sein.

Offene Systemstruktur

Die Struktur des Kalkulationsprogrammes muß sowohl im Hinblick auf die Konfigurierbarkeit durch Kalkulationsexperten als auch im Hinblick auf die Bedienung „offen“ sein. Dies bedeutet die Kalkulationsalgorithmen müssen leicht anpaßbar sein und zusätzliche Parameter für die Berechnung müssen ohne Probleme eingelesen und verarbeitet werden können.

Aus Bediener-sicht ist es unbedingt erforderlich, auch die Ergebnisse anderer Softwaretools, wie z.B. die Resultate von Suchanfragen im EDM integrieren zu können. Hingewiesen sei hier nochmals auf das Übernehmen von bereits vorhandenen Stücklisten oder exakten Kostenwerten aufgrund von Nachkalkulationen aus dem EDM bzw. PPS.

Kompatibilität zu den betrieblichen Randbedingungen in der Werkzeugmaschinenindustrie

Ein Programm zur konstruktionsbegleitenden Kalkulation muß sich auch an den betrieblichen Randbedingungen orientieren. So muß das implementierte Kalkulationsverfahren auf das eingesetzte Standardkostenrechnungssystem aufbauen können. Ist dies nicht möglich, so ist in der Regel der Implementierungsaufwand so hoch, daß sich das System nicht wirtschaftlich betreiben läßt. Als Beispiel seien hier prozeßorientierte Kostenprognosesysteme in einem Betrieb, der die differenzierte Zuschlagskalkulation einsetzt, genannt. Hier müßten die umfangreichen Analysetätigkeiten zur Einführung einer Prozeßkostenrechnung (Prozeßidentifikation, Bestimmen der Prozeßgrößen, Festlegung der Planprozeßmengen und Bildung der Prozeßkostensätze) nur für die konstruktionsbegleitende Kalkulation durchgeführt werden [CERVELLINI 1994].

Darüber hinaus sollte das System in seinen Kosten bei Implementierung und Wartung den Möglichkeiten mittelständischer Unternehmen (vgl. Abschnitt 2.1) angepaßt sein. So sprengen zum Beispiel kompliziert aufzubauende Expertensysteme häufig die Kapazitäten oder Fähigkeiten der Soft- und Hardwarebetreuer in der Werkzeugmaschinenindustrie und sind daher wenig geeignet.

Der Anteil an Varianten- und Anpaßkonstruktionen im Werkzeugmaschinenbau beträgt zwar ca. 85%, dennoch ist die Anzahl der verschiedenen Varianten (besonders bei teuren A-Teilen wie Gestellkomponenten) relativ gering. Kalkulationsalgorithmen müssen daher dieser Tatsache Rechnung tragen. Kurzkalkulationen mit Hilfe neuronaler Netze sind deshalb zumindest für eine globale Kostenabschätzung nicht geeignet, da in der Regel je nach Anzahl der Eingangsgrößen und Netztyp 50 - 100 Lerndatensätze nötig sind [SCHAAL 92] und diese in dieser Anzahl nicht zur Verfügung stehen.

3.2 Zielsetzung für ein neues System

Wie schon in den vorangegangenen Kapitel näher beschrieben, sieht sich die Werkzeugmaschinenkonstruktion vor folgendem Dilemma: Sie soll einerseits Maschinenkonzepte und -entwürfe frühzeitig auf die Einhaltung der Kostenziele überprüfen, da in diesen Phasen die Kostenfestlegung am größten ist, und andererseits stehen keine effizienten Verfahren und Hilfsmittel zur Verfügung. Abbildung 3.2 zeigt

⁹ vgl. Abschnitt 2.1.2.2 Konstruktionsarten

den Ablauf der Entwicklung einer Werkzeugmaschine von der Konzeption bis hin zum Bau eines ersten Prototypen. Eine relativ exakte und zuverlässige Kalkulation ist meist erst die Vorkalkulation der Serienmaschine auf Basis der Arbeitspläne und der vom Prototyp verursachten Kosten. Die Güte der Kostenschätzungen während des Konzipierens und Entwerfens sind wie erläutert sehr stark von der Erfahrung des Konstrukteurs und des Kalkulators abhängig und meist kein klar definierter Meilenstein des Entwicklungsprozesses.

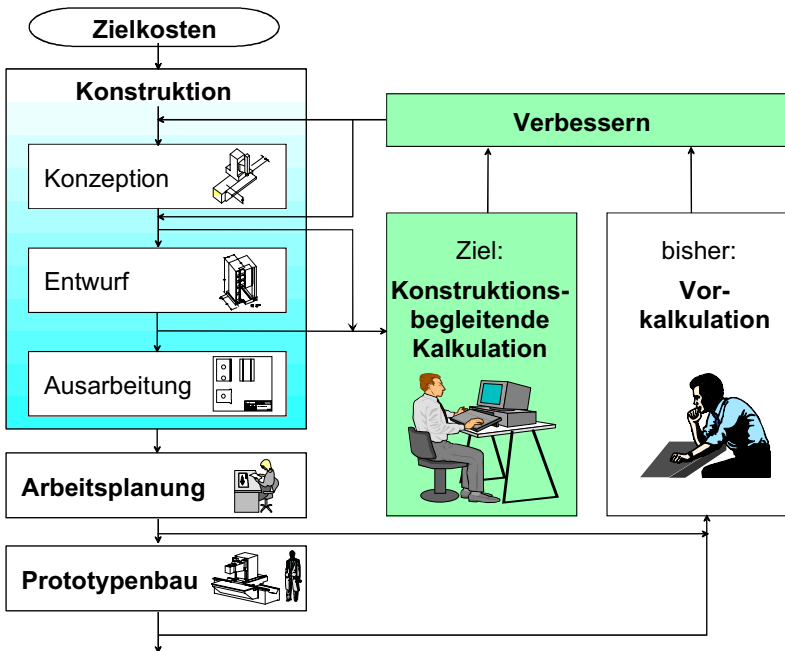


Abb. 3.2: Der Regelkreis der konstruktionsbegleitenden Kalkulation

Globales Ziel dieser Arbeit ist es ein Kosteninformationssystem vorzustellen, das es erlaubt, den Aufwand einer konstruktionsbegleitenden Kostenkalkulation zu minimieren. Das Kalkulationsprogramm soll sich dabei mit seinen gespeicherten Daten und seinem Datenfluß in die gesamte Entwicklungsumgebung einfügen. Eine rein bilaterale Integration Kalkulationstool - CAD wird nicht angestrebt.

Erreicht werden soll dies über eine Kostenbewertung durch Berechnungs- und Simulationswerkzeuge auf Basis eines integrierten Produktmodells. Den Kern bildet dabei Volumenmodell aus dem 3D-CAD. Dies erlaubt ein schnelles Abschätzen der Ziel-

3 Anforderungen und Ziele bei der rechnerintegrierten Kostenbewertung

größen aufgrund weniger aber früh zentral verfügbarer Eingabeparameter, die direkt mit dem Produktmodell verknüpft sind und bei Änderungen an der Geometrie nicht zwangsweise verloren gehen. Die definierten bzw. abgeleiteten Parameter stehen darüber hinaus allen CAx-Tools zur Verfügung, was wiederholtes Analysieren und Exportieren vermeidet und sicherstellt, daß immer mit den aktuellen Daten gerechnet wird.

Zusammenfassend sollen hier die spezifischen Anforderungen an ein Kosteninformationssystem für den Werkzeugmaschinenbau aufgeführt werden. Die Basis hierfür bildet die Darstellung der zentralen Punkte der Grundanforderungen und Defizite bereits vorhandener Kalkulationsprogramme aus den vorigen Abschnitten:

- Das Kalkulationssystem muß während der Konzept- und Entwurfsphase eine relativ genaue Kostenvorhersage mit einem Schätzfehler von max. 10-15% erlauben und deshalb auch Algorithmen, die nicht auf genaue fertigungstechnologische Featurebeschreibungen und Arbeitspläne aufbauen, verarbeiten können.
- Die zu implementierenden Verfahren müssen an die spezifischen Randbedingungen in der Werkzeugmaschinenbranche angepaßt sein. Insbesondere bei der Entwicklung von Kostenformeln kann nur von einer relativ geringen Anzahl verschiedener Varianten ausgegangen werden.
- Die eingesetzte Hard- und Software sollte sowohl dem Konstrukteur als auch dem Systembetreuer aus ihrem bisherigen DV-Umfeld vertraut sein, um so eine effiziente Bedienung und Wartung sicherzustellen.
- Eine Schnittstelle des Kalkulationssystems ist nicht nur für das CAD-System alleine anzustreben, sondern eine Integration muß in die gesamte Entwicklungsumgebung erfolgen. Nur so können kalkulationsrelevante Daten schnell in die Berechnung integriert und Ergebnisse global zur Verfügung gestellt werden.
- Ein System zur Kostenfrüherkennung sollte darüber hinaus mit unterschiedlichen 3D-CAD-Systemen arbeiten können. Gerade Hersteller von komplexen flexiblen Fertigungssystemen oder Transferstraßen sind häufig bei der Konstruktion gezwungen die CAD-Systeme ihres jeweiligen Kunden einzusetzen. Eine vollkommene Integration in ein CAD-System ist daher trotz einer Reihe von Vorteilen nicht anzustreben, denn die Verwendung weiterer CAD-Systeme hätte größtenteils eine Neuprogrammierung der Kalkulationssoftware zur Folge.

4 Das Konzept der rechnerintegrierten Konstruktion als Basis für eine Kostenbewertung

4.1 Ansatz

Ziel dieser Arbeit ist es Kalkulationsmethoden in einem Softwaresystem für die Entwicklung von Werkzeugmaschinen bereitzustellen, um so die Integration einer konstruktionsbegleitenden Kostenbewertung in den Konstruktionsprozess zu fördern. Der Entwurf eines solchen Kostenfrüherkennungssystems setzt die genaue Kenntnis der verwendeten Entwicklungsumgebung und Datenmodelle voraus. Deshalb wird in diesem Kapitel der Arbeit zunächst der Fokus der Betrachtung auf die rechnerintegrierte Konstruktion und den Randbedingungen für eine integrierte Kalkulation gelegt (vgl. Abbildung 4.1). Nur so ist später eine Integration der Kostenbewertung in den Konstruktionsprozess sinnvoll und effizient möglich [GAUSEMEIER U.A. 1995]. Unter Integration soll hier sowohl das informations-technische Verbinden verschiedener Softwareanwendungen als auch das Zusammenfügen von bis dahin isolierten betrieblichen Funktionsbereichen zu einem neuen ganzheitlichen System verstanden werden [BALGHEIM 1993].

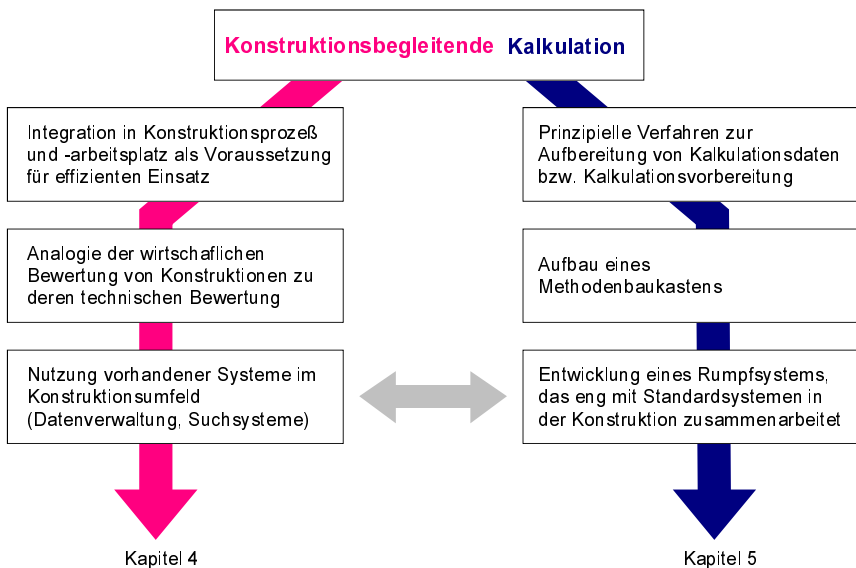


Abbildung 4.1: Konzept der konstruktionsbegleitenden Kalkulation als integrierter Bestandteil des Konstruktionsarbeitsplatzes

4 Das Konzept der rechnerintegrierten Konstruktion als Basis für eine Kostenbewertung

Grundidee des im folgenden vorgestellten Konzepts ist die wirtschaftliche Bewertung von Konstruktionen anlog der technischen Evaluierung durchzuführen. Dabei wird auf im Konstruktionsumfeld übliche Systeme bzw. den von ihnen erzeugten oder verwalteten Daten zurückgegriffen. Somit wird, im Gegensatz zu vielen Kalkulationsprogrammen, vermieden, Daten mehrfach zu generieren und zudem müssen vorhandene Implementierungen zu bestimmten Funktionalitäten nicht erneut im Kalkulationstool realisiert werden. Die Thematik einer integrierten Verwaltung von Produktdaten (Geometrie, Kosten u.v.m.), deren Austausch mit einem Kalkulationswerkzeug und Datensuchmöglichkeiten werden im folgenden näher erläutert. Die eigentlichen Verfahren für die Kostenabschätzung sowie eine detailliertere Beschreibung der Verzahnung Konstruktions- und Kalkulationssysteme werden im nächsten Kapitel gezeigt.

Den Anforderungen nach kürzeren Entwicklungszeiten, hoher Qualität und niedrigen Herstellkosten bei steigender Komplexität der Produkte steht das Problem vieler beteiligter selbständig agierender betrieblicher Funktionsbereiche gegenüber. Dabei kommen unterschiedlichste CAE-Werkzeuge und Modelle zum Einsatz. Die Produktdaten werden zudem dezentral verwaltet, was die Gefahr von überalterten und auch redundanten Daten mit sich bringt (vgl. Abbildung 4.2). Der Datenaustausch bzw. -abgleich zwischen Konstruktion und den Evaluierungsabteilungen (Vorkalkulation, Strukturberechnung etc.) erfolgt nur zu wenigen Zeitpunkten. Allein bis zu 50% der Arbeitszeit eines Konstrukteurs entfallen beim konventionellen Konstruieren auf Informationsbeschaffung und Aufbereitung [KRAUSE & SCHLINGHEIDER 1991].

Eine alleinige Integration eines Kalkulationssystems in den Konstruktionsprozeß und -arbeitsplatz würde daher nur geringe Vorteile bringen. Vielmehr muß versucht werden über eine integrierte Produktentwicklung jederzeit einen Wechsel zwischen allen Synthese- und Analysetätigkeiten zu ermöglichen [VAJNA 1997]. Dabei sollen dem Konstrukteur während der Produktgestaltung integrierte Softwarehilfsmittel zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung eine fachübergreifende Produkt-evaluierung ermöglichen.

Um eine Umsetzung dieses Ziels zu ermöglichen, wurde eine zentrales Datenmodell aufgebaut, dessen Kern die 3D-Geometrie aus dem CAD-System bildet. Zudem werden die verschiedenen Partialmodelle für die verschiedenen Berechnungs- und Simulationsverfahren abgebildet. Eine solches integriertes Produktmodell erlaubt jederzeit den Zugriff auf die aktuell gültigen Daten und ein vielfaches Speichern der Information ist damit überflüssig geworden ist.

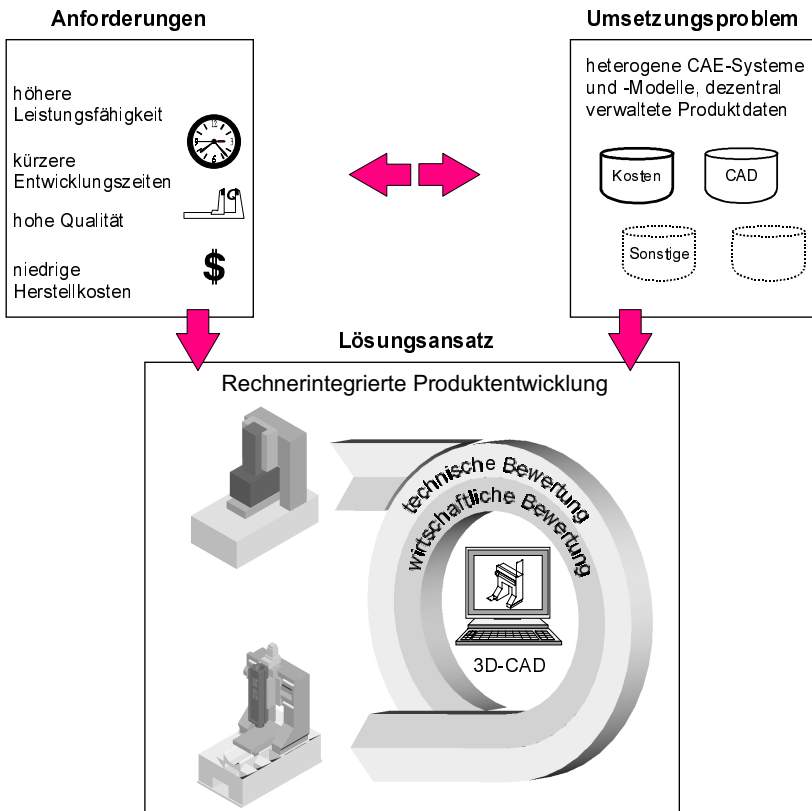


Abbildung 4.2: Rechnerintegrierte Produktentwicklung

Abbildung 4.3 zeigt den Synthese-Analyse-Regelkreis bei der Kostenfrüherkennung der analog dem Regelkreis für die technische Eigenschaftsfrüherkennung in den Konstruktionsprozeß integriert ist. Für viele Berechnungs- und Simulationssysteme (Kinematiksimulation, FEM, MKS usw.) wie auch für die Kostenabschätzung ist die Produktgeometrie zentraler Ausgangspunkt. Aufgrund der in der Werkzeugmaschinenindustrie geringen Verbreitung von 3D-CAD wird heute die Geometrie in den jeweiligen Analysetools jedoch erneut aufgebaut bzw. in Form von Parametern eingegeben.. Um diesen langwierigen und unnötigen Vorgang zu vermeiden, wird in dieser Arbeit ein 3D-CAD-Modell den Kern eines integrierten Produktmodells bilden. Aus diesem Teilmodell lassen sich Grundinformationen zur Geometrie (Volumen, Masse, Oberflächeninhalte usw.) und zur Baugruppenstruktur ableiten. Weitere z.B.

4 Das Konzept der rechnerintegrierten Konstruktion als Basis für eine Kostenbewertung

bei den Analysewerkzeugen erzeugte Informationen, wie Eingabedatensätze oder Berechnungsergebnisse, werden dem jeweiligen Partialmodell des integrierten Produktmodells hinzugefügt.

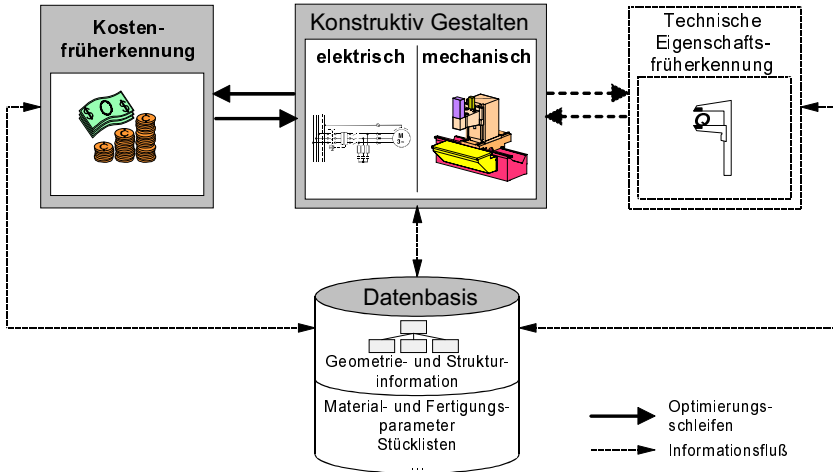


Abbildung 4.3: Integriertes Produktmodell in der Werkzeugmaschinenentwicklung

Für den Aufbau und die zentrale Verwaltung des Produktmodells und seiner Partialmodelle ist ein Datenmanagementsystem notwendig, das im wesentlichen folgende Grundaufgaben zu bewältigen hat:

- Aus- und Einchecken von Produktdaten, d.h. Speichern und erneutes Bereitstellen von Dateien.
- Management der Produktstruktur, mit der die Beziehungen zwischen Teilen und Baugruppen beschrieben werden. Durch diese Beschreibung wird auch das Erstellen von Stücklisten und Teileverwendungsnachweisen ermöglicht.
- Versions- und Konfigurationsmanagement zur Verwaltung aller bisher erzeugten Versionen einer Komponente und zur Rekonstruktion früherer Produktkonfigurationen („Konstruktionsgeschichte“).

- Klassifizierung von Produktdaten und Dokumenten; hier werden z.B. Produktkomponenten oder bestimmte Dokumente ihren unternehmensspezifisch vordefinierten Klassen zugewiesen und mit den entsprechenden zugehörigen Attributen beschrieben (vgl. Abschnitt 4.3).
- Suchen und Selektieren von Produktkomponenten nach vom Benutzer vorgegebenen Kriterien.

Die oben beschriebenen Aufgaben können in der Regel von EDM/PDM-Systemen (Engineering Data Management/Product Data Management Systems) ausgeführt werden [BRANDNER 1996]. Abbildung 4.4 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Kostenfrüherkennungssystems in einem integrierten Konstruktionsarbeitsplatzes unter Einbeziehung eines EDM-Systems.

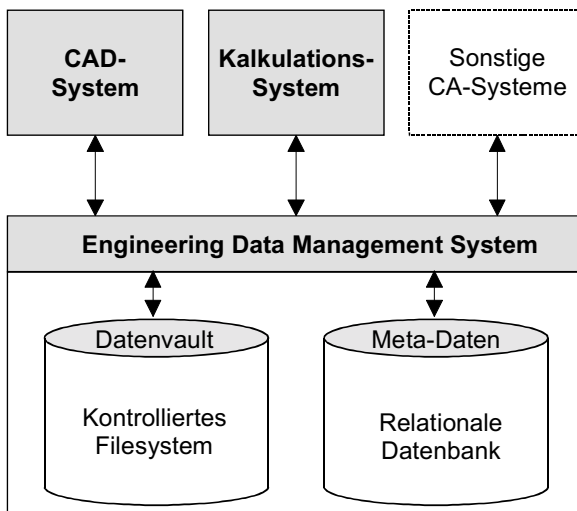


Abb. 4.4: Engineering Data Management System als Hilfsmittel zum Aufbau eines integrierten Produktmodells für die Kostenabschätzung

Alle von den integrierten CAx-Tools erzeugten Daten(files) werden an das EDM-System übergeben und von hier ab auch von ihm kontrolliert. Der Zugriff ist nur noch über dieses System möglich. Dateien werden in einem sogenannten Daten-Vault, einem nur vom EDM kontrollierten Filesystem, abgelegt. Einträge über die Produktstruktur, Klassenzugehörigkeit, Stammdaten, Versionsnummer usw., also die sogenannten Meta-Daten, werden gesondert in einer relationalen Datenbank verwaltet. Während beim Einsatz eines EDM-Systems innerhalb eines Standorts die Daten des zentralen Produktmodells in der Regel auch physikalisch zentral gespeichert werden,

4 Das Konzept der rechnerintegrierten Konstruktion als Basis für eine Kostenbewertung

ist beim standortübergreifenden Einsatz aus Performancegründen ebenso ein verteilter Datenspeicherbereich möglich. In diesem Fall wird über die Meta-Daten der Filestatus (z.B. „wird bearbeitet“, „keine Änderungsberechtigung“) vermerkt und unzulässige Datenoperationen in den Teilsystemen können so vermieden werden.

Mit der vorgestellten Technik können Informationen zwar logisch zentral gespeichert werden und es wird jederzeit der Zugriff auf alle aktuellen Produktdaten sichergestellt, aber die Problematik des Austauschs von Information (z.B. Attributwerte aus den Meta-Daten des EDM oder Geometrieinformation aus dem CAD) zwischen den einzelnen CAE-Tools mit dem EDM-System ist noch nicht gelöst.

Während kommerzielle CA-Systeme, wie z.B. FEM- oder MKS-Systeme, auf die jeweiligen proprietären Datenbasen der beteiligten Programme zurückgreifen und lediglich die Verwaltung der Ergebnisdateien im Datenvault des EDM erfolgt, soll hier aus Gründen der Flexibilität ein anderer Ansatz verfolgt werden. Kostenkalkulationsprogramme, aber auch einfache Programme zur Auslegung von Maschinenelementen, benötigen relativ einfache Geometrieinformationen aus dem CAD. Wollte man nun für jedes dieser Systeme eine eigene Ankopplung schaffen, so bedeutet dies wiederholten Aufwand bei Schnittstellendefinition und programmtechnischer Umsetzung für jedes der unterschiedlichen proprietären Datenformate. Deshalb sollen unzählige selbstdefinierte Schnittstellenformate bzw. -files vermieden werden und der Austausch beispielsweise von Geometrieinformation in einem neutralen Datenformat durchgeführt werden. Es wird also eine neutrale Zwischenschicht zwischen CAX-Tool und Datenbank aufgebaut und die Kommunikation erfolgt nur über diese Zwischenschicht. Für den Austausch von Geometrieinformation sehen die meisten CAD-Systeme eine Reihe von Standardformaten wie IGES, VDAFS oder auch STEP vor. Die meisten Formate sind als reine Geometrieaustauschformate konzipiert und können deshalb keine zusätzlichen an Geometrie gebundene Information übertragen (IGES; VDAFS). Lediglich STEP sieht über unterschiedliche *Applikationsprotokolle* (APs) auch den Austausch zusätzlicher Produktinformation (z.B. Strukturinformation) vor [GRABOWSKI U.A. 1993]. Allerdings stehen bisher überwiegend nur STEP-Prozessoren für AP 203 und AP 204 zur Verfügung, mit denen sich nur reine 2D- und 3D-Geometrien übertragen lassen. AP 214 in einer *Conformance Class* (CC), die auch für diese Arbeit wichtigen *Units of Functionality* (UoFs) PR1 (Item Property) und PR2 (Material Property) unterstützt, steht meist noch nicht zur Verfügung. Deshalb wurde in dieser Arbeit ein einfaches selbstdefiniertes Format für den Austausch von CAD-Grundinformation mit Berechnungsprogrammen definiert und verwendet. Solche Programme können Werkzeuge zur Kostenkalkulation aber auch Tools zur Auslegung

von Maschinenelementen sein. Zukünftig muß die Aufgabe des Datenaustausches von einer Standardschnittstelle wie STEP AP 214 übernommen werden. Die unterschiedlichen Datentypen, die im rechnerintegrierten Konstruktionsarbeitsplatz verwaltet werden müssen und insbesondere bei der Kostenkalkulation eine wichtige Rolle spielen, werden in Abschnitt 4.2 genauer vorgestellt.

Sowohl für die eigentliche gestalterische Tätigkeit beim Konstruieren als auch für die anschließende Kostenabschätzung sind die Ergebnisse vorangegangener Konstruktionen besonders wichtig. Deshalb soll auch auf die Klassifizierung der Bauteile, die Wiederholteilsuche mittels EDM und die Übergabe der Ergebnisse an das jeweilige CAx-Tool in Abschnitt 4.3 näher eingegangen werden.

4.2 Informationsarten / Datentypen

In der Beschreibung des Lösungsansatzes zum Aufbau eines integrierten Produktmodells wurde schon eine grobe Einteilung der zu verwaltenden Informationen bzw. Daten vorgenommen. Die im Hinblick auf ein EDM/PDM-System naturgemäß vorgenommene systemorientierte Einteilung in Dateien und in Meta-Daten soll in diesem Abschnitt durch eine Einordnung in Bezug auf den Auftrag bzw. das Produkt ergänzt werden, um so für das Verständnis der Kostenkalkulation zu einer sinnvolleren Einteilung zu gelangen.

Grundsätzlich wird dabei produktabhängige und -unabhängige Information unterschieden (vgl. Abb. 4.5). Daten, die direkt mit dem Produkt verknüpft sind, können zum einen geometrieunabhängig sein, wie z.B. Stammdaten (Identifikationsnummern oder Bearbeiter, falls es sich um Eigenkonstruktionen handelt), oder aber geometrieabhängig. Letztere werden dabei entweder direkt durch die Gestalt des Produktes bestimmt und können in der Regel nur über die Variation der Gestalt verändert werden (Volumen, Oberflächeninhalte) oder aber es handelt sich um Informationen, die zwar nur im Zusammenhang mit Geometrie sinnvoll sind, aber vom Konstrukteur direkt eingegeben und anschließend mit der Geometrie verknüpft werden. Dies sind beispielsweise Materialangaben, Rauheits- und Toleranzanforderungen oder aber auch Schweißnahtparameter.

4 Das Konzept der rechnerintegrierten Konstruktion als Basis für eine Kostenbewertung

Einteilung der vom EDM zu verwaltenden Daten				
produktabhängig			produktneutral	
geometrieunabhängig	geometrieabhängig		reine Information	Methodenwissen
	durch Geometrie direkt ableitbar	mit Geometrie verknüpft		
Stammdaten (Nummer, Bearbeiter, Datum)	Volumen, Oberfläche, Hauptabmessungen	Material, Rauheitswerte	Kostensätze (Platzkosten, Gemeinkostenzuschlag) Verfahrensparameter (Vorschubgeschwindigkeit beim Schruppen)	Kostenfunktionen (Herstellkosten = f(Führungsbahnlänge))
Beispiele				

Abbildung: 4.5: Einteilung der vom EDM verwalteten Daten

Entsprechend der Gliederung technischer Gebilde nach der Komplexität der Konstruktionselemente wird die Information auch auf der jeweiligen Komplexitätsstufe mit der Geometrie verknüpft. In Anlehnung an KOLLER (1994) zeigt Abb. 4.6 die Strukturierung von Werkzeugmaschinen, die die Grundlage für diese Arbeit bildet. Die Werkzeugmaschine wird dabei in Baugruppen, Einzelteile, Features, Flächen bis hin zu Kanten hierarchisch gegliedert. Parameter, die die Geometrie näher beschreiben sollen und aus der Geometrie selbst nicht oder nur schwer zu erkennen sind, werden auf der jeweiligen Komplexitätsstufe hinzugefügt. So werden zum Beispiel die Verknüpfung von Materialangaben auf Bauteilebene, die Definition von Rauheitswerten auf Flächenebene und die Angabe von Schweißparametern auf Kantenebene durchgeführt. Bei einer späteren Auswertung dieses Modells sind somit die Angaben sofort dem richtigen Konstruktionselement zugeordnet und können dementsprechend richtig interpretiert werden.

Für die Kalkulation von neuen Werkzeugmaschinen sind die Produktinformationen allein nicht ausreichend. Deshalb müssen auch produktunabhängige Informationen im EDM mit verwaltet werden bzw. über das EDM zugänglich sein (vgl. Abb. 4.5). Dazu gehören zum einen einfache Daten wie z.B. durchschnittliche Vorschubgeschwindigkeiten, Platzkosten- oder Gemeinkostenzuschlässe und zum anderen Methodenwissen. Abgelegte Methoden können Berechnungsformeln oder Algorithmen zur Kalkulation der Herstellkosten in Abhängigkeit vom Konstruktionsfortschritt sein. Viele dieser Daten und Methoden sind nicht vollständig produktunabhängig, sondern gelten häufig nur für bestimmte Klassen von Produkten oder Features. Da sie aber nicht auf ein konkretes Produkt allein bezogen sind, werden sie hier als produktunabhängig bezeichnet.

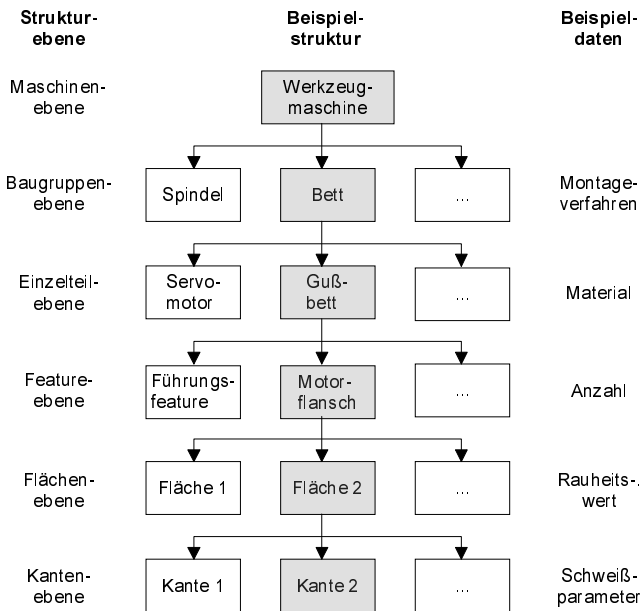


Abbildung: 4.6: Einteilung der mit Geometrie verknüpften Daten

Weiterhin sei an dieser Stelle noch angemerkt, daß bei der konstruktionsbegleitenden Kalkulation auch auf Daten der Fertigung oder der betrieblichen Kostenrechnung (z.B. Maschinenstundensätze, Gemeinkostenzuschläge etc.) zurückgegriffen werden muß. Diese Informationen werden heute noch üblicherweise in einem getrennten produktionsbezogenen Managementsystem, wie z.B. einem PPS- oder einem *Enterprise Resource Planning System* (ERP) verwaltet. Bei einem gleichzeitigen Einsatz von EDM/PDM und PPS/ERP ist daher auf Datenkonsistenz zu achten und ein genaues Konzept zur Verwaltung der jeweiligen Masterdaten auszuarbeiten [REINHART U.A. 1998]. Denkbar wäre die zentrale Verwaltung dieser Daten im PPS und die erneute Ablage einer Kopie der wichtigsten Daten im EDM-System. Hier werden allerdings Redundanzen in Kauf genommen und die Aktualisierung der Daten muß entweder von Hand oder durch eine zusätzliche Software durchgeführt werden. Eine weitere, aber auch deutlich komplexere Lösung, wäre der Zugriff auf die in der PPS-Datenbank abgelegten Daten direkt über das EDM-System. Im EDM müßten nur noch Querverweise auf die relevanten Daten abgelegt sein.

4.3 Wiederholteilsuche

Bei der Verwendung vieler einzelner Konstruktionshilfsmittel werden in der Regel die Daten von den jeweiligen Mitarbeitern dezentral und oftmals auch unorganisiert gespeichert. Ein Auffinden der Daten ist somit den anderen Mitarbeitern nur sehr schwer möglich. Durch die Einführung eines integrierten Produktmodells werden einmal erzeugte Daten zentral verwaltet und sind somit jedem Berechtigten prinzipiell zugänglich, aber durch die Menge an Daten ist ein Wiederfinden immer noch schwierig.

Die im EDM-System abzuspeichernden Daten müssen deshalb mittels geeigneter Methoden beschrieben werden, um später über Datenbankabfragen die gewünschten Objekte herauszufiltern und so Konstruktions- und Kalkulationsdaten von Vorgängerversionen beispielsweise für die Konstruktion einer Variante heranziehen zu können.

Dabei werden im wesentlichen drei Objektbeschreibungsmethoden herangezogen. Dies sind die:

Klassenbildung

Eine Klasse wird durch eine Anzahl für sie typischer Merkmale beschrieben. Jedes Objekt einer Datenmenge wird entsprechend der vorher festgelegten Kriterien einer der Klassen zugewiesen und mit dem entsprechenden Klassenschlüssel versehen. Das Durchsuchen der Datenmenge nach Ähnlichkeiten kann somit auf eine Untergruppe (Klasse) eingeschränkt werden. Bei der Strukturierung der Objekte mit Hilfe des Klassifizierens ist es auch möglich, Klassen ihrerseits wieder in Unterklassen zu unterteilen und so bei einer Ähnlichkeitsuche den Lösungsraum weiter einzuschränken. Als Beispiel für ein Klassifizierungssystem sei der ergebnisunabhängige Formenschlüssel von OPITZ (1966) erwähnt.

Sachmerkmale

Die Weiterentwicklung der Rechnertechnik erlaubte eine unverschlüsselte und damit eine Objektbeschreibung ohne Informationsverlust mit Hilfe von vorher festgelegten Sachmerkmalen (Attributen). Eine Einschränkung der Lösungsmenge bei der Suche von Ähnlichkeiten erfolgt über beliebig formulierbare Suchanfragen.

Deskriptoren

Deskriptoren oder Schlagworte helfen ein Objekt zu beschreiben, ohne daß das starre System von Sachmerkmaleisten eingehalten werden muß. Jedes Objekt wird durch eine variable Anzahl von Attributen umschrieben. Durch die Auswahl eines oder mehrerer Deskriptoren läßt sich somit eine Suchanfrage formulieren und der Lösungsraum einschränken.

KRÖNERT (1997) hat in seiner Arbeit die Vor- und Nachteile der einzelnen Beschreibungsmethoden untersucht und in einer Tabelle die wichtigsten Argumente zusammengefaßt (vgl. Abb. 4.7).

Anforderungen an die Objektbeschreibung	Klassifizierung	Sachmerkmal	Deskriptor
Hoher Detaillierungsgrad	-	○	+
Hohe Flexibilität und Anpassungsfähigkeit	-	○	+
Abbildung kontinuierlicher Merkmale	-	+	-
Abbildung diskreter Merkmale	+	+	+
Einheitlichkeit / Eindeutigkeit der Beschreibung	+	+	-
Strukturierung / Homogenisierung der Objektmenge	+	-	-

Abbildung 4.7: Gegenüberstellung von Methoden zur Objektbeschreibung
[KRÖNERT 1997]

Er kommt dabei zu dem Schluß, daß jede der Beschreibungsmethode unterschiedliche Stärken und Schwächen aufweist. Eine Kombination aller drei Verfahren kann jedoch helfen die jeweiligen Schwächen der einen Methodik durch die Stärken der anderen auszugleichen (vgl. Abbildung 4.8). So eignet sich in einem ersten Schritt die Klassifikation für eine Strukturierung der Datenmenge und damit für eine erste Einstufung der jeweiligen Objekte. Auf der zweiten Ebene der Objektbeschreibung werden mittels vordefinierter klassenspezifischer Sachmerkmale die Objekte

4 Das Konzept der rechnerintegrierten Konstruktion als Basis für eine Kostenbewertung

detaillierter beschrieben und damit später selektive Suchanfragen ermöglicht. Als Sachmerkmale werden vor allem kontinuierliche Merkmale (z.B. Abmessungen, Masse) definiert. In einer letzten Ebene sind über Deskriptoren zusätzliche fallspezifische Differenzierungen möglich. In der Praxis sind diese Schlagwörter in der Regel allerdings nicht ganz frei wählbar, sondern werden in einer Auswahlliste vorgegeben.

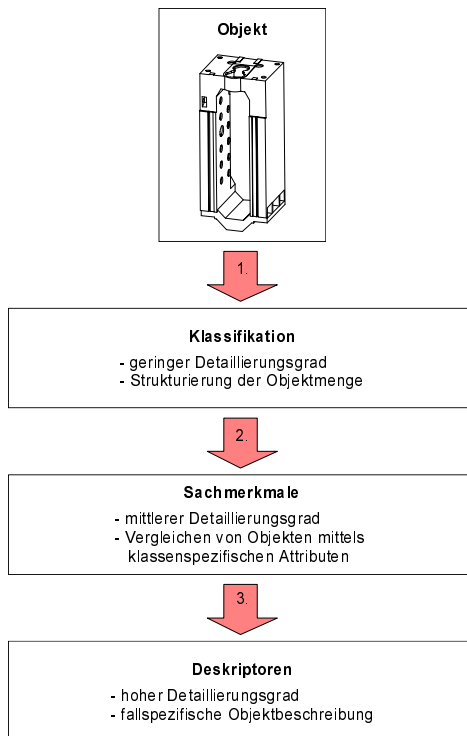


Abbildung 4.8: Die 3 Ebenen der Objektbeschreibung nach KRÖNERT (1997)

In dieser Arbeit soll für den Werkzeugmaschinenkonstruktionsarbeitsplatz auf das von KRÖNERT vorgeschlagene Beschreibungsmodell zurückgegriffen werden. Objekte in der Werkzeugmaschinenentwicklung werden über Klassen, Sachmerkmale und Deskriptoren beschrieben und in einem EDM-System als Meta-Daten verwaltet. Mit

Hilfe des integrierten Suchmoduls lassen sich Datenbankabfragen formulieren und Ähnlichteile auffinden. Dies ist sowohl für die Suche von Ausgangsmodellen für Varianten- und Anpaßkonstruktionen möglich, als auch zum Auffinden von Vergleichsdaten z.B. für die konstruktionsbegleitende Kalkulation. Im letzten Fall wird das Suchmodul direkt von der Kalkulationssoftware aufgerufen und die Ergebnisse an die aufrufende Applikation zur Weiterverarbeitung übergeben. Dabei ist es nicht nur denkbar nach reinen objektbeschreibenden Informationen zu fragen, sondern z.B. auch nach klassenspezifischen Methoden zur Kostenkalkulation. Die Kalkulationssoftware hat in diesem Fall nicht alle Kalkulationsalgorithmen fest in den Programmcode integriert, sondern lädt bei Bedarf die für die jeweilige Klasse spezifischen Berechnungsvorschriften nach. Dieser Programmaufbau garantiert eine einfache Wartbarkeit.

Abbildung 4.9 zeigt am Beispiel des Ständers eines Horizontalbearbeitungszentrums die Beschreibung eines Objektes mittels des vorgeschlagenen Verfahrens. So werden in diesem einfachen Beispiel drei Hauptklassen (Komponenten, Dokumente und Projektpläne) definiert. Die Klasse Komponenten teilt sich in mehrere Unterklassen auf, die sich wiederum in weitere Unterklassen aufgliedern. Die Sachmerkmale sind dabei spezifisch für jede Klasse definiert, so daß beispielsweise ein Attribut „Drehmoment“ nur bei der Klasse „Hauptantrieb“ verlangt wird, nicht aber in „Ständer“. Weiterhin werden Attribute von den Klassen auf ihre jeweiligen Unterklassen vererbt. Dies bedeutet, daß ein Attribut „ID-Nummer“ das in der Klasse „Komponente“ definiert worden ist, automatisch auch in der Unterklasse „Ständer“ verfügbar ist.

4 Das Konzept der rechnerintegrierten Konstruktion als Basis für eine Kostenbewertung

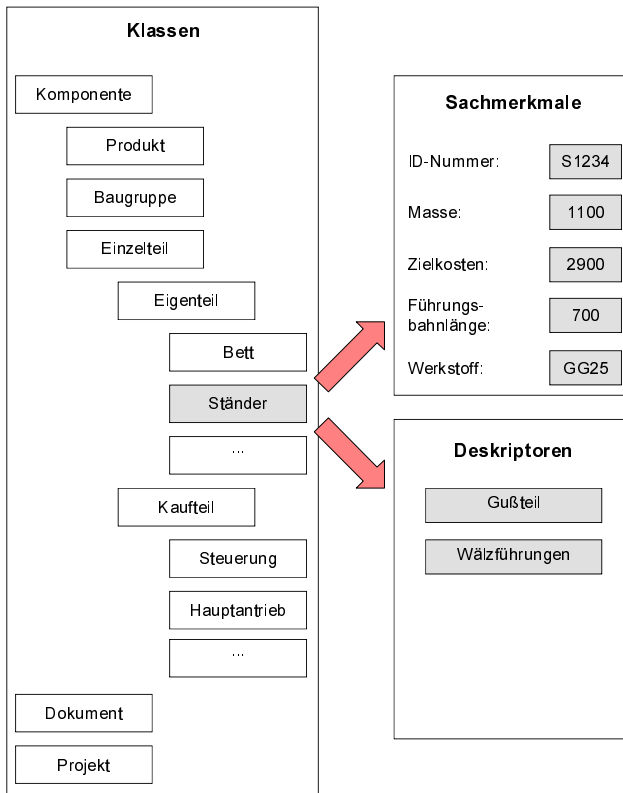


Abbildung 4.9: Beispiel für die Objektbeschreibung bei Werkzeugmaschinen

4.4 Zusammenfassung

Eine wichtige Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz eines Kalkulationswerkzeugs in der Konstruktion ist die organisatorische und technische Integration in den Entwicklungsprozeß. Erreicht werden soll dies mit einem zentral verwalteten Produktmodell. Diese Aufgabe übernimmt ein EDM/PDM-System. Alle im Rahmen eines Entwicklungsprojekts entstehenden Daten werden hiermit verwaltet und als Meta-Daten in einer relationalen Datenbank oder als Dateien im Datenvault des PDM gespeichert. Der Zugriff, sowohl von Konstrukteur, als auch von den beteiligten CAE-Tools, wird über dieses System geregelt und hilft so ein redundanzarmes Produkt-

modell aufzubauen und die aktuelle Information allen Projektbeteiligten zur Verfügung zu stellen.

Um Daten für anschließende Berechnungen mit dem richtigen Bezug bereitstellen zu können wird eine Einteilung vorgeschlagen, die sich an den Kriterien produktabhängig, geometrieabhängig und Fakten bzw. Methodenwissen orientiert. Mit dieser Einteilung können auswertende Systeme, wie z.B. ein Kalkulationsprogramm, die Daten richtig zuordnen und interpretieren.

Speziell für die Abschätzung der Kaufteile wird überwiegend auf Einkaufspreise in früheren Projekten zurückgegriffen. Dafür sind Suchalgorithmen notwendig, die anhand verschiedener Kriterien die gewünschte Information bereitstellen. Voraussetzung ist eine effiziente Objektbeschreibung. In diese Arbeit wird auf die von KRÖNERT (1997) vorgeschlagene Kombination von Klassenbildung, Sachmerkmalen und Deskriptoren zurückgegriffen, um so eine Vereinigung der Vorteile aller drei Beschreibungsmethoden zu erzielen.

5 Konstruktionsbegleitende Kostenabschätzung von Werkzeugmaschinen

5.1 Prinzipielles Vorgehen

Die konstruktionsbegleitende Kalkulation steht im allgemeinen vor dem Problem, daß die klassischen Methoden der Kostenrechnung in den frühen Phasen der Entwicklung aufgrund fehlender Daten nicht einsetzbar sind. Für die Kostenabschätzung in dieser Phase müssen deshalb Verfahren eingesetzt werden, die bereits mit den wenigen verfügbaren Daten Berechnungen durchführen können oder aber sich die fehlenden Informationen automatisch generieren können. Konkret bedeutet dies den Verzicht auf detaillierte Geometrieinformation oder auf genaue Zeitangaben aus Arbeitsplänen und NC-Programmen.

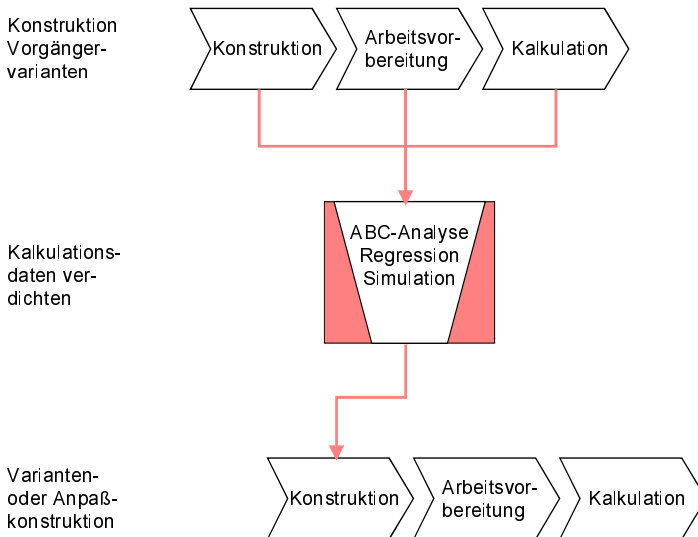


Abbildung 5.1: Verdichten von Kalkulationsdaten für die Kostenfrüherkennung

Vor dem Hintergrund, daß im Werkzeugmaschinenbau die Varianten- und Anpaßkonstruktion die vorherrschenden Konstruktionsarten sind¹⁰, werden in dieser Arbeit Verfahren eingesetzt, die Erfahrungswissen aus früheren Konstruktionen und Planungsdaten so verdichten und vereinfachen können, daß sie mit den in der

¹⁰ vgl. Abschnitt 2.1.2.2

5.2 Eingesetzte Verfahren zur Kalkulation und Kalkulationsunterstützung

jeweiligen Konstruktionsphase zur Verfügung stehenden Daten auskommen können und somit eine frühzeitige Kostenkalkulation ermöglichen (vgl. Abb. 5.1).

Eingesetzt werden dabei Verfahren wie die multiple Regressionsrechnung, die Formeln für die Kurzkalkulation zur Verfügung stellt, oder Simulationen, die Planungen vollautomatisch in kurzer Zeit durchführen können (NC-Simulation). Darüber hinaus werden - sofern mit vertretbarem Aufwand möglich - auch Formeln und Algorithmen analytisch hergeleitet oder durch die Ankoppelung an ein Informationsmanagementsystem (EDM) von der Suche nach Ähnlich- und Gleichteilen Gebrauch gemacht und Kostenwerte direkt aus der Datenbank übernommen.

Werkzeugmaschinen bestehen in der Regel aus mehreren hundert Teilen und wollte man für jedes dieser Teile Kostenfunktionen entwickeln, so würde dies einen nicht zu vertretenden Aufwand bedeuten. Die Entwicklung solcher Kalkulationsformeln muß daher auf wichtige, d.h. kostentreibende Komponenten beschränkt bleiben. Aus diesem Grund müssen die für die jeweiligen Maschinentypen stark kostenverursachenden Bauteile identifiziert werden. Als Hilfsmittel dient hierfür die ABC-Analyse.

Im nächsten Abschnitt werden die Prinzipien, Möglichkeiten und Einschränkungen der verwendeten Verfahren zu Datenverdichtung bzw. -ermittlung vorgestellt. Dies sind

- die ABC-Analyse,
- die Regressionsrechnung (einfach und multiple, linear und nicht-linear),
- und die NC-Simulation.

Das Gesamtkonzept für das integrierte Softwaretool zur konstruktionsbegleitenden Kalkulation ergibt sich aus der Anwendung einer Kombination der vorgestellten Methoden.

5.2 Eingesetzte Verfahren zur Kalkulation und Kalkulationsunterstützung

5.2.1 ABC-Analyse

Für die folgenden Analysen von Werkzeugmaschinen müssen Schwerpunkte der Betrachtungen gefunden werden, die im Verhältnis zu ihrem Erhebungsaufwand eine hohe Kostenverursachung aufweisen. Um Prioritäten zu bilden und Schwerpunkte zu

5 Konstruktionsbegleitende Kostenabschätzung von Werkzeugmaschinen

finden, hat sich als ein gängiges Mittel die sog. *ABC-Analyse* oder auch *Pareto-Analyse* bewährt.

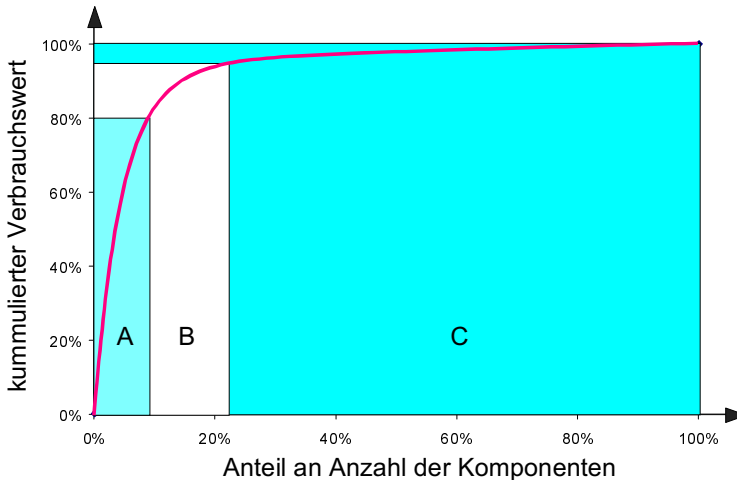


Abbildung 5.2: ABC-Analyse zur Teileklassifizierung hinsichtlich ihrer Kosten

Als Analysemethode für große Datenmengen ist sie die Weiterentwicklung eines Histogramms, bei dem Häufigkeiten durch Klassenbildungen visualisiert werden. Im Unterschied zum Histogramm werden die Häufigkeiten oder prozentuale Anteile zusätzlich noch geordnet, und zwar mit nach rechts abnehmenden Werten. Die Darstellungsweise hat viele Varianten [MONTGOMERY 1991; GUTMAN 1985] und ermöglicht meist eine Identifizierung von wenigen Parametern oder Objekten, die den überwiegenden Einfluß und Anteil an der Gesamtheit haben. So ergaben Untersuchungen, daß weniger als 10% der Teile einer Werkzeugmaschine 80% des Gesamtwertes verantworten können, während über 90% aller Teile als B- oder C-Teile nur 20% des Gesamtwertes darstellen [ROMANOW 1995; MEINLSCHMIDT & SPRENZEL 1998] (vgl. Abb. 5.2). Dieses Verhalten muß sich nicht generell einstellen, aber in der Praxis wird dieses Verhalten sehr häufig in den unterschiedlichsten Bereichen beobachtet und deshalb wird diese Analysemethode z.B. auch in starkem Umfang in der Qualitätssteuerung eingesetzt [WARNECKE 1993; WIENDAHL 1989].

Die ABC-Analyse erlaubt somit eine Klassifizierung beliebiger Objekte nach den unterschiedlichsten Gesichtspunkten. Angewandt im Hinblick auf die verursachten Kosten erlaubt sie die Identifikation von Kostentreibern und bietet somit Ansatzpunkte

für eine Kostenüberwachung bereits in den frühen Konstruktionsphasen. Der Anteil an A-Komponenten an der Gesamtheit des Produktes kann je nach Typ und Einteilung in A-, B- und C-Teile variieren, doch zeigt sich in der Regel, daß 8-15% aller Teile 80% der Kosten verursachen.

5.2.2 Regressionsrechnung

5.2.2.1 Prinzip der Regression

Die Regressionsrechnung dient zur Beschreibung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen verschiedenen Merkmalen innerhalb einer Menge von Meßdaten. Sie hat sich daher zu einem der flexibelsten und häufig verwendeten Analyseverfahren entwickelt. Sie wird immer dann eingesetzt, wenn eine große Datenmenge funktional repräsentiert und für die Prognose zukünftiger Werte verwendet werden soll und gleichzeitig eine analytische Herleitung dieses funktionalen Zusammenhangs nicht oder nur sehr schwer möglich ist.

Grundannahme der Regressionsrechnung ist es, daß die Meßgröße Y , welche auch als *abhängige Variable*, *Zielgröße* oder *Regressand* bezeichnet wird, von verschiedenen weiteren Größen X_j , den *unabhängigen Variablen* oder *Regressoren*, abhängt. Im einfachsten Fall wird untersucht, ob sich Y linear in Abhängigkeit von nur einer unabhängigen Variablen X verändert [HALLER-WEDEL 1973]. Man spricht in diesem Fall von einer linearen Regression mit einer unabhängigen Variablen. Dieses einfache Regressionsmodell kann als Grundlage für die multiple lineare Regression angesehen werden, bei der die Zielgröße von mehreren von einander unabhängigen Regressoren abhängig ist.

Voraussetzung für die Anwendung der Regressionsrechnung ist, daß die unabhängigen Variablen kardinal oder metrisch¹¹ skaliert sind. Liegen die Ausprägungen der untersuchten Merkmale in einer Nominalskala¹² oder in einer Ordinal- oder

¹¹ Die Ausprägungen eines Merkmals können nicht nur in eine Rangordnung gebracht werden, sondern auch im Unterschied quantifiziert werden (z.B. Länge 1 = 2m, Länge 2 = 3m usw.).

¹² die zugeordneten Zahlen haben keine Bezeichnungsfunktion (z.B. „Merkmal 1“, „Merkmal 2“ usw.) und können jederzeit in willkürlich andere Zahlen/Begriffe transformiert werden.

5 Konstruktionsbegleitende Kostenabschätzung von Werkzeugmaschinen

Rangskala¹³ vor, so kann die Regressionsrechnung nicht angewandt werden [BAMBERG & BAUER 1989].

Bei der Datenanalyse mit Hilfe der Regressionsrechnung steht die Frage im Vordergrund, welche Regressoren die Zielgröße Y beeinflussen. Es wird hierbei betrachtet, inwiefern die Variable Y in Beziehung zu gewissen Teilen eines hypothetischen Modells steht. Hierbei wird eine eindeutige Richtung des Zusammenhangs unter den Variablen unterstellt, die keinesfalls umkehrbar ist. Im allgemeinen werden sogenannte Je-Desto-Beziehungen untersucht, wie beispielsweise je schwerer die Maschine desto höher die Kosten [SACHS 1984].

Für die Datenprognose besteht die Absicht, eine möglichst gut passende Kurve durch die Gesamtheit der Datenpunkte zu legen, um anschließend mit der dabei gewonnenen Regressionsfunktion für die neuen Werte der unabhängigen Variablen, die Werte von \hat{Y} möglichst genau vorherzusagen (vgl. Abb. 5.3).

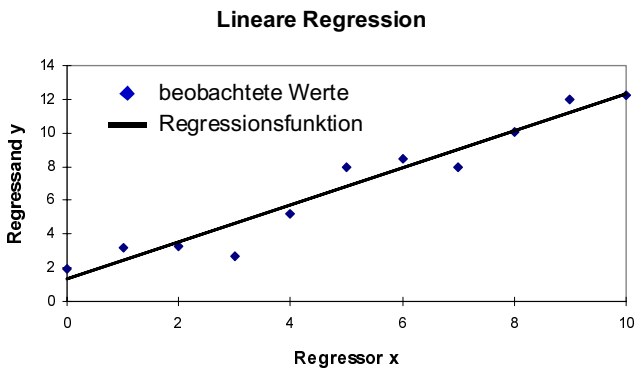


Abbildung 5.3: *Einfache lineare Regression*

Eine ausführlichere Beschreibung der Regressionsrechnung (linear und nicht linear) befindet sich im Anhang 10.3. Dabei wird auch auf Möglichkeiten zur Überprüfung der Güte einer Regressionskurve näher eingegangen.

¹³ die Merkmalsausprägungen können nicht nur unterschieden, sondern auch in eine Rangfolge gebracht werden (z.B. größtes Merkmal, zweitgrößtes Merkmal usw.); sie erlauben im Gegensatz zur Kardinalskala keine Aussage über das Ausmaß zweier unterschiedlicher Merkmalsausprägungen.

5.2.2.2 Vorgehen bei der Regression

Für das Aufstellen von Kostenfunktionen mittels Regressionsrechnung sind folgende Schritte durchzuführen:

In einer Analyse von Nachkalkulationen sind die zu untersuchenden Objekte zu bestimmen. Dies kann mit Hilfe der bereits vorgestellten ABC-Analyse erfolgen. Zu den ermittelten Komponenten sind die Zielgrößen (hier: Kosten) zu ermitteln.

In einem nächsten Schritt müssen die kostentreibenden Einflußgrößen ermittelt werden. Hier bieten sich wiederum mehrere Möglichkeiten an. Bei völliger Unkenntnis der Kostenzusammenhänge im zu betrachtenden System, können alle bekannten Daten erhoben und Schritt für Schritt durch Hinzufügen oder Austausch in das Regressionsmodell als Regressoren integriert werden. Die Güte der Regressoren und der gesamten Regressionsfunktion wird über die vorgestellten Gütekriterien und statistischen Tests ermittelt und die Regressionsfunktion soweit nötig durch Aufnahme bzw. Entfernen weiterer Merkmale optimiert.

In der Regel sind aber die Zusammenhänge erfahrenen Kalkulatoren bekannt, so daß mit ihrer Hilfe bereits die kostentreibenden Merkmale identifiziert und die Daten zusammengestellt werden können. Zusammen mit den Zielgrößen läßt sich somit ein Regressionsmodell aufstellen und eine entsprechende Funktion ermitteln. Bei Prüfung der Regressionsfunktion können anschließend wenig signifikante Merkmale erkannt, ggf. eliminiert und die Regressionsfunktion optimiert werden. An dieser Stelle soll noch darauf hingewiesen werden, daß bei der Prüfung des Regressionsergebnisses nicht nur blind die statistischen Kenngrößen betrachtet werden dürfen. Es ist dabei auch unabdingbar eine Plausibilitätsprüfung durchzuführen, da die Tests keine absolute Sicherheit bieten. Geachtet werden sollte z.B. auf das Vorzeichen der Koeffizienten, auf die Sensitivität des Schätzwertes bei kleinen bzw. großen Änderungen eines Merkmalwertes oder auf Scheinkorrelationen. In diesem Fall üben in der Regressionsformel nicht berücksichtigte Variablen sowohl auf x als auch auf y einen Einfluß aus [BAMBERG & BAUER 1989].

Der prinzipielle Ablauf der Regressionsanalyse ist nochmals in Abbildung 5.4 grafisch dargestellt.

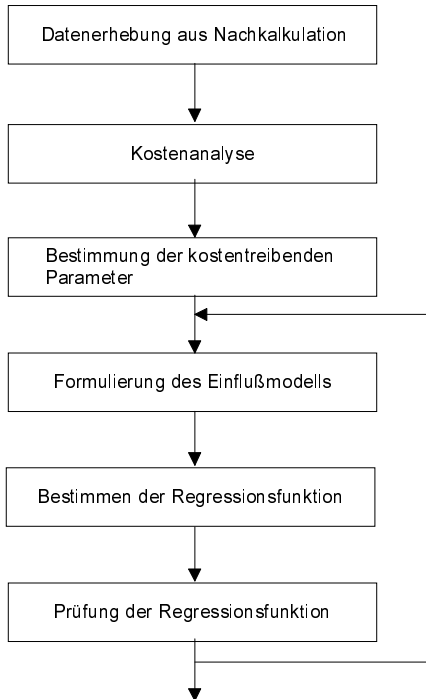


Abbildung 5.4: Vorgehen bei der Regressionsanalyse

5.2.3 Bearbeitungssimulation

Während in der Regressionsanalyse auf rein statistische Weise versucht wird, einen Zusammenhang zwischen den Einflußgrößen und den Zielgrößen Bearbeitungszeit oder Kosten herzustellen, ist es prinzipiell auch denkbar durch eine schnelle Arbeitsvorplanung die Fertigungszeiten für wichtige Bearbeitungsschritte zu ermitteln und hieraus die Fertigungskosten zu berechnen.

Moderne CAP-Programme bieten Möglichkeiten für die Erstellung von Arbeitsplänen auf Grundlage

- von vorhandenen Planungsergebnissen sowie
- von hinterlegten Planungsregeln [EVERSHEIM U.A. 1996].

5.2 Eingesetzte Verfahren zur Kalkulation und Kalkulationsunterstützung

Der effiziente Einsatz von CAP-Systemen erfordert eine objektorientierte, d.h. featurebasierte Strukturierung der Planungsdaten mit entsprechenden Ähnlichkeits-suchalgorithmen zum Wiederauffinden bereits erzeugter Teilarbeitsfolgen.

Die Beschreibung der einzelnen Arbeitsfolgen kann dabei nach den gleichen Grundprinzipien erfolgen wie in Abschnitt 4.3 beschrieben. Über das Zusammensetzen einzelner Planbausteine ist eine Fertigungszeit- und damit Kostenbestimmung möglich.

In KMUs aber auch bei der spanenden Fertigung von Einzelstücken und Kleinserien in Großbetrieben werden aus Personal- und Kostengründen Arbeitspläne oft nur mit einer sehr geringen Planungstiefe ausgearbeitet und die Einzelzeitenbestimmung wird gar nicht oder nur sehr grob durchgeführt. In diesen Fällen erfolgt die Festlegung der Arbeitsschritte unmittelbar bei der NC-Programmierung durch den Programmierer.

Bei der NC-Programmierung wird manuelles und maschinelles Programmieren unterschieden (vgl. Abb. 5.5). Die direkte manuelle Erzeugung des NC-Steuercodes nach DIN 66025 auf Basis von technischen Zeichnungen findet allerdings nur noch als Werkstattprogrammierung einfacher Werkstücke Anwendung. Am weitesten verbreitet, insbesondere in der Arbeitsvorbereitung, sind die maschinellen Verfahren wie das alphanumerische Erzeugen eines Teileprogramms in einer „Hochsprache“ (z.B. EXAPT) auf Basis von Zeichnungen oder die graphisch-interaktive Programmierung mit Hilfe der CAD-Daten. Die graphisch-interaktive Programmierung kann vielfach sowohl mit Hilfe von Zusatzmodulen direkt im CAD-System durchgeführt werden, als auch in einem separaten unabhängigen NC-Programmiersystem. Im letzten Fall wird die Geometrie in der Regel über Standardschnittstellen (IGES, VDAFS, STEP) an die NC-Programmierung übergeben. In allen Fällen der maschinellen Programmierung wird ein CLDATA-File erzeugt, das maschinenunabhängig die Werkzeugverfahrbewegungen und die bei der Programmierung angegebenen Arbeitsvorschübe dokumentiert. In einer solchen Datei sind somit alle Informationen vorhanden, die eine Berechnung der Hauptzeiten erlauben. Das Fehlen der maschinenabhängigen Parameter wie maximale Eilgangsgeschwindigkeit, max. Beschleunigung, Werkzeugwechselzeiten gestattet aber noch keine Berechnung der Nebenzeiten. Komfortable NC-Postprozessoren wandeln nicht nur das NC-Programm im CLDATA-Format in ein maschinenabhängiges Steuerprogramm nach DIN 66025 um, sondern berechnen auch zusammen mit den in einer Datenbank abgelegten Maschinenparametern die zu erwartenden Ausführungszeiten der einzelnen NC-Sätze. Sie schaffen so die Grundlage für eine Berechnung der Fertigungszeit und damit der Fertigungskosten.

5 Konstruktionsbegleitende Kostenabschätzung von Werkzeugmaschinen

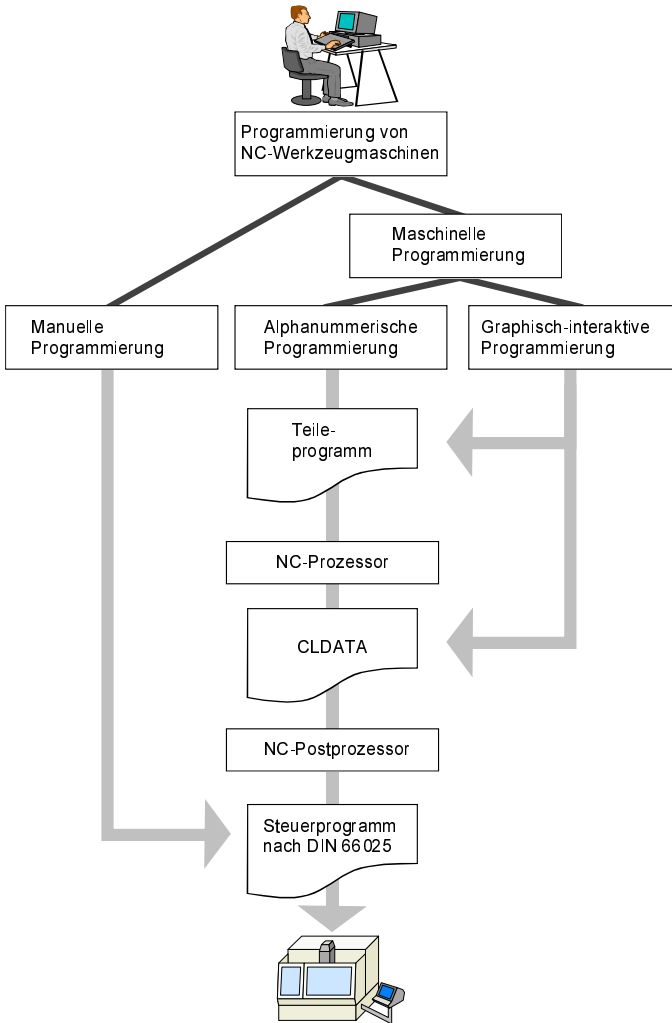


Abbildung 5.5: Möglichkeiten der NC-Programmierung

Die Brauchbarkeit der Kostenermittlung über Zeitbestimmung mittels NC-Simulation in einer konstruktionsbegleitenden Kalkulation hängt allerdings stark von der Automatisierbarkeit und den Möglichkeiten einer einfachen Handhabung ab. Es muß daher gewährleistet sein, daß die NC-Programmierung im Falle einer Kostenabschätzung nicht vom Konstrukteur in allen Details durchgeführt werden muß, sondern ähnlich der Verwendung von Regressionsformeln auf vorbereitete NC-Module zurückgegriffen werden kann.

5.2 Eingesetzte Verfahren zur Kalkulation und Kalkulationsunterstützung

Als vorbereitete Module dienen Modellbausteine, in denen bereits die wichtigsten zu beschreibenden Eigenschaften vordefiniert sind und bei der Verwendung durch den Konstrukteur nur noch angepaßt werden müssen und so Konstruktionszeit sparen helfen. Bei Konstruktionsmodellbausteinen werden hauptsächlich Geometrielemente vormodelliert und parametrisiert, so daß sie flexibel in unterschiedlichen Konstruktionen eingesetzt werden können [MILBERG & KAISER 1993].

Die Übertragung dieser Grundidee auf den schnellen Aufbau einer NC-Simulation sieht daher vor, daß parametrisierte NC-Modellbausteine von erfahrenen NC-Programmierern erzeugt und in einer Library von vordefinierten NC-Modulen abgelegt werden. Dabei werden die NC-Modellbausteine mit den Konstruktionsmodellbausteinen verknüpft, so daß bei der Konstruktion einer Werkzeugmaschinenkomponente mit den Modellbausteinen nicht nur schnell die entsprechende Geometrie dem Gesamtmodell hinzugefügt wird, sondern auch die notwendigen Bearbeitungsschritte, die wiederum schnell eine Fertigungszeit- und damit Kostenbestimmung zulassen. Die Realisierung eines solchen Konzepts erfolgt am einfachsten in einem integrierten CAD/CAM-System, in dem eine Verknüpfung der ursprünglichen 3D-CAD-Geometrie mit NC-Bearbeitungsschritten bereits vorgesehen ist.

Die Vorbereitungsphase beginnt in einem ersten vom Konstrukteur ausgeführten Schritt mit dem Aufbau der Konstruktionsmodellbausteine (user-defined features). Diese können später durch eine geeignete Parametrisierung in unterschiedlichen Variationen verwendet werden. Die Bausteine werden anschließend von Fertigungsplanungsspezialisten um weitere Informationen (Rohteil, Arbeitszelle, Spannelemente¹⁴ usw.) ergänzt und mit den notwendigen NC-Bearbeitungsschritten versehen und so zu NC-Modellbausteinen ausgebaut (vgl. Abb. 5.6), die in einer Bibliothek abgespeichert werden und damit den unterschiedlichsten Konstruktionsprojekten zur Verfügung stehen. Bei der Definition eines NC-Modellbausteins ist darauf zu achten, daß bei einer Änderung der Geometrie des Konstruktionsmodellbausteins sich die Gestalt des Rohteils und die NC-Bearbeitungsschritte entsprechend mit anpassen und so die Konsistenz zwischen Konstruktions- und Fertigungsmodell gewährleistet wird.

¹⁴ Diese Angaben werden in der Regel nur bei der Simulation eines Gesamtwerkstücks beispielsweise zum Zwecke einer Kollisionskontrolle benötigt. Für eine Simulation mit dem Ziel einer Bearbeitungszeitbestimmung sind sie nicht notwendig, werden aber von vielen Systemen als Input verlangt.

5 Konstruktionsbegleitende Kostenabschätzung von Werkzeugmaschinen

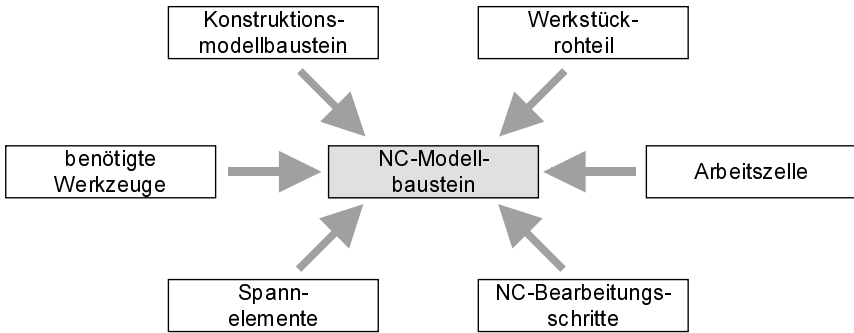


Abbildung 5.6: Aufbau eines NC-Modellbausteins

In der Werkzeugmaschinenkonstruktion werden Gestellkomponenten zunächst als Blockstrukturen und mit zunehmenden Konstruktionsfortschritt als dünnwandige Gestellkomponenten aufgebaut und ggf. ersten Auslegungsberechnungen oder einer dynamischen Strukturanalyse unterzogen. Die folgenden Detaillierungsschritte werden über den Einbau der bereitgestellten Modellbausteine ausgeführt. Nach der Anpassung der Bausteingeometrie an die aktuellen Konstruktionsanforderungen können die für die Kostenbestimmung notwendigen Schritte der CLDATA- und anschließenden DIN-Code-Generierung gestartet werden (vgl. Abb. 5.7). Die Auswertung der Haupt- und Nebenzeitberechnungen aus den Postprozessorläufen ermöglichen schließlich zusammen mit einer groben Abschätzung der „Restzeiten“ (Erfahrungswerte unberücksichtigter Fertigungsfeatures, Rüst- und Verteilzeiten usw.) die Berechnung der Gesamtfertigungszeit und damit der Fertigungskosten.

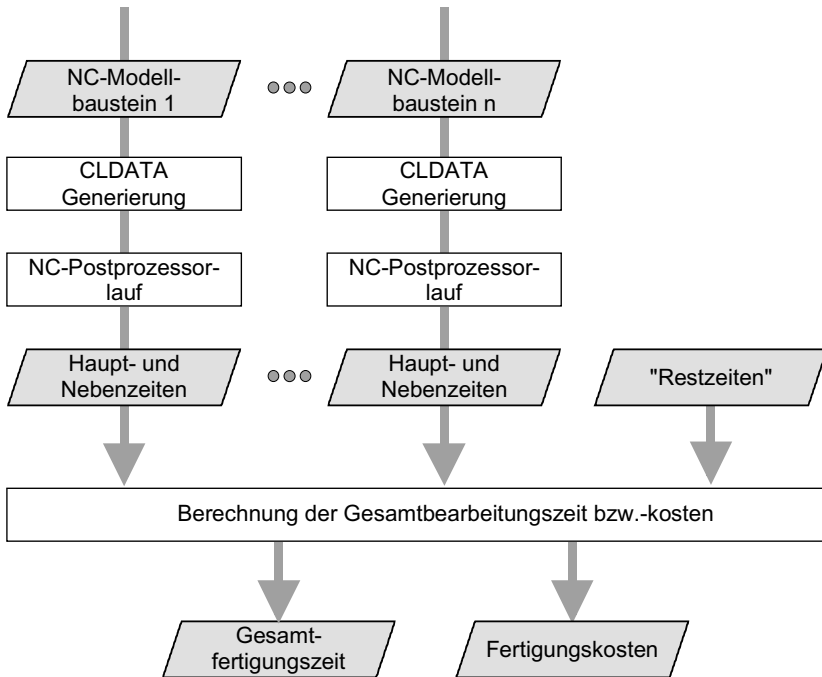


Abbildung 5.7: Fertigungskostenberechnung mittels NC-Modellbausteinen

5.3 Integration zu einem Gesamtkonzept

5.3.1 Grundprinzipien

Die Realisierung einer konstruktionsbegleitenden Kalkulation, die sowohl in frühen, als auch in späteren Konstruktionsphasen mit geringem Aufwand eingesetzt werden kann, erfordert den Einsatz von unterschiedlichen, an die jeweilige Entwicklungsphase angepaßten Berechnungsmethoden. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, daß der Aufwand für die Entwicklung von Berechnungsformeln und -algorithmen nur wirtschaftlich ist, wenn er sich auf die kostentreibenden Maschinenkomponenten konzentriert.

Vor diesem Hintergrund ist ein Konzept entwickelt worden, das diesen Anforderungen Rechnung trägt und eine Kalkulation in mehreren Stufen zuläßt. Abbildung 5.8 zeigt

5 Konstruktionsbegleitende Kostenabschätzung von Werkzeugmaschinen

die Anwendung unterschiedlichster Methoden zur Vorbereitung einer konstruktionsbegleitenden Kalkulation am Beispiel eines Horizontalbearbeitungszentrums. Die zwei wichtigsten Leitgedanken dabei sind

- Konzentration und
- Kompression.

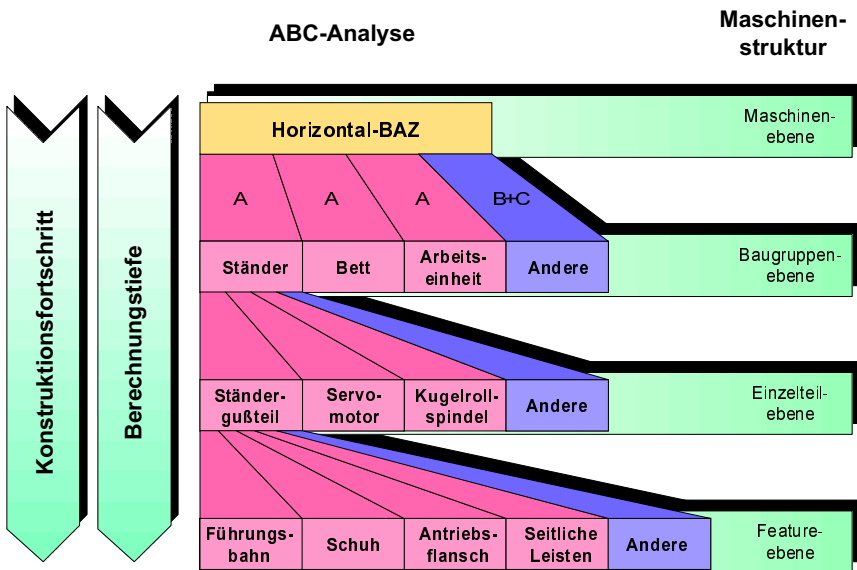


Abbildung 5.8: Prinzip der unterschiedlichen Kalkulationsstufen

Konzentration ist dabei die Fokussierung auf die kostenbestimmenden Elemente und Kompression das Verdichten und Bereitstellen der Kostenzusammenhänge früherer Konstruktionen. Je nach Betrachtungsebene werden diese Prinzipien für Baugruppen, Einzelteile oder auch Fertigungsfeatures bei Eigenfertigungsteilen angewandt.

Die praktische Umsetzung dieser Prinzipien in ein Gesamtkonzept zeigt Abb. 5.9. Hierin sind grundsätzlich zwei Komponenten zu unterscheiden. Dies ist zum einen die einmalige Kalkulationsvorbereitung (1, 2) und zum anderen die sich für jedes Objekt wiederholende Kalkulationstätigkeit selbst (3-5). Die erste wichtige Aufgabe in der Vorbereitung ist die ABC-Analyse verschiedener Werkzeugmaschinentypen und ihrer Komponenten. Mit ihrer Hilfe lassen sich kostentreibende Elemente schrittweise identifizieren und so die Basis für die Entwicklung der Kostenberechnungsmethoden

schaffen. Gleichzeitig werden die als A-Teile erkannten Komponenten klassifiziert (z.B. Servomotor, Maschinenbett, Spindel etc.), um so im zweiten Schritt die für die jeweiligen Klassen der A-Teile spezifischen Berechnungsalgorithmen entwickeln zu können. Sowohl die Listen der A-Teile für die jeweiligen Werkzeugmaschinentypen als auch die Kalkulationsmethoden bzw. NC-Modellbausteine mit integrierten Bearbeitungsvorschriften werden zur Verwaltung an das PDM-System übergeben.

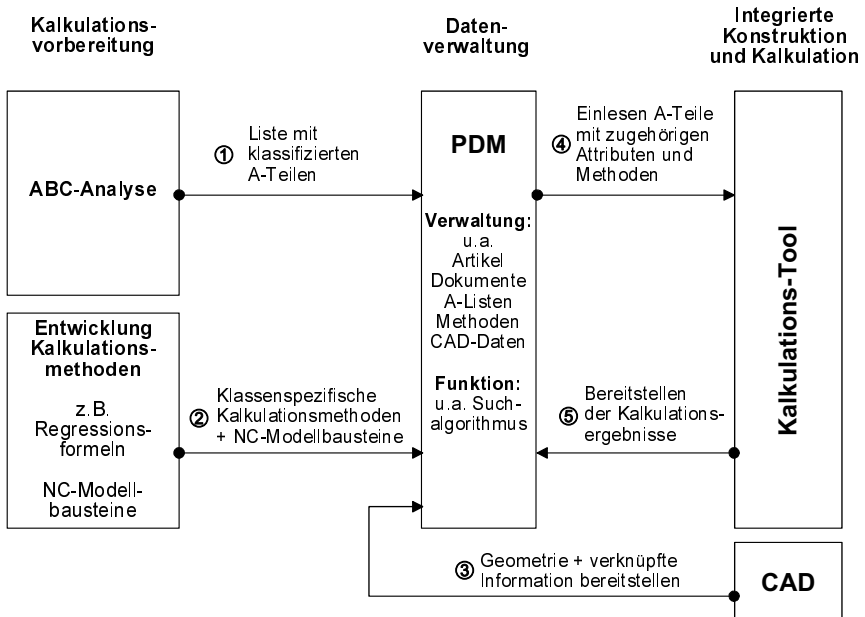


Abbildung 5.9: Gesamtkonzept der konstruktionsbegleitenden Kalkulation

Soll nun während der Konstruktion einer neuen Maschinenvariante eine Kostenabschätzung durchgeführt werden, ist das Kalkulationstool, aufgrund der vom PDM für den Maschinentyp bereitgestellten A-Teileliste, in der Lage die benötigten geometrischen und die mit der Geometrie verknüpften Informationen aus dem CAD über das PDM zu beschaffen (3) und zusammen mit den nicht-geometrischen Attributen sowie den klassenspezifischen Algorithmen aus dem PDM (4) eine Kalkulation durchzuführen. Die berechneten Ergebnisse werden über das Datenverwaltungssystem allen Projektbeteiligten zur Verfügung gestellt (5).

Die kalkulationsvorbereitenden Schritte (1, 2) werden in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels näher erläutert. Das Kalkulationswerkzeug selbst und seine

5 Konstruktionsbegleitende Kostenabschätzung von Werkzeugmaschinen

Anwendung im Verbund mit dem Produktdatenmanagementsystem (3-5) wird hingegen in Kapitel 6 ausführlich beschrieben.

5.3.2 Kalkulationsvorbereitende ABC-Analyse

In einer ersten vorbereitenden Stufe für die Kostenabschätzung in der Konzeptphase werden die A-Baugruppen und A-Bauteile identifiziert. Abbildung 5.10 zeigt beispielhaft eine solche Analyse für die Ständerbaugruppe eines Horizontalbearbeitungszentrums. Es zeigt sich, daß auch hier wenige Elemente den Großteil der Herstellkosten verursachen.

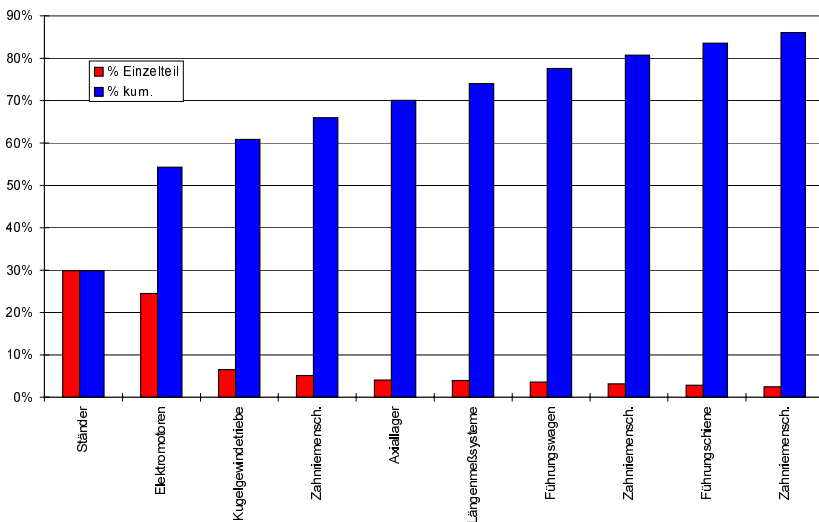


Abbildung 5.10: ABC-Analyse der Ständerbaugruppe eines Horizontalbearbeitungszentrums

Der nächste Schritt ist das Identifizieren der die Kosten hauptsächlich beeinflussenden Parameter. Dies geschieht zusammen mit erfahrenen Kalkulatoren und Konstrukteuren. Die so ermittelten Parameter dienen nicht nur als Eingangsparameter für die Kalkulation, sondern auch als Sachmerkmale im EDM-System.

Die identifizierten A-Teile lassen sich darüber hinaus einteilen in Standardzukaufteile und selbst entwickelte Komponenten. Die Herstellkosten der Standardzukaufteile wie z.B. Elektromotoren oder Kugelgewindantriebe werden dabei nicht im eigentlichen

Sinn kalkuliert, sondern über eine EDM-Datenbankabfrage nach den Kosten von Ähnlichteilen oder Katalogpreisen bestimmt. Die Kosten dieser Vorgängervarianten werden so lange in die Berechnung der Gesamtherstellkosten übernommen, bis sie durch ein aktuelles Angebot eines Zulieferers ersetzt werden können.

5.3.3 Entwicklung der Kalkulationsmethoden für die jeweiligen Entwicklungsphasen und Kalkulationsstufen

Regressionsformeln

Die Herstellkosten von Eigenentwicklungen, wie z.B. der Ständer im Beispiel von Abbildung 5.10, werden in der Konzeptphase über einfache Kostermittlungsverfahren bestimmt. Dies sind in der Regel einfache Kurzkalkulationsformeln wie die Gewichtskostenkalkulation oder mit Hilfe der Regressionsrechnung selbst entwickelte Formeln. Diese einfachen globalen Regressionsformeln auf Baugruppen- oder Einzelteilebene erlauben eine schnelle Kostenabschätzung der Herstellkosten ohne auf die konstruktiven oder fertigungstechnischen Details eingehen zu müssen. In ihnen ist die Erfahrung von früheren Kalkulationen abgebildet und sie können deshalb nur gesichert angewendet werden, wenn sich die Randbedingungen der Formelentwicklung nicht gravierend verändert haben (z.B. Einsatz eines neuen Schneidstoffes, der eine Verdoppelung der Vorschubgeschwindigkeit ermöglicht). Um selbst in dieser frühen Konstruktionsphase eine hohe Schätzgenauigkeit zu erreichen, werden die Kostenfunktionen spezifisch für die jeweiligen Teileklassen und ihrer Kosteneinflußparameter entwickelt.

Bei einer Forderung nach höherer Genauigkeit der Kalkulationsergebnisse in der Entwurfsphase können die Kostenfunktionen weiter spezifiziert werden. Durch eine getrennte Betrachtung der Material- und Fertigungskosten und ein Miteinbeziehen zusätzlicher geometrischer Ausprägungen wird dies möglich. Die Materialkosten lassen sich über gewichtsbezogene Materialpreise oder über Regressionsformeln bestimmen. Dabei kann teilweise auch auf Formeln in der Literatur zurückgegriffen werden, wie z.B. für die Berechnung der Materialkosten bei Gußkomponenten [PACYNA 1980].

Die Entwicklung von Algorithmen für die Berechnung der Fertigungskosten kann je nach geforderter Genauigkeit sowohl global auf Bauteilebene als auch auf der Featureebene durchgeführt werden. Im letzteren Fall berechnen sich die Fertigungskosten der Komponente aus der Summe der Featurekosten und der Kosten aus den Restzeiten. Der Grundgedanke bei der praktischen Durchführung ist, daß auch

5 Konstruktionsbegleitende Kostenabschätzung von Werkzeugmaschinen

Fertigungsoperationen ein typisches ABC-Verhalten aufweisen und die Anwendung der Prinzipien der Konzentration auf wichtige Fertigungsoperationen und die Verdichtung der Kostenzusammenhänge zu einer Kostenfunktion möglich sind. Eine Untersuchung an Gestellkomponenten von Werkzeugmaschinen, die spanend bearbeitet werden, zeigte, daß ein Großteil der Fertigungskosten verursacht werden durch wenige genau zu fertigenden Funktionsflächen wie Führungsbahnen, Motorflanschflächen usw.. Abbildung 5.11 zeigt das Ergebnis an einer Baureihe von Graugußständern. Hinter den jeweilig aufgeführten Features sind alle Fertigungsoperationen, die zur Fertigbearbeitung des Konstruktionselements notwendig sind, zusammengefaßt. Für die Bearbeitung der Führungsbahn sind dies beispielsweise verschiedene Schrupp- und Schlichtfräsvorgänge sowie mehrere Bohr-, Senk- und Gewindeschneidoperationen.

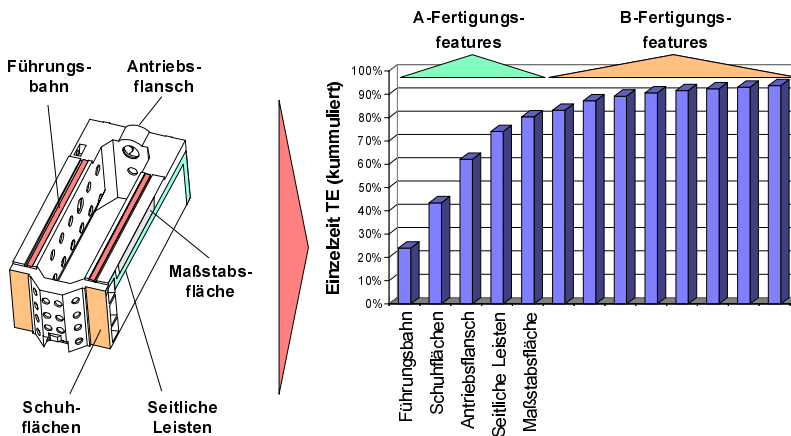


Abbildung 5.11: ABC-Analyse der Fertigungsoperationen an Werkzeugmaschinenständern.

Die Berechnung der Fertigungszeiten und damit der Fertigungskosten der jeweiligen A-Features kann auf unterschiedliche Art erfolgen. Zum einen lassen sich wieder Regressionsformeln entwickeln, die eine Abhängigkeit der Fertigungszeit von den geometrischen Hauptabmessungen, der Anzahl der Gewinde usw. herstellen. Die Herleitung von Regressionsformeln auf Featureebene kann unter Umständen sehr aufwendig sein. Der Schritt der Datenerhebung und Analyse ist hier besonders hervorzuheben, da dies eine detaillierte Untersuchung alter Arbeitspläne oder NC-Programme erfordert. Darüber hinaus können die Formeln sehr stark von den Verfahrensparametern abhängig sein und müssen bei einer Änderung ebenfalls angepaßt werden.

Analytisch hergeleitete Formeln

Alternativ zur Regressionsanalyse kann sich auch ein analytischer Ansatz als sinnvoll erweisen. Die Zerlegung der Kalkulation einer Werkzeugmaschinenkomponente in die Berechnung der (Fertigungs-)Kosten einzelner Hauptfeatures kann die Komplexität der Kosten- bzw. Fertigungszeitbestimmung so vereinfachen, daß direkt mit Hilfe der physikalischen und geometrischen Zusammenhänge die gewünschte Zielgröße berechnet werden kann. Eine Sammlung der wichtigsten Formeln über die Grundzusammenhänge bei den einzelnen Fertigungsverfahren zeigt SPUR (1996). Ein ebenfalls analytischer Ansatz wurde in dieser Arbeit für die Berechnung von Schweiß- und Brennschneidkosten bei Stahlkonstruktionen im Werkzeugmaschinenbau entwickelt¹⁵.

Bearbeitungssimulation

Eine dritte Möglichkeit der Fertigungszeit- bzw. Fertigungskostenberechnung, die in dieser Arbeit vorgeschlagen wird, erfolgt über eine NC-Simulation der wichtigsten Bearbeitungsschritte mit parallel ablaufender Zeitermittlung. Dies ist besonders im Bereich der spanenden Bearbeitungsschritte wie Fräsen, Bohren, Senken, Gewindeschneiden und Drehen von Relevanz. Der Grundgedanke ist, dem Konstrukteur in einer Bibliothek parametrische CAD-Modellbausteine zur Verfügung zu stellen, die außer der geometrischen Information und den semantischen Parametern auch eine Verknüpfung zu vorgeplanten Grobbearbeitungsschritten aufweisen. Dabei ist sowohl eine Verknüpfung mit einem externen Arbeitsplanungssystem denkbar, als auch die Verwendung eines CAD-integrierten NC-Planungstools. In dieser Arbeit wird der zweite Ansatz verfolgt. Die Definition der Werkzeugverfahrbewegungen ist so gestaltet, daß eine Änderung der Hauptabmessungen des Konstruktionsfeatures automatisch auch eine Anpassung der Werkzeugbewegungen zur Folge hat. Als Beispiel sei hier die Verlängerung einer Führungsbahn genannt. Die Parametrik fügt selbständig zusätzliche Gewindebohrungen ein und paßt auch die NC-Planung entsprechend an. Die Fertigungszeit wird nach einem NC-Postprozessorlauf direkt aus dem generierten NC-Programm gewonnen.

Die Fertigungszeit des gesamten Werkstücks wird als Summe der Einzelzeiten der jeweiligen A-Features unter Berücksichtigung eines Restwerts für die B- und C-Features berechnet. Dieses Verfahren vernachlässigt den Einfluß der Verfahrbewegungen zwischen den einzelnen Features auf die Gesamtbearbeitungszeit.

¹⁵ vgl. Abschnitt 7.5.3 Abschätzung über analytisch hergeleitete Formeln

5 Konstruktionsbegleitende Kostenabschätzung von Werkzeugmaschinen

Untersuchungen haben aber ergeben, daß ca. 75% der Bearbeitungszeit an Gestellkomponenten Hauptzeiten sind. Die relativ langsame Bearbeitung von hochgenauen Flächen wie Führungsbahnen ist dominant, so daß sich der kleine Fehler nur auf den Nebenzeitenanteil von 25% auswirkt und vernachlässigbar ist.

Dieses Verfahren stellt das flexibelste der bisher vorgestellten Kalkulationsmethodiken dar. Es erlaubt auch in gewissen Maßen Variationen der Geometrie oder der technologischen Parameter, die zu Beginn nicht vorgesehen waren. Kurzkalkulationsformeln, die in der Regel für eine Vorschubgeschwindigkeit hergeleitet wurden, müssen bei einer Änderung der Geschwindigkeit neu hergeleitet werden. Beim Einsatz des Simulationsverfahrens dagegen werden während des Postprozessorlaufs immer die aktuellsten Verfahrensparameter aus einer Datenbank eingebunden.

Zusammenfassung

Einen grafischen Überblick über die vorgestellten Kalkulationsverfahren und ihrer Einsatzzeitpunkte zeigt Abbildung 5.12. Dabei wird deutlich, wie in der Konzeptphase zunächst wenig differenzierend mit Hilfe globaler empirisch ermittelter Kurzkalkulationsformeln die Herstellkosten der Maschine bzw. wichtiger Komponenten abgeschätzt werden. Die mit zunehmendem Konstruktionsfortschritt steigenden Anforderungen an die Kalkulationsgenauigkeit machen eine differenziertere Betrachtung sowohl hinsichtlich der zu betrachtenden Kostenarten als auch der zu betrachtenden „Kostenträger“ notwendig. Die Kalkulationsverfahren werden nunmehr auf Basis von Material- und Fertigungskosten auf Einzelteil- und sogar Featureebene angewandt. Zusätzlich zu den empirischen Verfahren werden jetzt aufgrund der im stärkeren Maße zur Verfügung stehenden Bauteilinformationen theoretisch ermittelte Formeln oder Simulationen für die Kostenberechnung herangezogen. Eine Ausnahme bilden lediglich Zukaufteile; für sie werden die Kosten von Vorgängermodellen bzw. aktuelle Angebotspreise angesetzt. In der in dieser Arbeit nicht mehr betrachteten Detaillierungsphase sind die zu kalkulierenden Objekte bereits hinreichend beschrieben, so daß hier mit Hilfe von bereits generierten Arbeitsplänen die bekannten klassischen Verfahren der Vorkalkulation angewandt werden können.

5.3 Integration zu einem Gesamtkonzept

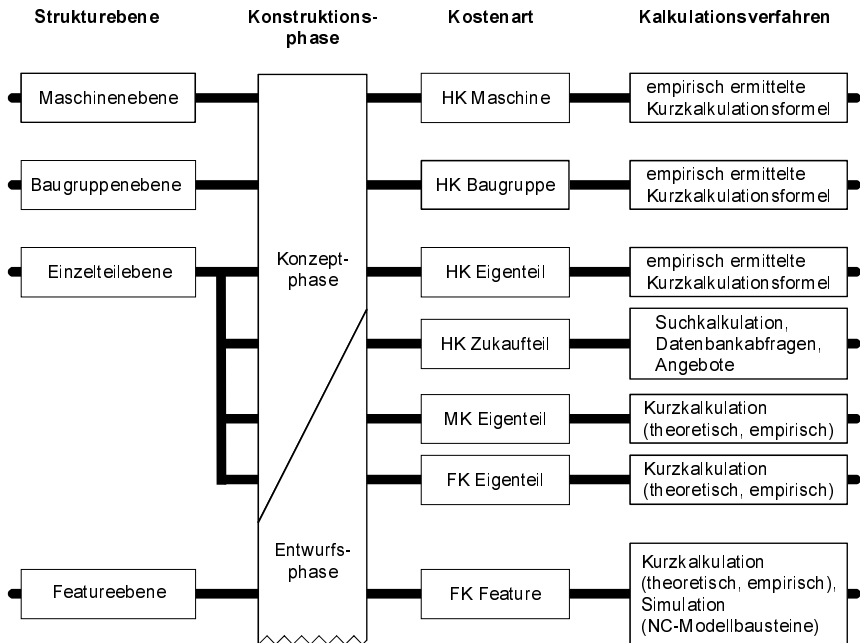


Abbildung 5.12: Bestimmung der Kalkulationsverfahren entsprechend dem Konstruktionsfortschritt

6 Systembeschreibung und softwaretechnische Umsetzung

6.1 Systemstruktur

6.1.1 Kalkulationsablauf und Datenfluß

Wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits erläutert, soll in dieser Arbeit ein Kalkulationssystem entworfen werden, mit dem der Konstrukteur in der Lage ist, selbst eine frühzeitige Kostenabschätzung durchzuführen. Informationsquellen für die Kalkulation sind im wesentlichen ein EDM/PDM-System (Materialstamm, Klassifizierung, Attribute, Deskriptoren) und ein oder mehrere 3D-CAD-Systeme (Geometrie und damit verknüpfte Information). Die Kalkulation gliedert sich dabei in folgende Schritte (vgl. Abbildung 6.1):

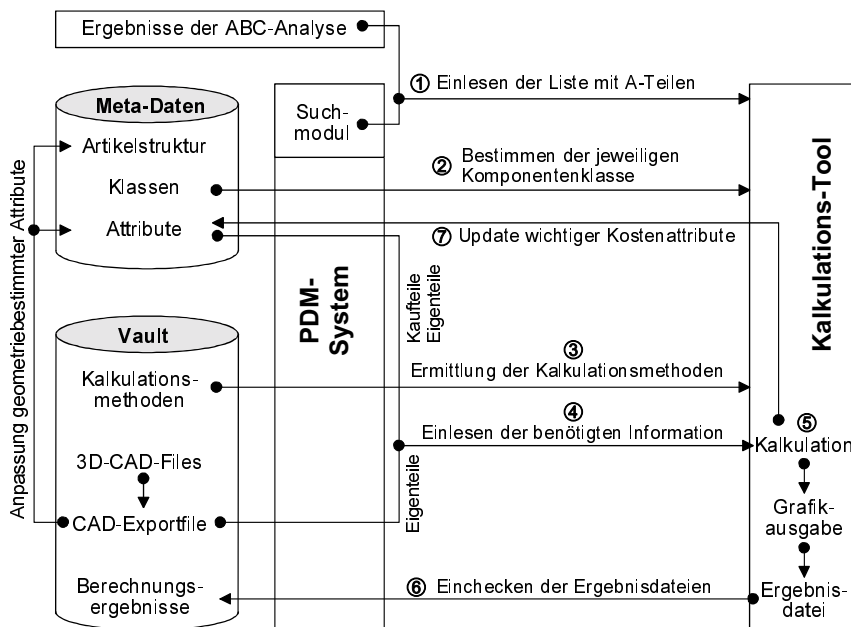


Abbildung 6.1: Kalkulationsablauf und Datenfluß

1. Einlesen der Liste mit A-Teilen

Der erste Schritt besteht aus der Auswahl bzw. dem Zusammenstellen einer Liste der kostentreibenden Komponenten. Grundlage hierfür ist die vorangegangene ABC-Analyse ähnlicher Maschinentypen. Durchgeführt wird dieser Vorgang entweder direkt im PDM-System oder aber im Kalkulationssystem über eine OLE-Einbindung der entsprechenden Such- und Selektionsmasken. Der Anwender kann dabei auf die volle PDM-Funktionalität zurückgreifen. Somit entfällt eine Nachprogrammierung von Such- und Auswahlalgorithmen im Kalkulationstool.

2. Bestimmen der jeweiligen Komponentenklasse

Zu jedem Element der A-Liste wird anschließend von der Kalkulationssoftware die zugehörige Klasse ermittelt. An die Klasse gebunden sind spezifische Attribute und die für die Klasse entwickelten Kalkulationsmethoden.

3. Ermittlung der Kalkulationsmethoden

Im dritten Schritt werden die benötigten klassenspezifischen Berechnungsvorschriften bestimmt. Zusätzlich zur Klasse muß ein Fortschrittskenner, der den Konstruktionsfortschritt dokumentiert, ausgewertet werden. Mit diesen beiden Informationen können die für die Konstruktionsphase und Artikelklasse geeigneten Kalkulationsmethoden identifiziert und in das Kalkulationsrumpfprogramm geladen werden. Dabei ist es durchaus möglich, mehrere Methoden, etwa zur getrennten Berechnung von Material- und Fertigungskosten, in die Berechnung zu integrieren. Bei diesem Ansatz wird das Ziel verfolgt, die Berechnungsalgorithmen nicht wie üblich in das Kalkulationstool zu integrieren, sondern unabhängig davon zu verwalten. Dies erlaubt eine leichtere Pflege. Neue Algorithmen stehen über das PDM jedem Benutzer sofort zur Verfügung und können auch eingesehen werden. Auch der Vergleich der Kalkulationsergebnisse unterschiedlicher Methoden ist denkbar.

4. Einlesen der für die Kalkulation benötigten Informationen

Die für die Berechnung notwendigen Informationen werden von den Kalkulationsalgorithmen über das PDM-System direkt aus den Komponentenattributen der Meta-Daten ausgelesen oder aus einem CAD-Exportfile ermittelt, das im ASCII-Format die wichtigsten Struktur-, Geometrie- und geometrieabhängigen Informationen enthält. Während für Kaufteile in der Regel die Zielkosten und der Kaufpreis aus der PDM-Datenbank übernommen werden, sind für Eigenteile zusätzliche Informationen aus dem 3D-Geometriemodell notwendig. Hierzu muß

das zur Komponente gehörige CAD-Exportfile bestimmt und für das Auslesen zugänglich gemacht werden („Auschecken“).

5. Kalkulation der Herstell-, Material- und Fertigungskosten im Vergleich mit den Zielkosten.

Nach dem Bestimmen der zu kalkulierenden Teile mit Hilfe der A-Liste und dem anschließenden Identifizieren und Laden der Kostenberechnungsalgorithmen ist das Kalkulationstool in der Lage, die Kosten der kostentreibenden Komponenten sortiert nach Komponenten oder Kostenarten zu bestimmen und auf die Herstellkosten der gesamten Baugruppe oder Werkzeugmaschine hochzurechnen. Die Ergebnisse werden in Tabellen und als Graphen in einer Datei gespeichert.

6. Ablage der Ergebnisse im Daten-Vault des PDM-Systems

Die Ergebnisdateien werden über das PDM-System zu den Komponenten referenziert und im Daten-Vault abgelegt. Sie stehen damit jedem Berechtigten zur Verfügung und können bei Bedarf eingesehen werden.

7. Anpassen evtl. vorhandener Kostenattribute in den Meta-Daten des PDM-Systems

Wichtige Gesamtergebnisse können darüber hinaus als Komponentenattribute in der Datenbank abgelegt werden. So sind zentrale Kosteninformationen sofort zugänglich (ein Auschecken der Ergebnisdatei ist nicht notwendig) und können sogar für Suchanfragen herangezogen werden.

Allgemein sind für Suchanfragen zur Ermittlung von Ähnlichteilen nur Daten, die als Meta-Daten in der relationalen Datenbank abgespeichert sind, nutzbar. Informationen in Dateien können nicht herangezogen werden, da dies für jeden Suchvorgang ein Aus- und Einchecken der Datei bedeuten würde. Deshalb werden häufig wichtige Parameter, die sich aus dem CAD-Modell ergeben bzw. dort definiert werden, wie z.B. Masse oder Material, parallel im PDM als Meta-Daten verwaltet. Bei Änderungen des CAD-Modells sind deshalb auch die Attribute im PDM zu ändern. Dies geschieht hier ebenfalls über die CAD-Exportdatei. Diese wird vom PDM automatisch beim Einchecken eines CAD-Modells interpretiert und ggf. werden die Attribute in den Meta-Daten angepaßt. Beim Einchecken komplexer Baugruppen kann die darin enthaltene Strukturinformation auch für einen automatischen Eincheckvorgang aller zur Baugruppe gehörenden Dateien herangezogen werden.

6.1.2 Datenmodell - Voraussetzung im PDM-System

Die Umsetzung des im vorigen Abschnitt beschriebenen Kalkulationsablaufes stellt an das Datenmodell der dem PDM-System zugrunde liegenden relationalen Datenbank eine Reihe von allgemeinen aber auch direkt aus dem skizzierten Kalkulationsablauf hervorgehende Anforderungen. Diese sind:

- Es muß die Möglichkeit bestehen einen Artikelstamm aufzubauen und zu ihm Referenzen zu ebenfalls strukturierten Dokumenten angeben zu können.
- Es müssen die unterschiedlichsten Dokumente mit ebenfalls unterschiedlichen Attributsätzen verwaltbar sein (z.B. CAD-Dokumente, Kalkulationsergebnisse, Gebrauchsanweisung etc.).
- Dateien können an Dokumente referenziert werden und so im Daten-Vault gefunden werden. Dabei sollen auch mehrere Dateien auf ein Dokument verweisen können. Dies ist z.B. dann sinnvoll, wenn die Beschreibung eines Objekts gleichzeitig in mehreren Dateiformaten erfolgt (proprietäres CAD-Format, HPGL-Plotdatei, TIFF-Bitmapformat).
- Komponenten können zu Listen zusammengestellt werden und so als A-Teile der Kalkulation, als Komponenten für eine FE-Berechnung oder als Komponenten für einen Datenaustausch gekennzeichnet werden.
- Dokumente, Komponenten und Listen können einem oder mehreren Projekten zugeordnet werden. Dies erleichtert die Suche und kann zu einer projektgesteuerten Einschränkung der Artikelsicht verwendet werden.
- Komponenten müssen klassifiziert werden können, wobei mehrere Ebenen der Klassifizierung erlaubt werden sollen.
- Kalkulationsmethoden müssen strukturiert verwaltet und direkt mit der Klasse in Beziehung gebracht werden, so daß über die Zuordnungskette Komponente-Klasse-Kalkulationsmethode eine Kostenabschätzung mit den richtigen Berechnungsvorschriften erfolgen kann.

Der Entwurf eines Datenmodells, das diesen Anforderungen genügt, soll mit einer Symbolik dargestellt werden, die an die Entity-Relationship-Darstellung angelehnt ist. Die Modellierung als Entity-Relationship-Modell ist für relationale Datenbanken ein übliches Verfahren. Hier werden einzelne identifizierbare Objekte (die Komponente „Maschinenständer“, das Projekt „FFS für Fa. Müller“) als Entitäten bezeichnet. Eine

Menge gleichartiger Entitäten stellen einen Entitätstyp dar, der über einen gleichen Satz an Attributen beschrieben wird. Entitäten können untereinander in Beziehung stehen. Dabei sind nicht nur Beziehungen zwischen unterschiedlichen Entitätstypen möglich (Komponente - Dokument), sondern auch Beziehungen auf sich selbst. Auf diese Art lassen sich Strukturen aufbauen und damit eine Stückliste oder ein Teileverwendungsnachweis generieren. Die verwendeten Zeichen sind in Abbildung 6.2. dargestellt.

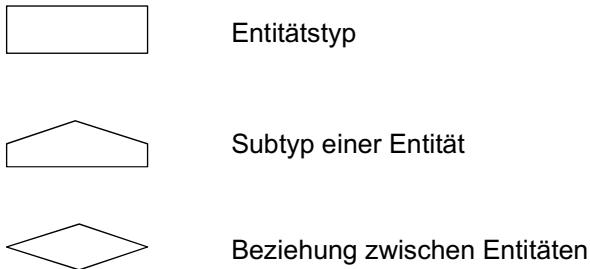


Abbildung 6.2: Symbolik der Datenmodellldarstellung

Alle drei Symbole stellen in der Datenbank eine Tabelle dar. Je nach Verwendung haben sie eine andere Gestalt. In dieser Darstellungsform wurde für Subtypen ein neues Symbol eingeführt. Datenbanktechnisch sind sie eine Beziehungstabelle auf eine Null-Entität¹⁶. Da sie aber in ihrer Verwendung mehr Ähnlichkeiten mit einem Entitätstyp haben, wurde ein Symbol eingeführt, das beide Darstellungen vereint.

Der Kern des PDM-Datenmodells (Abbildung 6.3) stellt der Entitätstyp *Component* dar. Hier wird der Teilestamm strukturiert (Beziehungstabelle *Cmp-Str*) abgelegt. Typische Attribute sind Teilenummer, Benennung, Erzeuger, Prüfer etc.. Diesen Komponenten werden über die Beziehungstabelle *Cmp-Doc* Entitäten vom Typ *Document* zugeordnet. Während in *Document* die Attribute verwaltet werden, die allen Dokumenten gemein sind (Dokumentenummer, Benennung), werden in den zugeordneten Subtyp-Tabellen die dokumentspezifischen Parameter verwaltet (z.B. CAD-Modelltyp, Zeichnungsformat etc.). Über die Beziehung *Doc-Fil* werden die Entitäten vom Typ *File* angebunden. Hier werden die einzucheckenden Dateien spezifiziert (Ursprungspfad, Betriebssystem ...). Sie sind später nur noch über die Entitäten vom Typ *Document* bzw. *File* auffindbar.

¹⁶ logische Entität, die nicht in der Datenbank als Tabelle angelegt ist.

Die Kalkulation setzt auf eine Liste von A-Komponenten auf. Diese Liste wird in einer Datenbank nicht als Datei aufgebaut, sondern als Tabelle in der lediglich die eindeutigen Identnummern (IDs) der A-Komponenten eingetragen werden. Im Datenmodell wird dies durch die Relation *Fol-Cmp* zwischen *Component* und dem Entitätstyp *Folder* ermöglicht. Auch hier können die einzelnen Folder durch Subtypen genauer spezifiziert werden.

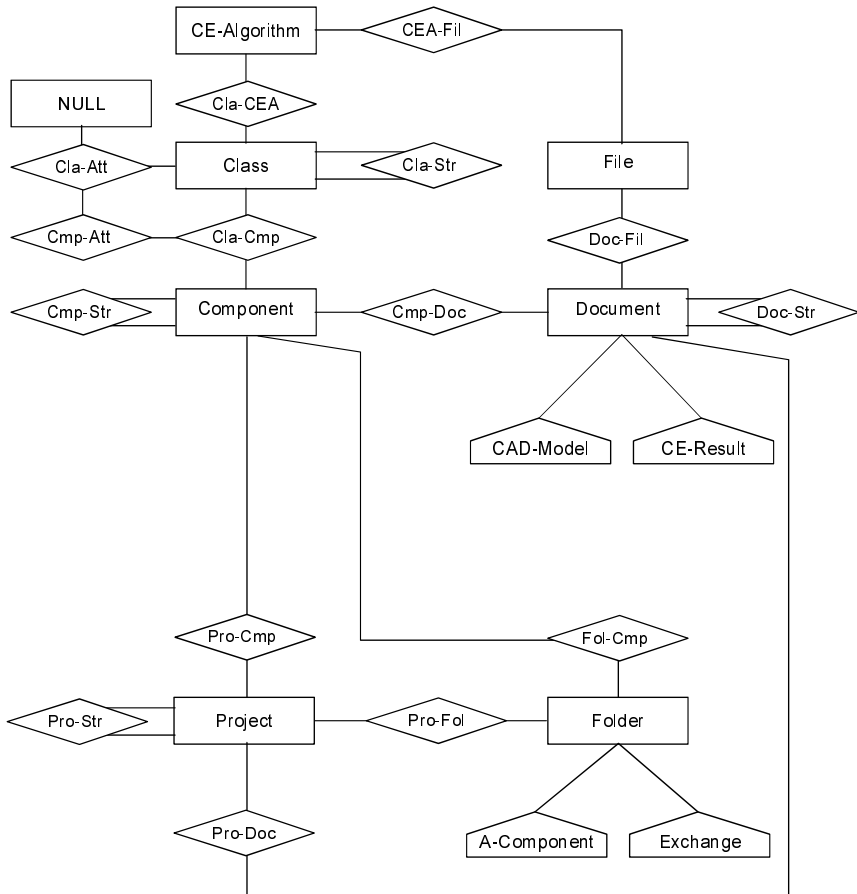


Abbildung 6.3: PDM-Datenmodell

Wesentlich für das Suchen von Ähnlichkeiten und die weitere Kalkulation ist die Klassifikation der Komponenten. Hierzu sind Entitäten vom Typ *Class* vorgesehen. Die Attribute, die eine Klasse kennzeichnen, sind in diesem Datenmodell nicht direkt als *Class-Attribute* vorgesehen, sondern werden über die Beziehungstabelle *Cla-Att*

abgebildet. Der Vorteil liegt darin, daß eventuelle spätere Änderungen in der Klassifikation und den beschreibenden Parametern vom berechtigten Anwender selbst ausgeführt werden können. Es ist keine Datenmodelländerung notwendig. Die Attribute in *Cla-Att* (u.a. Feld mit Parameternamen) werden über die Beziehungstabelle *Cmp-Att* (u.a. Feld für den Parameterwert) mit der Beziehungstabelle *Cla-Cmp* verbunden und sind damit den jeweiligen Komponenten zugeordnet.

Die Kostenberechnungsmethoden *CE-Algorithm* mit ihren zugehörigen Dateien vom Typ *File* werden über Beziehungstabellen (*Cla-CEA*, *CEA-Fil*) mit der Klasse verbunden und sind so entsprechend der Klassenzugehörigkeit der zu kalkulierenden Komponente für die Kalkulation zugänglich.

Alle Hauptentitäten vom Typ *Component*, *Document* und *Folder* sind schließlich noch über Beziehungstabellen dem Entitätstyp *Project* zugeordnet. Damit lassen sich in der Anwendung Projektzugehörigkeiten angeben und somit Suchanfragen vereinfachen. Zur Vereinfachung der Übersicht lassen sich die Projekte in eine beliebige Anzahl von Unterprojekten gliedern. Dies wird wieder mit einer Beziehungstabelle auf sich selbst realisiert (*Pro-Str*).

6.2 Realisierungskonzept

6.2.1 Integration von PDM, CAD und Kalkulationssoftware

Das im folgenden dargestellte Konzept wurde im Rahmen des Brite Euram Projekts MATCAP (Machine Tool Computer Aided Prototyping through Solid Modellers) entwickelt. Wie schon in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, soll das Kalkulationstool zwar in die Konstruktionsumgebung mit CAD-Systemen und einem EDM/PDM-System integriert sein, aber es soll kein monolithisches Programm entstehen, das fest mit einem CAD-System verbunden ist und alle Berechnungsvorschriften integriert hat. Um die damit verbundenen Nachteile der schlechten Wartbarkeit und der geringen Flexibilität zu vermeiden, ist das Kalkulationssystem deshalb aufgetrennt in einen CAD-nahen Teil, der die wichtigsten Informationen aus dem CAD-System in einem neutralen Datenformat zur Verfügung stellt, den eigentlichen Kostenberechnungsroutinen und dem Hauptprogramm, das die Grundfunktionalität, die Ein- und Ausgabemasken abbildet.

Für das Kalkulationshauptprogramm wurden Forderungen nach leichter Bedienbarkeit, hohem Verbreitungsgrad und geringen Kosten gestellt. Deshalb wurde im Rahmen des

Projekts auf das Standardprogramm MS-Excel unter Windows NT zurückgegriffen (vgl. Abbildung 6.4). Dieses Werkzeug wird bei nahezu allen Werkzeugmaschinenherstellern eingesetzt und die Anwendung ist den meisten Konstrukteuren bereits vertraut. Darüber hinaus bietet die Software mit Visual Basic for Applications (VBA) eine ausreichende und leicht zu erlernende Programmierschnittstelle, die Möglichkeit über DDE oder OLE mit anderen Programmen zu kommunizieren und bereits nutzbare Import/Export-Schnittstellen sowie eine einfache Möglichkeit der Grafikausgabe. Das MATCAP Cost Estimation Tool ist in VBA programmiert und nutzt die in MS-Excel integrierten Möglichkeiten des Arbeitens mit Tabellen, der Grafikausgabe und dem Aufbau von neuen Menüs.

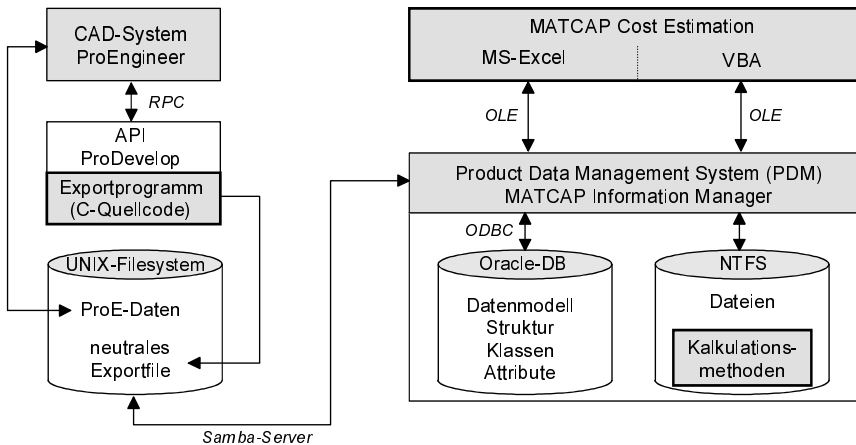


Abbildung 6.4: Hardware-/softwaretechnisches Realisierungskonzept einer CAD-PDM-integrierten konstruktionsbegleitenden Kalkulation

Über OLE (Object Link Embedding) wird die Verbindung zum EDM/PDM-System MATCAP Information Manager, einer Entwicklungsversion des EDM-Systems Team Manager der Fa. CAD.Lab, aufgebaut. Dies erlaubt das direkte Öffnen von Masken und Starten von Suchanfragen an die Datenbank direkt aus dem Kalkulationstool heraus, ohne diese Funktionalität nachprogrammiert haben zu müssen. Lese- und Schreibzugriffe auf die Meta-Daten sowie der Start von integrierten Funktionen des PDM-Systems sind auch direkt vom Visual Basic Code möglich und damit sind die Voraussetzungen für eine Kalkulation mit Nutzung der PDM-Daten geschaffen. Dies gilt insbesondere auch für das Auffinden und Auschecken der komponentenklassenspezifischen Kalkulationsroutinen, die ebenfalls in Visual Basic geschrieben sind (ausgenommen: CAD-NC-Modellbausteine). Durch die Implementierung der Kalkulationsroutinen in einer Interpretersprache bleibt der Inhalt transparent und

Änderungen sind schnell ohne Kompilierungsvorgänge durchführbar. Beim Aufbau eines Kalkulationstools mit einer Compilersprache, beispielsweise C, bestände ebenfalls die Möglichkeit interpretierbare Kalkulationsroutinen zu integrieren. Für C werden hier die Werkzeuge LEX und Yacc angeboten, mit denen bereits mit wenigen Seiten Quellcode ein ausreichender Interpreter mit Kontrollstrukturen und Funktionen entwickelt werden kann. Ein Beispiel findet sich in KERNIGHAN & PIKE, 1987.

Der MATCAP Information Manager arbeitet ebenfalls unter Windows NT und setzt für den Daten-Vault auf das Filesystem von Windows NT (NTFS) auf. Als relationale Datenbank für die Ablage der Meta-Daten ist ORACLE vorgesehen. Die Kommunikation erfolgt über ODBC, so daß der ORACLE-Server nicht notwendigerweise auf Windows NT installiert werden muß.

Als zweite wichtige Datenquelle für die konstruktionsbegleitende Kalkulation dient das 3D-CAD-System Pro/ENGINEER unter UNIX. Die vom CAD erzeugten proprietären Datenfiles können von Fremdprogrammen nicht direkt interpretiert werden. Deshalb wurde dem CAD-unabhängigen Teil der Kalkulationssoftware noch ein CAD-abhängiges Werkzeug an die Seite gestellt, das aus der CAD internen Datenbank die benötigten Informationen exzerpiert und in einem neutralen ASCII-File in einem definierten Format ablegt. Dieses Exportprogramm ist in C unter Nutzung des CAD-spezifischen Programmierwerkzeugs Pro/DEVELOP entwickelt worden. Die Kommunikation mit Pro/ENGINEER erfolgt dabei über RPC (Remote Procedure Calls). Prinzipiell ist bei diesem Konzept die Zusammenarbeit mit mehreren CAD-Systemen möglich. Lediglich das Exportprogramm, das für die Kalkulation wichtige CAD-Daten im neutralen Datenformat speichert, muß an den jeweiligen 3D-Modellierer angepaßt werden. Bei einem zukünftigen Einsatz eines Standardschnittstellenformats wie z.B. dem Physical File von STEP AP 214 entfällt auch diese Arbeit. Hierzu müßte allerdings im Hauptkalkulationstool eine entsprechende STEP-Importschnittstelle implementiert werden.

Der Austausch von Dateien zwischen den Betriebssystemen Windows NT und UNIX wird über einen Samba-Server realisiert. Diese Software erlaubt Windows NT den Zugriff auf Teile des UNIX-Filesystems. Der Benutzer unter NT stellt dabei keinen nennenswerten Unterschied zwischen den NT-Netzlaufwerken und den UNIX-Speicherbereichen fest.

Zusammenfassend soll an dieser Stelle erwähnt werden, daß die hier vorgestellte Systemarchitektur der Hard- und Software ein möglicher Ansatz zur Implementierung darstellt. Das vorgeschlagene Konzept ist jedoch allgemeingültig und die Umsetzung kann daher mit auch mit anderen System erfolgen.

6.2.2 Kalkulationssoftware

Die erläuterte Kombination von CAD, PDM und Kostenkalkulationssoftware erlaubt die direkte Durchführung einer konstruktionsbegleitenden Kostenabschätzung durch den Konstrukteur. Die Rahmensoftware für das Kostentool ist MS-Excel und die Menüpunkte für den Aufruf von Kalkulationsroutinen sind direkt in die Standardoberfläche integriert. Dazu gehören der Aufruf der Grundfunktionalitäten wie der Start der Kalkulation mit anschließender Auswahl der zu kalkulierenden Maschinen bzw. deren A-Teileliste. Der anschließende Ablauf der Kalkulation erfolgt weitgehend automatisch. Das Tool bestimmt mit Hilfe von Datenbankabfragen über das PDM die Klassen der zu kalkulierenden Komponenten und lädt die benötigten Kalkulationsalgorithmen entsprechend dem ausgelesenen Konstruktionsfortschrittskennern in das Hauptprogramm. Mit den eingelesenen Kalkulationsmethoden, Komponentenparametern aus dem PDM und den Geometriedaten aus der CAD-Exportdatei wird für jedes A-Teil die Kalkulation durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Tabellen gespeichert und können grafisch aufbereitet ausgegeben werden. Das System erlaubt dabei die Kosten nach unterschiedlichen Sortierkriterien darzustellen. Zum einen ist eine Sortierung der Kosten nach Baugruppen (vgl. Abbildung 6.5) oder, falls entsprechend genau kalkuliert, auch nach Features möglich. Dies bedeutet die einzelnen Kostenarten (Materialkosten, Fertigungskosten usw.) werden getrennt für jede einzelne Komponente bzw. einzelnes Feature ausgewiesen und ggf. den Zielkosten gegenübergestellt. Dies erlaubt den Vergleich mit Varianten oder das Erkennen besonders kostenintensiver Komponenten. Zum anderen ist aber auch eine Kostenaufstellung nach Kostenarten vorgesehen. Hier werden für jede Kostenart die Kosten aller Komponenten aufsummiert. Auf diese Weise läßt sich beispielsweise das Verhältnis der Materialkosten zu den Fertigungskosten für die Gesamtmaschine erkennen. Ergänzend zu diesen Grafikvorschlägen des Kostentools besteht auch die Möglichkeit, unter Ausnutzung der Excel-Standardfunktionalität, frei definierte Grafiken zu erzeugen und diese beispielsweise über OLE in andere Dokumente einzubinden.

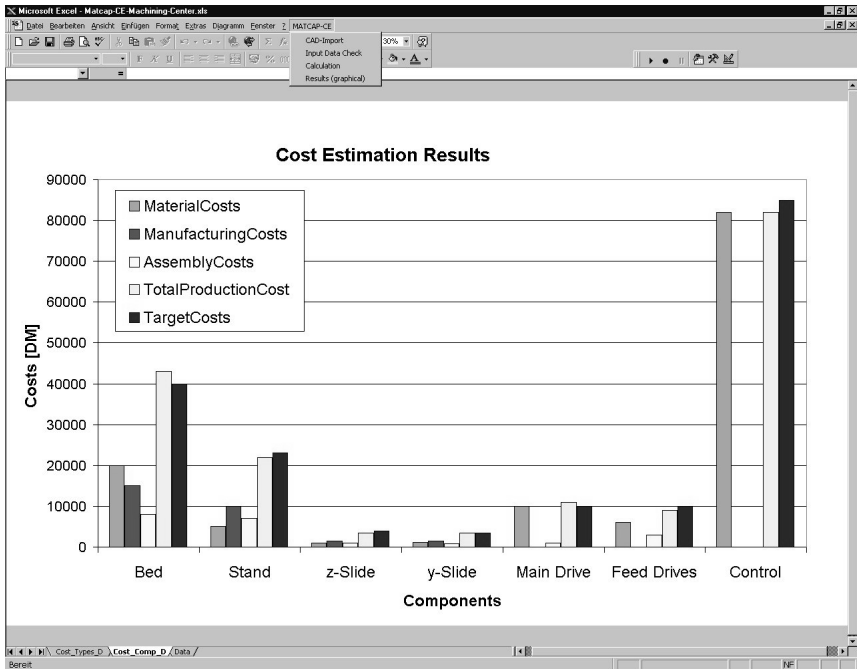


Abbildung 6.5: Beispiel einer Kalkulation mit MATCAP Cost Estimation

Als Zusatzfunktion ist zudem ein Modul integriert, das überprüft, ob alle für eine Kalkulation benötigten Informationen zur Verfügung stehen und ggf. entsprechende Warnungen ausgibt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit CAD-Daten über das neutrale CAD-Exportfile manuell zu importieren und für über die Kostenrechnung hinausgehende Berechnungen, wie z.B. zur Auslegung von Maschinenelementen heranzuziehen. Für die Zukunft ist für das CAD-System auch ein Modul zum Import des CAD-Exportfiles angedacht. Somit ließen sich über Berechnungen optimierte Werte wieder in das CAD-System zurückspielen und könnten zur Steuerung eines parametrischen Modells herangezogen werden. Dieses Verfahren würde den Konstruktionsregelkreis weiter verkürzen.

7 Exemplarische Anwendung

7.1 Beispielszenario

In den folgenden Abschnitten sollen die bereits vorgestellten vorbereitenden Schritte, die eine konstruktionsbegeleitende Kalkulation ermöglichen, anhand einer exemplarischen Anwendung der Kalkulationsmethoden näher verdeutlicht werden. Auf die Berechnung einer Beispielmachine muß aus Vertraulichkeitsgründen verzichtet werden. Es wurde allerdings versucht durch die Darstellung von relativen Schätzfehlern die Tauglichkeit der Methoden zu untermauern.

Die Datenanalyse und -aufbereitung erfolgt dabei für Horizontalbearbeitungszentren (vgl. Abb. 7.1), wobei der Fokus der Betrachtung auf der Ständerbaugruppe mit ihren Vorschubeinheiten liegt.

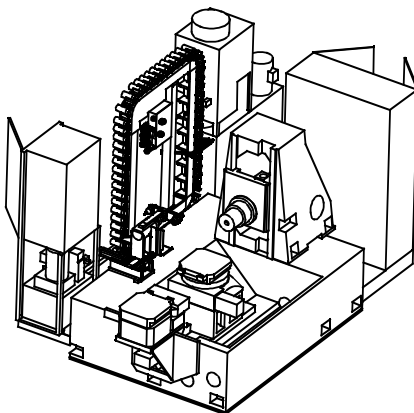


Abbildung 7.1: Horizontalbearbeitungszentrum

Das Vorgehen entspricht dem in Kapitel 5 vorgestellten Verfahren. Als erster Schritt wird für den zu kalkulierenden Maschinentyp eine ABC-Analyse mit den vorhandenen Daten von Vorgängervarianten durchgeführt. In diesem Fall wurden für die Ständerbaugruppe von Horizontalbearbeitungszentren folgende Komponenten als A-Teile, und damit als kostentreibend, erkannt (vgl. auch Abb. 5.10):

1. Ständer
2. Servomotoren
3. Kugelgewindetrieb
4. Zahnriemenscheiben

7 Exemplarische Anwendung

5. Axiallager
6. Längenmeßsystem
7. Führungsschiene
8. Führungswagen

In den folgenden Schritten werden für die erkannten A-Teile je nach Kalkulationstiefe, und Konstruktionsphase nach unterschiedlichen Verfahren Kalkulationsmethodiken entwickelt und dem Konstrukteur für eine spätere konstruktionsbegleitende Kalkulation von Ständerbaugruppen bereitgestellt (vgl. Abb. 7.2).

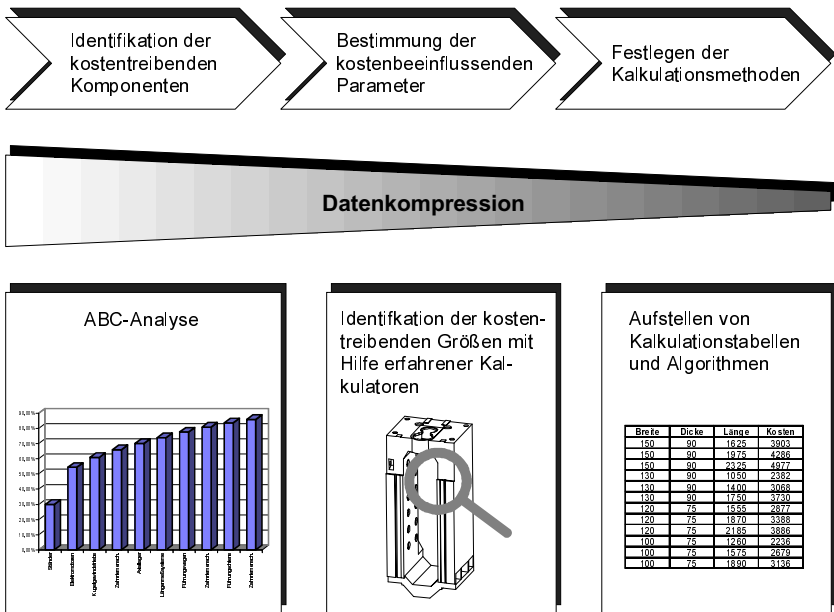


Abbildung 7.2: Vorgehen bei der Methodenentwicklung

7.2 Herstellkosten von Kaufteilen

Nach der Identifizierung der A-Teile werden auf das Objekt abgestimmte Kalkulationsmethoden entwickelt. Zunächst werden mit Hilfe von erfahrenen

Kalkulatoren die stark kostenbeeinflussenden Größen der jeweiligen Bauteile bestimmt (vgl. Tabelle 7.1).

Maschinenteil	Eigen-/Kaufteil	Kosteneinflußparameter
Ständer	Eigenteil	vgl. Abschnitt 7.2-7.4
Servomotor	Kaufteil	Leistung, Drehmoment, Drehzahl, Schutzklasse
Kugelgewindetrieb	Kaufteil	Länge, Durchmesser, Steigung
Zahnriemenscheibe	Kaufteil	Durchmesser, Breite
Axiallager	Kaufteil	Bohrungsdurchmesser, Lagertyp, Drehzahl
Längenmeßsystem	Kaufteil	Länge, Auflösung, Kapselung
Führungsschiene	Kaufteil	Länge, Größe
Führungswagen	Kaufteil	Größe, Länge, Bauart, (Genauigkeitsklasse)

Tabelle 7.1: Kosteneinflußparameter

Die in der Tabelle angegebenen kostenbestimmenden Größen müssen nicht in allen Werkzeugmaschinenunternehmen die alleinigen Kostentreiber sein. So können beispielsweise in Betrieben, die eine Vielzahl unterschiedlichster Kugelgewindespindeln verwenden, zusätzliche Parameter wie Bauart der Kugelumlafmutter, Güte des Kugelgewindetriebs oder Anzahl der Lagersitze hinzukommen.

Für typische Kaufteile wie Führungsschienen, Lager usw. lassen sich die kostentreibenden Parameter in der Regel einfach aus den Katalogen ablesen, in eine Kostentabelle umsetzen und in der Datenbank des EDM/PDM-Systems implementieren. Auf die Darstellung eines Beispielherstellkostenkatalogs wird an dieser Stelle verzichtet, da die Einkaufspreise aufgrund der unterschiedlichen Abnahmemengen in den einzelnen Betrieben sehr stark schwanken. Für Kaufteile ist normalerweise dieses Verfahren mit dem geringsten Aufwand verbunden. In Ausnahmefällen von Kaufteilen, die in beliebigen Größen oder Längen erhältlich sind, kann sich auch das Aufstellen von Kostenfunktionen mit Hilfe der Regressionsrechnung lohnen, da mit einer solchen Berechnungsvorschrift alle Fälle erfaßt werden können und komplizierte

Interpolationen zwischen Tabellenwerten vermieden werden können. Das Vorgehen wird am Beispiel von Eigenfertigungsteilen in den nächsten Abschnitten gezeigt.

7.3 Herstellkosten von Eigenfertigungsteilen

Auch für das Aufstellen von Kostenfunktionen mittels Regressionsrechnung ist das Bestimmen der kostentreibenden Parameter wichtige Voraussetzung. In diesem Beispiel soll aus einer Reihe von Graugußständen eine Kostenfunktion zur Abschätzung der Herstellkosten für die frühe Konzeptphase entwickelt werden (vgl. Abb. 7.3).

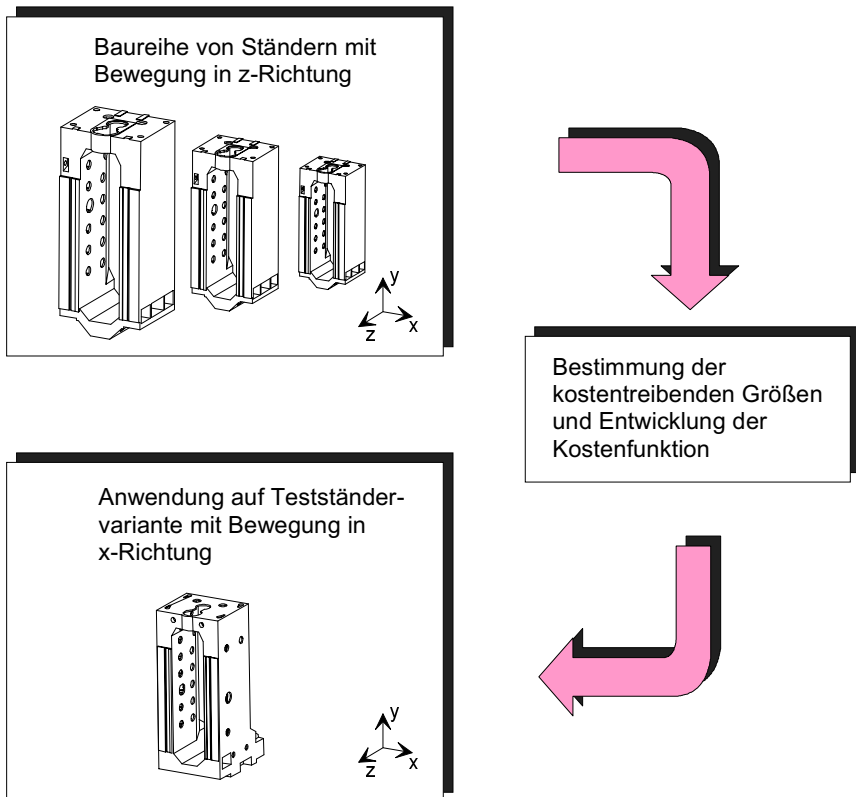


Abbildung 7.3: Entwicklung von Kostenfunktionen mittels Regressionsrechnung

Während in den Betrieben in dieser Phase häufig mit der Gewichtskostenkalkulation gearbeitet wird, soll hier versucht werden, die Herstellkosten rein aufgrund geometrischer Größen zu bestimmen, um so bereits eine Kostenabschätzung mit den noch nicht ausgehöhlten Gestellkomponenten durchführen zu können. In diesem Fall soll ein Funktionszusammenhang zwischen den Herstellkosten HK eines Gußständers und seiner Führungsbahnlänge l_y in y -Richtung aufgezeigt werden. Diese Länge beeinflusst maßgeblich die Höhe und damit auch die Masse des Ständers und ist darüber hinaus sicherlich für einen großen Teil der Bearbeitungszeit und damit der Fertigungskosten verantwortlich, so daß ein Zusammenhang $HK \sim l_y$ vermutet werden kann.

Der lineare Ansatz $HK = a l_y$ führte in diesem Beispiel bei der Durchführung der Regressionsanalyse zu folgendem Ergebnis:

$$a = 7,27699491$$

$$\text{Bestimmtheitsmaß } B = 0,83660588$$

$$F_{krit} = 0,00262448$$

$$P\text{-Wert für } a = 1,5606E-07$$

Der Wert des Bestimmtheitsmaßes der Regression ist mit 0,84 nicht gut aber für eine grobe Abschätzungsformel noch akzeptierbar. Der kritische F -Wert liegt mit 0,3% Irrtumswahrscheinlichkeit, daß der gefundene Zusammenhang zufällig ist, äußerst niedrig. Ebenso wird die Erklärungskraft des Koeffizienten a aus dem t-Test mit nahezu 100% ($= 1-P$) berechnet.

Eine Genauigkeitsanalyse der mit der Regressionsformel ermittelten Schätzwerte im Vergleich mit den tatsächlich aufgetretenen Kosten zeigt Abbildung 7.4. Obwohl der relative Fehler der Herstellkostenabschätzung für den Testständer *Test*¹⁷ mit 5,4% sehr niedrig ist, wird in dem Diagramm deutlich, daß die Streuung aller Fehler relativ hoch ist und die Formel deshalb nur für eine grobe Abschätzung einsetzbar ist. Für genauere Kostenabschätzungen muß deswegen eine getrennte Betrachtung von Material- und Fertigungskosten durchgeführt werden und ggf. ein tieferer Betrachtungslevel gewählt werden, um so die konstruktiven Änderungen aufgrund der Variation der Kinematik entsprechend berücksichtigen zu können.

¹⁷ Die Daten für den Testständer wurden nicht für die Ermittlung der Regressionsfunktion herangezogen, so daß das Ergebnis einer Kalkulation dieser Komponente dem Resultat der Kalkulation einer Variante gleicht.

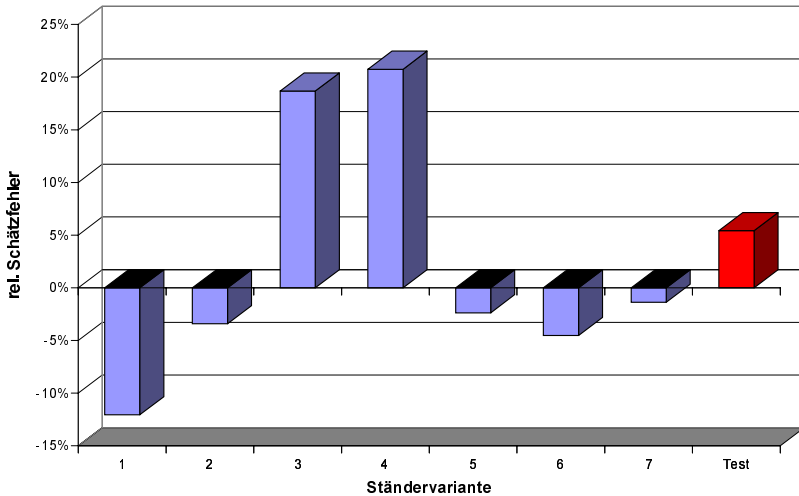


Abbildung 7.4: *Vergleich der Herstellkosten eines Gußständers mit den geschätzten Herstellkosten*

7.4 Materialkosten von Eigenfertigungsteilen

Im nächsten Schritt der Entwicklung von Kalkulationsvorschriften, sollen in diesem Beispiel die Materialkosten von Gußkomponenten abgeschätzt werden. Ziel ist es, sowohl eine Formel für die frühe Konstruktionsphase als auch eine Funktion für die spätere Entwurfsphase zu entwickeln. Es wird dabei ein Schätzfehler von weniger als 10% angestrebt. Gerade im Fall der Materialkostenabschätzung von Gußkomponenten können statistische Verfahren wie die Regressionsrechnung sinnvoll eingesetzt werden, da Gußwerkstücke in der Regel Fremdbezugsteile sind. Eine analytische Kostenberechnung ist nicht möglich, da die einzelnen Arbeitsprozesse und deren Kalkulation nicht bekannt sind.

In der Konzeptphase besteht häufig das Problem, daß der Hauptkosteneinflußparameter, die Masse, noch nicht bekannt ist. In einigen Werkzeugmaschinenbetrieben wird deshalb bei der Materialkostenabschätzung wie folgt vorgegangen:

Aus den Daten bereits gebauter Gestellkomponenten wird für jede Komponentenkategorie (z.B. Maschinenstände, Maschinenbett usw.) ein Füllgrad F bestimmt. Dieser Füllgrad ist der Durchschnittswert aus dem Verhältnis von Volumen V zu Hüllvolumen V_u .

$$F = \frac{V}{V_u}$$

Zusammen mit der Werkstoffdichte ρ und einem für die Komponentenklasse ermittelten Materialkostensatz mk lassen sich dann die Materialkosten MK wie folgt berechnen:

$$MK = mk \cdot \rho \cdot F \cdot V_u$$

Dieses Verfahren unterstellt für jede Komponentenklasse einen konstanten Füllgrad und Materialkostensatz. Die Erfahrung zeigt aber, daß insbesondere der Füllgrad auch innerhalb einzelner Klassen mit zunehmenden Hüllvolumen degressiv abnimmt. Deshalb soll in dieser Arbeit aus den Daten verschiedener Gußkomponenten (Ständer, Betten) mittels einer nicht linearen Regression eine Formel für einen Zusammenhang zwischen Materialkosten und Hüllvolumen hergeleitet werden. Es wurde folgender Ansatz gewählt:

$$MK = a \cdot V_u^b$$

Nach einer logarithmischen Transformation wurde mittels linearer Regression für die Beispieldaten folgendes Ergebnis ermittelt (vgl. auch Anhang 10.3.2):

$$a = 0,00914706; b = 0,61330417$$

$$\text{Bestimmtheitsmaß } B = 0,96483467$$

$$F_{krit} = 4,3316E-10$$

$$P\text{-Wert für } a = 3,11636E-05; P\text{-Wert für } b = 4,33161E-10$$

Das Ergebnis ist grafisch in Abbildung 7.5 dargestellt. Für jeden Wert wurden 10%-Fehlerindikatoren eingetragen. Die maximalen relativen Fehler liegen bei ca. 15%. Auch der Testständer aus dem vorigen Abschnitt (4. Wert in Diagramm) zeigt einen relativ hohen Fehler. Der Grund liegt in der veränderten Kinematik, die eine Abstützung in y-Richtung erforderlich machte und sich der Ständer dadurch nicht mehr so kompakt bauen ließ wie seine Vorgängervarianten.

In den späteren Konstruktionsphasen, in denen die Gestellkomponenten bereits ausreichend detailliert sind und insbesondere bereits ein guter Anhaltswert für die zu erwartende Masse zur Verfügung steht, können Regressionsformeln mit höherer Genauigkeit entwickelt werden. In diesem Beispiel soll versucht werden, inwiefern Regressionsformeln aus der Literatur verwendet und ggf. an den eigenen Bedarf angepaßt werden können.

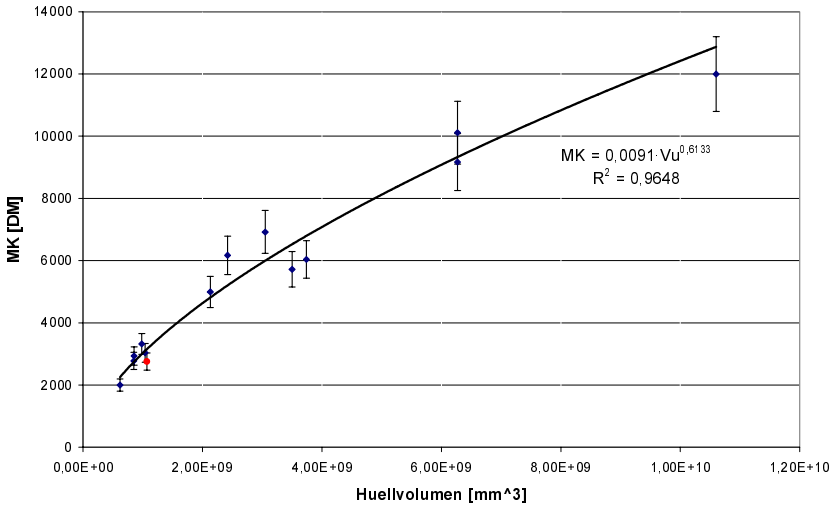


Abbildung 7.5: Kostenfunktion: Materialkosten in Abhängigkeit vom Hüllvolumen

Für die Abschätzung von Gußteilen hat PACYNA 1980 bereits eine Formel vorgeschlagen, die mittels Regression entwickelt worden ist. Mit ihr kann der zu erwartende Preis P von handgeformten Gußwerkstücken in Abhängigkeit von einigen geometrischen Kennwerten (u.a. Volumen V), Losgröße n , Zahl der Kerne Z_K , Zugfestigkeit R_m und einem Schwierigkeitsfaktor S_S berechnet werden. Im Jahr 1995 wurde die Formel von HAASIS (1995) über einen Korrekturfaktor an das neue Preisniveau angepaßt.

$$P = 0,71 \cdot 7,1479 \cdot n^{-0,0782} \cdot V^{0,8179} \cdot G^{-0,1124} \cdot D^{0,1655} \cdot V_p^{0,1786} \cdot Z_K^{0,0387} \cdot R_m^{0,2301} \cdot S_S$$

Im Vorfeld der Berechnung der Materialkosten für ein Gußteil nach dem Verfahren von Pacyna ist es erforderlich drei Gestaltungsmerkmale zu ermitteln, die meist unter dem Oberbegriff Sperrigkeit zusammengefaßt werden. Diese Größen sind ohne gießtechnisches Wissen leicht aus der Geometrie des dreidimensionalen Modells abzuleiten.

Gestrecktheit:
$$G = \frac{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt[3]{V}}$$

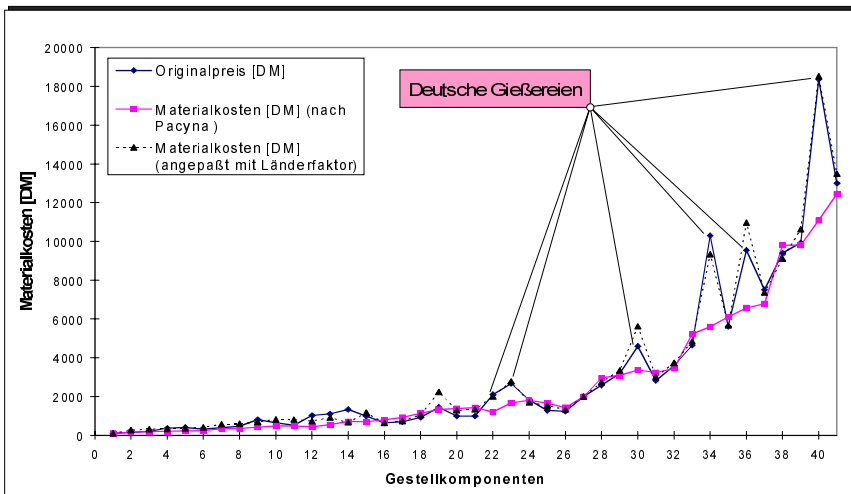
Dünnwandigkeit:
$$D = \frac{\sqrt[3]{V}}{d_m}$$

Verpackungssperrigkeit: $V_p = \frac{a \cdot b \cdot c}{V}$

mit

a, b, c als Hauptabmessungen des Hüllquaders
 d_m als mittlere Wandstärke

Um die Güte der Formel zu überprüfen, wurden ca. 40 Testdaten von Werkzeugmaschinenkomponenten erhoben, mit der Regressionsformel nach Pacyna und Haasis die Preise abgeschätzt und mit den real bezahlten Preisen verglichen. Der Vergleich der Kurven „Originalkosten“ mit „Materialkosten nach Pacyna“ in Abbildung 7.6 zeigt, daß die Formel auch heute noch recht gut zur Preisermittlung in der Entwurfsphase eingesetzt werden kann. Allerdings zeigen sich bei einer Reihe von Gestellkomponenten (z.B. Nr. 30, 34, 40) erhebliche Ausreißer. Eine genauere Untersuchung der Unterlagen ergab, daß die Originalpreise je nach Gießerei um das bis zu 1,5-fache vom Schätzwert variieren können. Eine Zuordnung der Gußkomponenten zu ihrem Herstelland zeigte, daß in *diesem* Beispiel die großen Abweichungen fast ausschließlich bei deutschen Gießereien auftraten.



Land	Spanien	Tschechien	Deutschland
Länderfaktor	1,04	0,93	1,62

Abbildung 7.6: Berechnung von Gußkosten mittels Regressionsformeln

7 Exemplarische Anwendung

Um die Genauigkeit der Gußkostenabschätzung zu erhöhen ist die Neuentwicklung einer Formel bzw. eine Anpassung der Pacyna-Formel notwendig. Ein neuer Regressionsansatz mit einer zusätzlichen Größe „Herstelland“ ist nicht möglich, da mit der Regressionsrechnung nur kardinale Merkmale und nicht nominale Merkmale berücksichtigt werden können¹⁸. Deshalb wird hier versucht für die einzelnen Herstellländer Korrekturfaktoren zu ermitteln und so die Pacyna-Formel anzupassen. Zur Bestimmung der Länderfaktoren wurde folgender Ansatz gewählt:

Der neue Schätzpreis P_{f_L} berechnet sich aus dem um einen Länderfaktor f_L korrigierten Preis P der Pacyna-Formel.

$$P_{f_L} = f_L \cdot P$$

Die neuen Schätzwerte sollen vom Originalpreis P_{Orig} so wenig wie möglich abweichen, d.h. die Residuenquadratsumme muß minimal sein („Methode der kleinsten Fehlerquadrate“).

$$\sum (P_{Orig} - P_{f_L})^2 \rightarrow \min$$

$$\frac{\partial}{\partial f_L} \left[\sum (P_{Orig} - P \cdot f_L)^2 \right] = 0$$

Löst man diesen Ansatz nach dem Länderfaktor auf, so berechnet sich f_L für jede Datenreihe eines Landes wie folgt:

$$\Rightarrow f_L = \frac{\sum (P_{Orig} \cdot P)}{\sum P^2}$$

Für die im Beispiel vorkommenden Herstellländer ergaben sich die Länderfaktoren f_L

1,04 für Spanien

0,93 für Tschechien

1,62 für Deutschland

Die abgewandelte Formel nach Pacyna/Haasis lautet damit:

$$P_{f_L} = f_L \cdot 0,71 \cdot 7,1479 \cdot n^{-0,0782} \cdot V^{0,8179} \cdot G^{-0,1124} \cdot D^{0,1655} \cdot V_P^{0,1786} \cdot Z_K^{0,0387} \cdot R_m^{0,2301} \cdot S_S$$

¹⁸ vgl. Abschnitt 5.2.2.1

Wie Abbildung 7.6 zeigt, paßt sich die um die Länderfaktoren korrigierte Kurve der Originalpreiskurve deutlich besser an. Einen quantitativen Vergleich erlaubt Abbildung 7.7. Sie zeigt die klare Verbesserung der Kalkulationsergebnisse für die großen Gußteile wie Maschinenbetten und Ständer, wenn auch das Ziel nicht vollständig erreicht wurde. Ursache hierfür ist, daß gerade im Gießereiwesen die Preise sehr stark durch die jeweilige wirtschaftliche Situation und die Auslastung der jeweiligen Gießerei bestimmt werden.

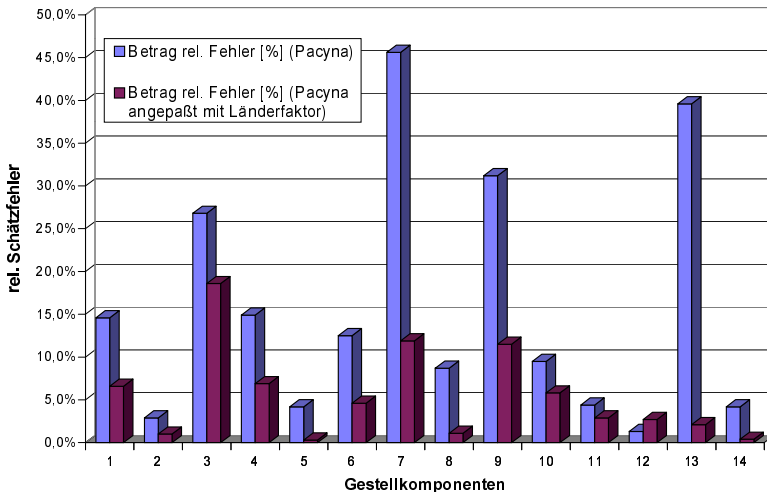


Abbildung 7.7: Vergleich der relativen Schätzfehler zwischen der angepaßten und unangepaßten Pacyna-Formel

7.5 Fertigungskosten von Eigenfertigungsteilen

7.5.1 Abschätzung über Regressionsformeln

Neben der Materialkostenbestimmung ist auch die Kalkulation der Fertigungskosten *FK* ein wichtiger Bestandteil der Herstellkostenabschätzung. In der Konzeptphase kann wieder ein globaler Ansatz für die Kostenfunktion verwendet werden. In diesem Beispiel der Arbeit zeigt der folgende Ansatz bereits ein recht brauchbares Ergebnis (vgl. Abb. 7.8):

7 Exemplarische Anwendung

$$FK = a + b \cdot l_y$$

mit den Regressionskennwerten

Bestimmtheitsmaß $B = 0,90793692$

$F_{krit} = 0,01220004$

P -Wert für $a = 0,05109396$; P -Wert für $b = 0,01220004$

Die Fertigungskosten FK werden in Abhängigkeit von der Führungsbahnlänge l_y berechnet. Das konstante Glied a läßt sich dabei als der Teil der Fertigungskosten interpretieren, der von der Führungsbahnlänge unbeeinflußt bleibt, wie z.B. die Bearbeitungskosten für die Anflanschfläche der Vorschubeinheit in y -Richtung.

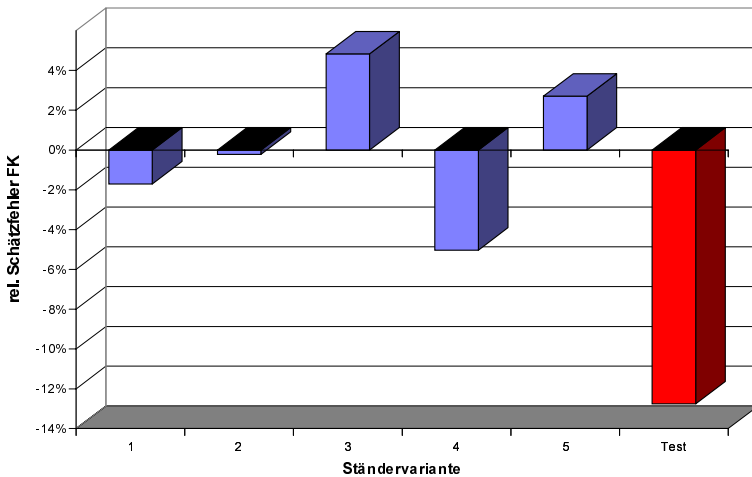
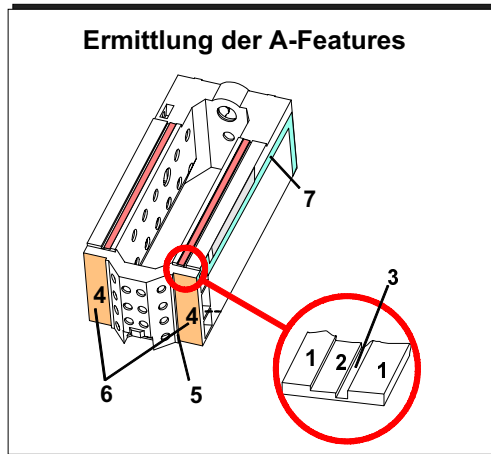


Abbildung 7.8: *Vergleich der Fertigungskosten eines Gußständers mit den global geschätzten Fertigungskosten*

Eine genaueres Ergebnis ist über eine detailliertere Berechnung möglich. Um den Vorbereitungsaufwand so gering wie möglich zu halten, wird auch hier von dem ABC-Verhalten der Fertigungszeiten Gebrauch gemacht. Wie bereits in Abbildung 5.7 gezeigt, wird die gesamte Fertigungszeit von wenigen kostentreibenden Bearbeitungsfeatures verursacht. Aus einer Analyse detaillierter Arbeitspläne oder NC-Programme lassen sich die jeweiligen Bearbeitungszeiten für die einzelnen Konstruktionsfeatures bzw. ihrer Teilelemente bestimmen und Funktionen zur Fertigungszeitermittlung in Abhängigkeit weniger Einflußgrößen entwickeln (vgl. Abbildung 7.9).



Bestimmung der Fertigungszeit beeinflussenden Merkmale und Wahl des Regressionsansatzes

Gesamfeature	Teilelement	Merkmal X1	Merkmal X2	Ansatz
Führungsbahn FB	1: FB Fläche	FB-Länge	vf	pot.
	2: FB Aussparung schrappen	FB-Länge	-	linear
	2: FB Aussparung schichten	FB- Länge	vf	pot.
	2: FB Bohrungen + Gewinde	Bohrungsanzahl	Durchmesser	linear
	3: FB Nut schrappen	FB-Länge	vf	pot.
	3: FB Nut schichten	FB-Länge	vf	pot.
Schuh S	4: Schuhflächen schrappen	Fläche	vf	pot.
	4: Schuhfläche schichten	Fläche	-	linear
	5: Anschlagleiste schrappen	Tiefe	vf	pot.
	5: Anschlagleiste schichten	Tiefe	vf	pot.
Seitliche Leisten SL	6: Bohrungen + Senkungen	Bohrungsanzahl	-	pot.
	7: SL fräsen	SL-Länge	vf	pot.
	7: SL Bohrungen + Gewinde	Bohrungsanzahl	-	linear
Gesamtzeit	Rest-Features (B+C)	Einzelzeit FB+S+SL	-	linear

Durchführung der Regression

Linearer Ansatz: $t_e = a + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2$

Potentieller Ansatz: $t_e = 10^a \cdot x_1^{b_1} \cdot x_2^{b_2}$

Abbildung 7.9: Abschätzung der Fertigungskosten auf Featurebasis

7 Exemplarische Anwendung

Die Fertigungskosten FK berechnen sich aus der Rüstzeit t_r , der Brachzeit t_b und der Verteilzeit t_v sowie aus der Durchführungzeit $t_D = t_h + t_n$ (Haupt- und Nebenzeit) wie folgt:

$$FK = (t_r + t_h + t_n + t_b + t_v) \cdot k_{\text{Platz}}$$

Während die Rüstzeit mit einem typbezogenen konstanten Wert und die Brach- und Verteilzeit mit konstanten Zuschlagsätzen angesetzt werden können, wird für die Kalkulation der Gesamtdurchführungzeit t_D auf die vorbereiteten Regressionsformeln zurückgegriffen. Die Durchführungzeit t_D berechnet sich aus der Summe der Durchführungzeiten $t_{D,i}$ für die jeweiligen Konstruktionsfeatures zuzüglich eines Korrekturwertes t_{BC} für die nicht berücksichtigten Zeiten der B- und C-Features.

$$t_D = t_{BC} + \sum_i t_{D,i}$$

Häufig bestimmen sich die Bearbeitungszeiten der Konstruktionsfeatures nicht direkt über Funktionsgleichungen sondern über die Bearbeitungszeiten ihrer Teilelemente $t_{D,jk}$ (vgl. Abb. 7.9).

$$t_{D,i} = \sum_k t_{D,jk}$$

Die Berechnung der $t_{D,jk}$ erfolgt mit den für jedes Teilelement hergeleiteten Regressionsformeln.

Abbildung 7.10 zeigt für das Beispiel aus Abbildung 7.3 den relativen Schätzfehler bei der Kalkulation der Fertigungskosten auf Featurebasis im Vergleich mit den Schätzfehlern aus der globalen Regression (Abb. 7.8). Insbesondere das Ergebnis für die Variante „Test“ zeigt durch die differenzierte Betrachtung ein deutlich besseres Ergebnis. Das Ziel, eine maximale Abweichung von 10% nicht zu überschreiten wird in diesem Beispiel mit einem maximalen Schätzfehler von 3,3% übererfüllt.

Vor der praktischen Durchführung der Regressionsanalyse steht ein nicht zu unterschätzender Aufwand bei der Datenerhebung, d.h. bei der Analyse der NC-Programme. Um in dieser Phase mit minimalem Aufwand die benötigten Bearbeitungszeiten auslesen zu können, sollte bereits bei der Programmierung eine spätere effiziente Datenauswertung vorbereitet werden. Komplexe NC-Programme zur Fertigung von Gestellkomponenten werden auch heute schon aus einzelnen Bearbeitungsmodulen aufgebaut. Eine Kennzeichnung der einzelnen Fertigungsteilelemente mit festen Schlüsselwörtern in einer Kommentarzeile würde eine programmgesteuerte Auswertung ermöglichen und so zu einer erheblichen Verminderung des Vorbereitungsaufwandes führen.

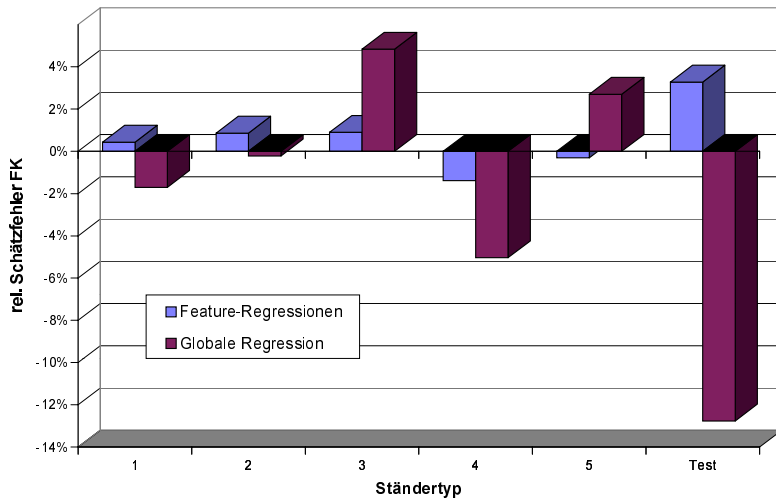


Abbildung 7.10: Rel. Schätzfehler bei Abschätzung der Fertigungskosten auf Featurebasis

7.5.2 Abschätzung über NC-Simulation

Als weitere Möglichkeit der Fertigungskostenberechnung wurden kombinierte CAD-NC-Modellbausteine mit anschließender Auswertung der NC-Simulationsergebnisse herangezogen. Dies ist allerdings meist nur bei Komponenten möglich, die auch spanend bearbeitet werden. Das Verfahren gliedert sich dabei im wesentlichen in zwei Hauptphasen,

1. der Vorbereitungsphase mit

- dem Aufbau des Geometriemodellbausteins im 3D-CAD-System und
- der Erweiterung zum kombinierten CAD-NC-Modellbaustein

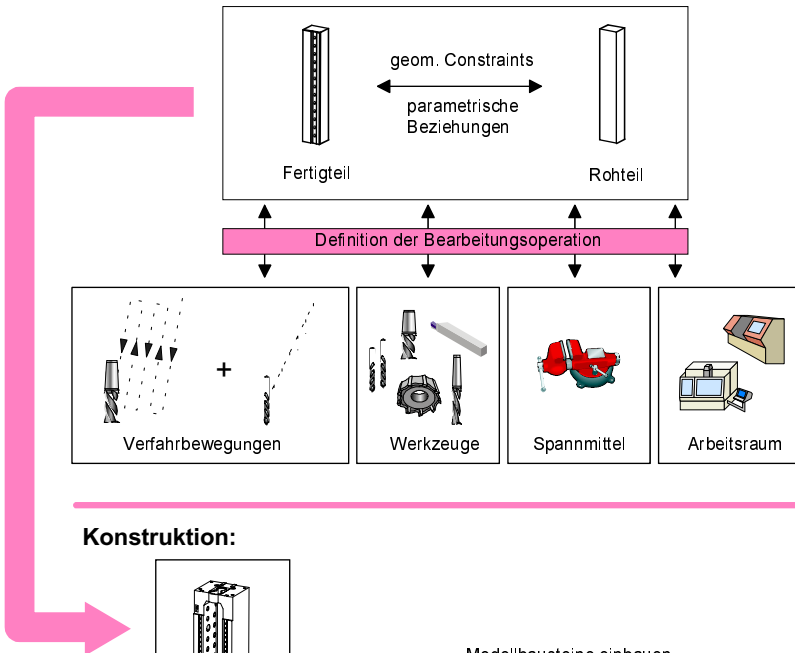
2. sowie der Konstruktions- und Kalkulationsphase

- mit dem Einbau des Modellbausteins im CAD-System,
- der Simulation und
- der anschließenden Kalkulation.

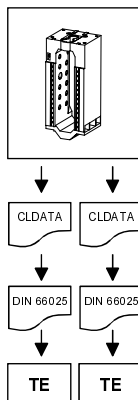
7 Exemplarische Anwendung

Die Vorbereitungsphase setzt analog der Kostenabschätzung mit Hilfe der Regressionsrechnung eine ABC-Analyse der Fertigungsschritte voraus. Die kosten-treibenden Konstruktionselemente sind in der Regel bei Gestellbauteilen auch die wichtigen Funktionselemente. Dieses Beispiel soll den Aufbau und Einsatz eines kombinierten CAD-NC-Modellbausteins für Führungsbahnflächen zur Aufnahme von Führungsschienen einer Wälzlagerführung an einem Werkzeugmaschinenständer zeigen (vgl. Abbildung 7.11).

Vorbereitung (Aufbau der Modellbausteine):



Konstruktion:



Modellbausteine einbauen
und Maße anpassen

Über Simulation CLDATA-Files erzeugen

NC Steuerprogramm nach
DIN 66025 erzeugen

Einzelzeiten auslesen und dem
Kalkulationsprogramm übergeben

Abbildung 7.11: Konstruktion und Kalkulation mit kombinierten CAD-NC-Modellbausteinen

Der erste Teilschritt ist der Aufbau eines konventionellen Geometriemodellbausteins mit allen wichtigen Auflage- und Anschlagflächen sowie den Gewindebohrungen für die Befestigung der Führungsschiene. Für den Ausbau zu einem NC-Modellbaustein ist es notwendig ein „virtuelles“ Hilfsrohteil zu generieren und in Beziehung zum Fertigteil, dem zu Beginn modellierten Geometriemodellbaustein, zu setzen. Die Definition von Bezugsflächen oder -achsen sowie ggf. von Beziehungsgleichungen zwischen den beiden Modellen erlauben beim späteren Anpassen der Einbaumaße eine automatische Anpassung des Rohteils und damit eine Sicherstellung der Funktionsfähigkeit als NC-Modellbaustein. Das Rohteil selbst hat für die Kostenkalkulation keine weitere Bedeutung; es wird lediglich für die sich anschließende Definition der Fräsbearbeitung benötigt und muß deshalb die Aufmaße an den Führungsbahnstellen des „echten“ Rohteils, des Gußständers, wiedergeben.

Die nächsten Teilschritte im Aufbau der NC-Bearbeitung sind die Auswahl des Arbeitsraumes, der Spannmittel, der Werkzeuge und schließlich die Definition der Bearbeitungsschritte. Während die ersten Teilschritte für eine Simulation mit Blickrichtung „Kostenabschätzung“ eine untergeordnete Rolle spielen (sie sind vor allem für eine Kollisionskontrolle von Bedeutung), ist auf die Auswahl der Verfahrenwege durch das NC-Simulationssystem besonders zu achten. Da die Bearbeitung von hochgenauen Führungsbahnen ein besonderes Know-how verlangt, bedürfen die automatisch generierten Standardzyklen in der Regel einer Nachbearbeitung von Hand.

Die fertig definierten CAD-NC-Modellbausteine können anschließend zu einer Bibliothek zusammengestellt werden und in der Konstruktion neuer Gestellkomponenten ähnlich wie die bekannten Modellsammlungen von DIN-Teilen eingesetzt werden. Beim Einbau der Modellbausteine sind dabei folgende Schritte notwendig bzw. werden vom CAD/CAM-System automatisch durchgeführt:

1. Einfügen der Modellbausteine mit Hilfe der vordefinierten Einbaureferenzen. Im verwendeten CAD-System ProEngineer wurden die Bausteine als Komponente einer Baugruppe eingebaut. In diesem Fall ist ein sich anschließender Merge-Befehl notwendig, um so eine Baugruppe von Grundkörper und Features zu einem Gesamtteil zu verschmelzen und somit ein sinnvolles CAD-Datenmodell zu gewährleisten.
2. Anpassen der Hauptabmessungen an die neue Konstruktion.
3. Über die Parametrik werden jeweils das „virtuelle Rohteil“ und, wie im Fall der Führungsbahn, auch die Anzahl der Bohrungen automatisch angepaßt.

7 Exemplarische Anwendung

4. Starten der NC-Simulation für die jeweiligen Modellbausteine. Abbildung 7.12 zeigt die Simulationsphase für den Modellbaustein „Führungsbahn“ im CAD/CAM-System ProEngineer.

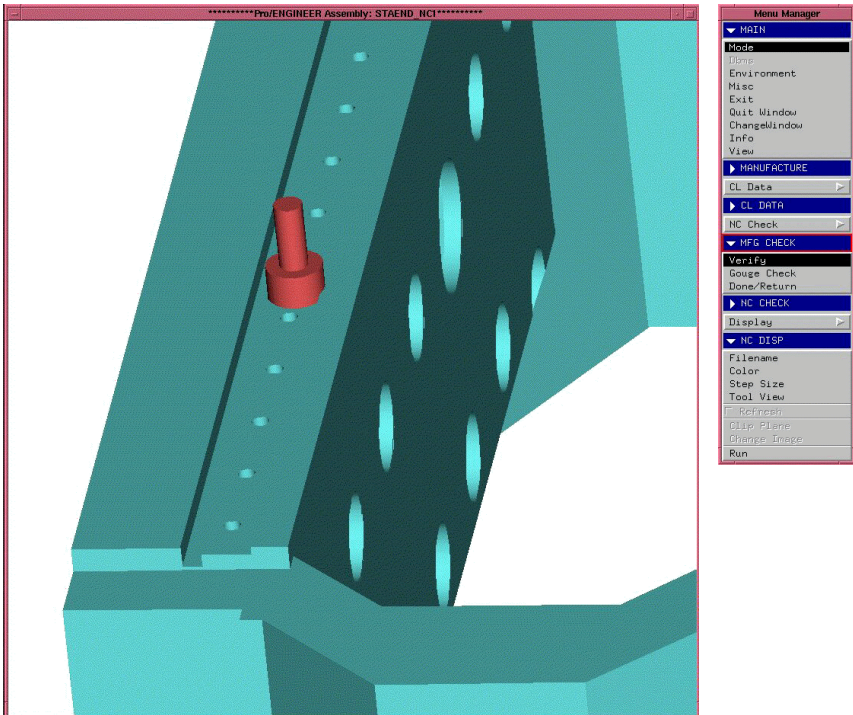


Abbildung 7.12: NC-Simulation der Führungsbahnbearbeitung in ProEngineer

5. Erzeugung der NC-Steuerprogramme nach DIN aus den mit Hilfe der Simulation generierten CLDATA-Files (vgl. Abbildung 7.13). Voraussetzung ist sowohl ein NC-Postprozessor, der einen kommentierten DIN-Code erstellen kann, als auch ein vorheriges Einstellen der Maschinenparameter wie Eilgangsgeschwindigkeit, Werkzeugwechselzeit usw. in den entsprechenden Dateien.
6. Auswertung der Einzelzeiten mit Hilfe des erzeugten und kommentierten DIN-NC-Codes. Die gesamte Durchführungszeit $t_{D,ges}$ läßt sich mit der Formel.

$$t_{D,ges} = \sum (t_{Rapid} + t_{Feed} + t_{Misc})$$

berechnen. Die Fertigungskosten FK für den gesamten Maschinenständer berechnen sich analog mit den in Abschnitt 7.5.1 gezeigten Formeln. Bei der praktischen

Durchführung der Kostenkalkulation aus NC-Simulationsergebnissen wird diese Aufgabe von einem Kostenberechnungsobjekt, wie es in Kapitel 6 vorgestellt wurde, übernommen.

NC CONTROL CODE	X AXIS	Y AXIS	Z AXIS	TIP	VEL	RPM	TIME
N0298 X622.5 Z85. GOTO/675,93,85	622.500	93.000	87.000	100	1000.0		00:37:40
N0299 X675. Z85. GOTO/727.5,93,85	675.000						00:38:29
N0300 X727.5 Z85. GOTO/780,93,85	727.500						00:39:17
N0301 X780. Z85. GOTO/832.5,93,85	780.000						00:40:06
N0302 X832.5 Z85. GOTO/885,93,85	832.500						00:40:55
N0303 X885. Z85. GOTO/937.5,93,85	885.000						00:41:44
N0304 X937.5 Z85. GOTO/990,93,85	937.500						00:42:32
N0305 X990. Z85. CYCLE/OFF RAPID	990.000						00:43:21
N0306 G80 GOTO/990,93,85		0					
N0307 G0 Z85. SPINDL/OFF		85.000	10160				00:43:21
N0308 M05 FINI			0	0.0			
N0309 X0. Y0. N0310 Z0.	0.000	0.000	10205				00:43:27
N0311 M02		0.000	10160				00:43:28
			0				
SECTION TIME 00:15:39 RAPID 00:00:27 FEED 00:15:12 MISC 00:00:00							
TOOL TRAVEL SUMMARY:							
AXIS	MINIMUM	MAXIMUM	TOTAL				
X	0.000	1035.000	1035.000				
Y	0.000	150.000	150.000				
Z	0.000	87.000	87.000				
MACHINING TIME SUMMARY:							
TYPE	HH:MM:SS	PERCENT					
RAPID	00:00:53	2.028					
FEED	00:42:35	97.972					
MISC	00:00:00	0.000					
TOTAL	00:43:28						

Abbildung 7.13: Ausschnitt aus kommentierten NC-DIN-Code mit Zeitangaben

Abbildung 7.13 zeigt nochmals, daß durch den hohen und dominierenden Hauptzeitanteil aufgrund der relativ langsamen Vorschübe und großen Bearbeitungswege ein nach Features getrenntes Simulieren und Kalkulieren ohne explizite Berücksichtigung der Verfahrbewegungen zwischen den isoliert betrachteten Modellbausteinen möglich ist und die erzielten Fehler gering bleiben. Durch die Angleichung der Kostenabschätzungsmethode an das Verfahren der klassischen Kalkulation nähern sich die Ergebnisse in ihrer Güte einander an.

7.5.3 Abschätzung über analytisch hergeleitete Formeln

Im bisherigen Kalkulationsszenario wurden Werkzeugmaschinenständer betrachtet, die als unbearbeitete Komponente bezogen und anschließend selbst spanend bearbeitet werden. Zu kalkulieren waren daher der zu erwartende Bezugspreis der Gußkomponente (als Materialkosten) sowie die Fräs- und Bohrbearbeitung der wichtigen Funktionsflächen (als Fertigungskosten). Durch den zunehmenden Einsatz von HSC-Bearbeitung und den damit verbundenen hohen Eilgangsgeschwindigkeiten und Beschleunigungen wird auch die Forderung nach möglichst leichten Gestellkomponenten erhoben, um so die auftretenden Trägheitskräfte gering zu halten. In vielen Fällen wird versucht, dieses Ziel durch den Einsatz von Schweißkonstruktionen zu erreichen. Für die Kalkulation bedeutet dies, auch die dort zusätzlich anfallenden Kosten bei der Abschätzung der Gesamtherstellkosten mit zu berücksichtigen. Eine zentrale Bedeutung haben hierbei die Arbeitszeiten. Dies sind vor allem die Zeiten für das Brenn- oder Laserschneiden, das Heften und das Fertigschweißen der Bleche. Der Verbrauch an Schweißzusatzwerkstoffen, an Schweißhilfsstoffen (z.B. Schutzgas), an Energie und Ersatzteilen spielt eine eher untergeordnete Rolle.

Aus dieser Situation heraus sollen im folgenden Methoden zur Berechnung der Fertigungskosten bei Schweißteilen bereitgestellt werden (vgl. Abbildung 7.14). Dabei wird im wesentlichen auf die Methode der analytischen Herleitung von Kalkulationsformeln zurückgegriffen. Die Berechnungsvorschriften lehnen sich an die Berechnung nach REFA an, sind aber an die Bedürfnisse der konstruktionsbegleitenden Kalkulation angepaßt. Es soll dabei gezeigt werden, daß für spezielle Kostenarten die klassische Kostenermittlung mit kleineren Anpassungen durchaus für eine Kalkulation in der Konstruktionsphase verwendet werden kann. Die wichtigsten Eingangsgrößen sind die im 3D-CAD-Modell als Schweißnähte gekennzeichneten Kanten sowie technologische Parameter und Hilfsfunktionen, die im Betrieb als Vorgabezeiten ermittelt worden sind oder aus Literatur [AICHELE 1980;

7.5 Fertigungskosten von Eigenfertigungsteilen

AICHELE 1985] und Firmenkatalogen [OERLIKON SCHWEIßTECHNIK 1991] als Durchschnittswerte beschafft werden können.

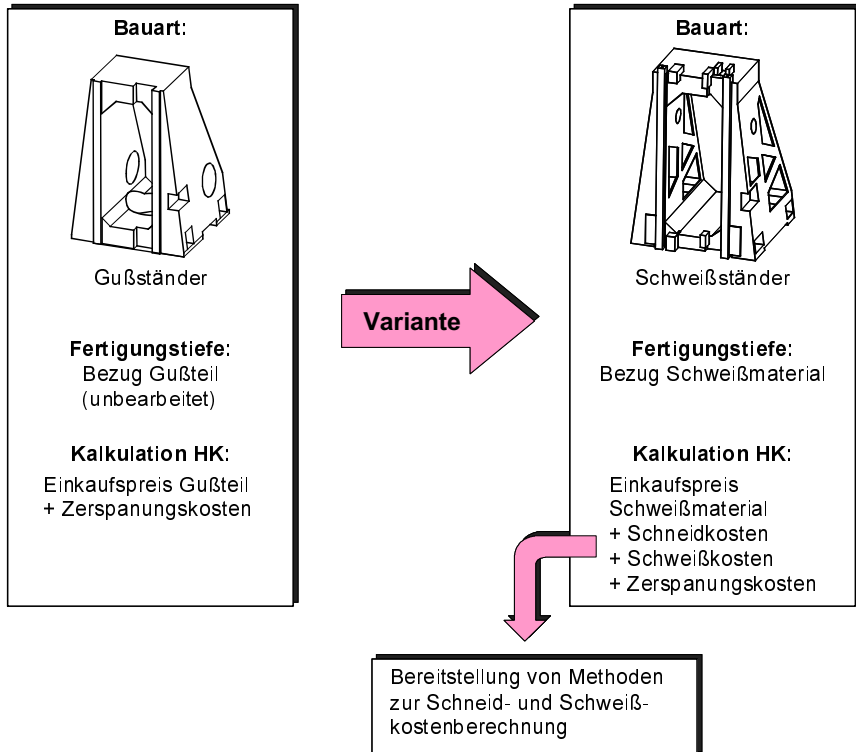


Abbildung 7.14: Bildung einer Schweißständervariante

In diesem Beispiel werden exemplarisch Formeln zur Berechnung der Schweißkosten eines Dünnschleifständers vorgeschlagen. Ein ähnlicher Ansatz kann auch für die Abschätzung von Brennschneidkosten herangezogen werden.

Die Berechnung der Fertigungskosten erfolgt über die mit einem Zuschlagssatz versehene Summe aus Rüst-, Haupt- und Nebenzeit sowie einem Platzkostensatz. Im Bedarfsfall können hierzu noch die Verbrauchskosten, beispielsweise für Elektroden oder Gas, hinzu addiert werden.

7 Exemplarische Anwendung

$$FK = (t_r + t_h + t_n) \cdot (1 + k_e + k_v) \cdot k_{Platz} + K_{Verbrauch}$$

$t_r = t_{rG}$ = Rüstgrundzeiten

k_e = Erholzeitzuschlag in %

k_v = Verteilzeitzuschlag in %

k_{Platz} = Platzkostensatz

$K_{Verbrauch}$ = Verbrauchskosten

Die Rüstzeit läßt sich aus den konstanten Rüstgrundzeiten für „Auftrag empfangen“, „Elektroden bereitlegen“ etc. ermitteln. Die Werte können z.B. in VOSS 1993 nachgeschlagen werden.

Die Hauptzeit t_h berechnet sich aus der Summe der Zeiten, die für das Schweißen einer einzelnen Naht notwendig sind. Hierzu wird die Nahtlänge aus dem 3D-CAD-Modell bzw. der Datenmodell-Exportdatei ermittelt und mit einer spezifischen Hauptzeit, die die Schweißzeit für eine 1m-Naht angibt, multipliziert.

$$t_h = \sum_i^n t_{h,i} = \sum_i^n l_i \cdot f_i^{(h)}(a_i)$$

n = Anzahl der Schweißnähte

l_i = Schweißnahtlänge der Naht i

$f_i^{(h)}(a_i)$ = Funktion zur Berechnung der spezifischen Hauptzeit [min/m] in Abhängigkeit vom Schweißnahtmaß a

Die spezifische Hauptzeit ist allerdings keine Konstante, sondern ist im wesentlichen abhängig von der Nahtart, der Schweißnahtdicke, dem Schweißverfahren, der Elektrode und der Lage der Schweißnaht. Deshalb sind in der Vorbereitungsphase Tabellen für die verwendeten unterschiedlichen Kombinationen der Einflußparameter zu erstellen. Durchschnittswerte können aus AICHELE (1980) oder OERLIKON SCHWEIßTECHNIK (1991) ermittelt werden. Um in der Kalkulation eine einfachere Handhabung der Daten zu ermöglichen, bietet sich auch die Ermittlung von Funktionen $f_i^{(h)}(a_i)$ zur Berechnung der spezifischen Hauptzeit mittels Regressionsrechnung an. Abbildung 7.15 zeigt das Ergebnis einer polynomialen Regression für das MAG-Schweißverfahren (Elektrode: DIN 8559 - SG2) für Kehl­nähte in Wannenlage.

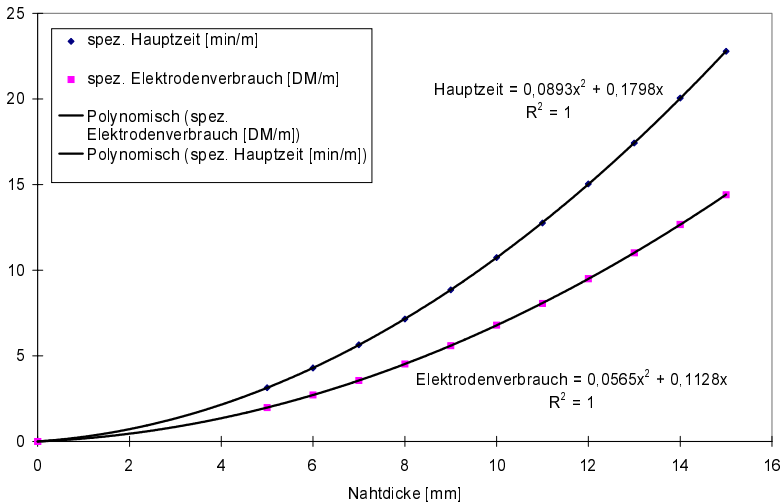


Abbildung 7.15: Funktionen zum Berechnen der spezifischen Hauptzeit und des spezifischen Elektrodenverbrauchs für das MAG-Schweißen einer Kehlnaht in Wannenlage mit DIN 8559 - SG2 Elektrode

Die zusätzlich anfallende Nebenzeit t_n berechnet sich nach folgender Formel:

$$t_n = \sum_i^n \left[\text{floor}\left(\frac{l_i}{1000\text{mm}}\right) \cdot t_{\text{Platzwechsel}} + \text{floor}\left(\frac{l_i}{1000\text{mm}}\right) \cdot n_{\text{Nahtlagen}} \cdot t_{\text{Nahtunterbrechung}} \right] + t_{\text{wenden}}$$

$t_{\text{Platzwechsel}}$ = Zeit für Platzwechsel des Schweißers aufgrund des begrenzten Aktionsradius

$t_{\text{Nahtunterbrechung}}$ = Zeit für Nahtunterbrechungen aufgrund jeder neu anzufangenden Nahtlage

t_{wenden} , Zeit für Wenden des Schweißteils, um die gesamte Konstruktion fertig schweißen zu können

$\text{floor}(x)$: Funktion bestimmt größten Integer-Wert, der kleiner als x ist (analog zur entsprechenden Funktion in der Programmiersprache C)

Richtwerte für die einzelnen Zeitanteile können z.B. bei VOSS 1993 nachgeschlagen werden. Die Anzahl der für die erforderliche Nahtdicke notwendigen Nahtlagen bestimmt sich nach Tabelle 7.2.

Nahtdicke a [mm]	Anzahl der Nahtlagen $n_{\text{Nahtlagen}}$
$a \leq 4$	1
$4 < a \leq 7$	2
$7 < a \leq 9$	3
$9 < a \leq 11$	4
$11 < a \leq 14$	5
$14 < a$	6

Tabelle 7.2: Bestimmung der Anzahl der notwendigen Nahtlagen

Sollen im Bedarfsfall die Verbrauchskosten ebenfalls abgeschätzt werden, so kann die nachstehende Formel dafür herangezogen werden. Sie setzt sich aus einem Anteil für den Elektrodenverbrauch und dem Schutzgasverbrauch zusammen. Die Funktion für den spezifischen Elektrodenverbrauch läßt sich analog zur Funktion für die Berechnung der spezifischen Hauptzeit bestimmen (vgl. Abbildung 7.15).

$$K_{\text{Verbrauch}} = \sum_i^n l_i \cdot f_i^{(E)}(a_i) + \sum_i^n (t_{h,i} \cdot Q_{\text{Gas}} \cdot k_{\text{Gas}})$$

$f_i^{(E)}(a_i)$ = Funktion zur Berechnung des spezifischen Elektrodenverbrauchs [DM/m] in Abhängigkeit vom Schweißnahtmaß a [mm]

Q_{gas} = Schutzgasverbrauch in [m³/min]

k_{Gas} = Gaskosten in [DM/m³]

7.6 Diskussion des vorgeschlagenen Kalkulationskonzepts

Wie in den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels gezeigt wurde, lassen sich mit dem in dieser Arbeit vorgeschlagenen Methodenbaukasten für die Kostenfrüherkennung in den frühen Konstruktionsphasen die Herstellkosten von Werkzeugmaschinen oder ihrer Hauptbaugruppen abschätzen. Die Genauigkeit der Kalkulationen des Beispielständers lassen sich dabei von durchschnittlich 9% Schätzfehler bei den globalen Regressionsformeln über 5% Fehler bei den nach Kostenarten spezifizierten Berechnungen bis hin zu durchschnittlich unter 2% bei den Abschätzungen der Fertigungskosten auf Featureebene angeben.

Dem Nutzen des Anwenders mit einer frühzeitig durchführbaren und ausreichend genauen Kalkulation steht allerdings ein erhöhter Aufwand in der Vorbereitung durch Mitarbeiter in der Kalkulation oder Arbeitsvorbereitung gegenüber.

Aufwand

Voraussetzungen für den Einsatz des vorgestellten Kalkulationssystems sind PDM und 3D-CAD (Solid-Modellierer). Zu berücksichtigen sind dabei anteilmäßig sowohl die Kosten für Hard- und Software, als auch die Kosten für ein relationales Datenbanksystem, wie es beim Einsatz von PDM benötigt wird. Zur Zeit sind zwar 3D-CAD und PDM in der Werkzeugmaschinenbranche noch nicht generell Standard, aber mit deren Einführung ist in den nächsten Jahren zu rechnen. Da die Hauptgründe für eine Einführung dieser Systeme sicherlich nicht bei der Kostenkalkulation liegen sind hier nur geringe Kostenanteile anzusetzen. Kosten bei der Hardware und Software für das Kalkulationstool sind im allgemeinen nicht anzusetzen, da PC und MS-Excel meist als vorhanden angenommen werden können. Das Kalkulationstool benötigt zudem eine Kopplung zum CAD (nur CAD-Export-Schnittstelle) und eine Anbindung an das PDM-System.

Wichtige Voraussetzung für eine Kostenabschätzung durch den Konstrukteur ist die vorherige ABC-Analyse der für die Kalkulation relevanten Maschinentypen sowie die Entwicklung und Implementierung der Kalkulationsalgorithmen. Diese Vorbereitungs-tätigkeiten stellen einen hohen Aufwand dar, wovon besonders die Datenerhebung genannt werden muß ist. Die zentrale Verwaltung der Daten im PDM und kontinuierlich durchgeführte vorbereitende Maßnahmen, z.B. Kennzeichnung der wichtigen Bearbeitungsschritte im NC-Programm beim Erstellen, helfen den Aufwand zu minimieren. Ein weiterer zu erwähnender Punkt ist die Dokumentation der Randbedingungen unter denen insbesondere Regressionsformeln entwickelt wurden. Ihre Gültigkeit beschränkt sich auf die Kalkulation ähnlicher Teile, weshalb das Verfahren auch nur innerhalb der Varianten- und Anpaßkonstruktion anwendbar ist.

Zusätzlich zu diesem einmaligen Aufwand ist eine ständige Daten- und Systempflege notwendig. So müssen Algorithmen und Tabellen ggf. neuen Kostenwerten und auch veränderten Bauformen angepaßt werden. Das Aktualisieren der Datenbestände ist allerdings kein Aufwand, der nur auf das Kalkulationstool zurückzuführen ist, da diese Arbeit von den Kalkulatoren ohnehin durchgeführt werden muß. Der objektorientierte Ansatz, der vom Kalkulationsprogramm getrennten Verwaltung der Berechnungsmethoden, unterstützt eine einfache Anpassung an neue Randbedingungen.

Nutzen

Dem Nachteil einer aufwendigen Datenerhebung und Entwicklung von Kalkulationsmethoden steht eine Reihe entscheidender Vorteile gegenüber:

Primär zu nennen ist die Verringerung des Aufwands einer Kalkulation während der frühen Konstruktionsphasen d.h. die Verkürzung des Regelkreises zwischen Konstruktion und Kalkulation. Dies hat eine um so höhere Bedeutung je öfter der Regelkreis in der Entwicklung durchlaufen werden muß. Je nach Größe und Organisation eines Betriebes läßt sich die Zeit bis zum Vorliegen eines Kalkulationsergebnisses von ein paar Tagen auf wenige Stunden pro Zyklus reduzieren.

Als weitere Vorteile sind zu nennen:

- Der Zugriff auf Ergebnisse ist für jeden Berechtigten einfach über die zentrale Datenbank bzw. Vault des PDM möglich.
- Das Kalkulationswissen des Betriebes wird in Form der Kalkulationsmethoden dokumentiert. Die Einarbeitung neuer Mitarbeiter in der Kalkulation aber auch in der Konstruktion verkürzt sich dadurch wesentlich.
- Integrierte CAD-NC-Modellbausteine helfen nicht nur den Aufwand für die Kalkulation zu verringern, sondern auch die Geometriedefinition im CAD läßt sich dadurch standardisieren und vereinfachen.
- Durch die enge Verknüpfung von Kalkulationstool und PDM ist die Steuerung des Kalkulationsprozesses über die Work-Flow-Komponente des PDM möglich. Damit wird die konstruktionsbegleitende Kalkulation zum integralen Bestandteil der Produktentwicklung. So ließe sich beispielsweise die Freigabe von wichtigen Konstruktionsteilen mit dem Vorhandensein von Kalkulationsergebnissen verbinden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Thematik der konstruktionsbegleitenden Kalkulation im Werkzeugmaschinenbau und ihre Integration in die Datenverarbeitungsumgebung der Konstruktion behandelt. Anstoß hierfür gab die Tatsache, daß Kosten in ihren wesentlichen Teilen zwar erst spät im Produktentstehungsprozeß verursacht, aber bereits früh festgelegt werden. Um kostengünstige Produkte entwickeln zu können, ist daher eine frühzeitige Kostenabschätzung mit sich anschließenden Korrekturschritten notwendig („kurzer Konstruktionsregelkreis“). Eine effiziente Bewältigung dieser Aufgabe ist nur durch den Einsatz einer auf die Anforderungen einer konstruktionsbegleitenden Kalkulation abgestimmten Software möglich.

Ausgehend von den Voraussetzungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion (Variantenkonstruktion, differenzierende Zuschlagskalkulation, mittelständische EDV-Struktur) und bereits vorhandenen Lösungsansätzen zur Kostenfrüherkennung wurden die Randbedingungen für ein auf den Werkzeugmaschinenbau abgestimmtes Konzept zur konstruktionsbegleitenden Kalkulation ermittelt (vgl. Abbildung 8.1).

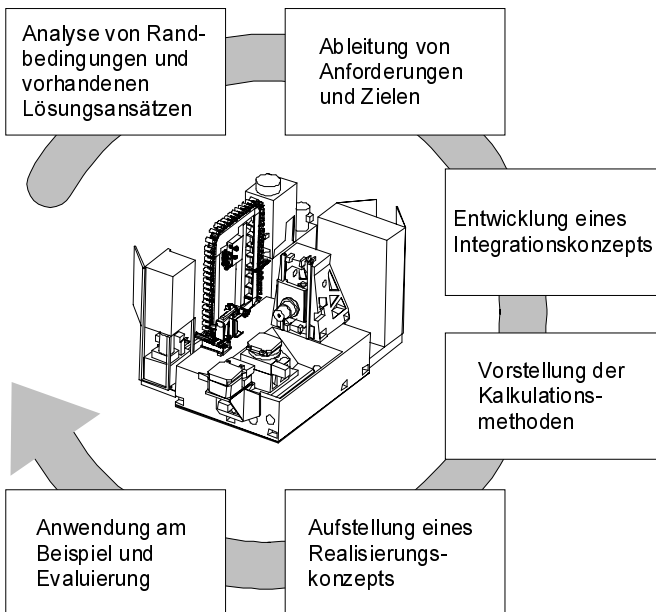


Abbildung 8.1: Schwerpunkte der Arbeit

8 Zusammenfassung und Ausblick

Als erstes Hauptproblem wurde die Datenbeschaffung und -bereitstellung über Abteilungsgrenzen hinweg identifiziert. Konstruktionsdaten (Stammdaten, CAD-Zeichnungen, Berechnungsergebnisse) werden immer noch überwiegend dezentral verwaltet und stehen damit nicht zentral zur Verfügung. Dies behindert bei der Suche nach den Ergebnissen früherer Projekte und hemmt kostengünstiges Konstruieren. Darüber hinaus steht im allgemeinen das kalkulatorische Wissen für eine Kostenfrüherkennung den Konstrukteuren nicht im ausreichenden Maße zur Verfügung, da diese Aufgabe von speziellen Kalkulatoren der Arbeitsvorbereitung übernommen wird.

Eine Behebung dieser Defizite wird zunehmend durch die Einführung einer zentralen Konstruktionsdatenverwaltung mit Hilfe von EDM/PDM-Systemen angestrebt. Alle wichtigen CAE-Tools der Konstruktion müssen deshalb informationstechnisch in den Konstruktionsprozeß integriert werden, d.h. sie müssen mit PDM-Systemen kommunizieren und Daten austauschen können. Damit wird eine wiederholte und aufwendige Datenneueingabe sowie die Verwendung veralteter bzw. falscher Daten aufgrund von Übertragungsfehlern vermieden. Dies gilt auch für Kalkulationssysteme, die auf konstruktiven Entwürfen und betriebswirtschaftlichen Grunddaten aufbauen. Konkret für die konstruktionsbegleitende Kalkulation bedeutet dies die Definition und Verwendung von Schnittstellen zu den in der Konstruktion wichtigen Systemen, wie dem 3D-CAD-System und dem EDM/PDM-System.

Im zweiten Hauptpunkt wurde auf die Entwicklung der Methoden zur konstruktionsbegleitenden Kalkulation eingegangen. Wichtige Grundprinzipien wie die Konzentration auf kostentreibende Elemente, die Verdichtung von Daten und Zusammenhängen aus frühen Konstruktionsphasen zu Algorithmen und Formeln sowie die Verwendung von kombinierten CAD-NC-Modellbausteinen wurden vorgestellt. Mit diesen Techniken können bereits in den frühen Konstruktionsphasen Kostenabschätzungen durchgeführt werden, in denen die klassischen Kalkulationsverfahren der Betriebswirtschaft noch nicht anwendbar sind.

Um die aufgezeigten Anforderungen zu erfüllen, setzt das in der Arbeit vorgestellte Konzept zur Realisierung auf ein Kalkulationsrumpfprogramm, das in das verbreitete MS-Excel integriert ist. Die für die Kalkulation benötigten Daten und Kalkulationsmethoden werden aus dem PDM-System über OLE und den CAD-Systemen über eine Dateischnittstelle ausgetauscht. Hierzu wurde ein spezielles PDM-Datenmodell entwickelt, mit dem auch die Kalkulationsmethoden entsprechend den Komponentenklassen gespeichert werden können. Auf eine völlige Integration in ein CAD-System wurde verzichtet, um eine leichte Anbindung an mehrere CAD-Systeme zu gewährleisten. Die Möglichkeit des Austausches von Modellstruktur, Geometrie-

grunddaten und von mit Geometrie verknüpften Parametern auf unterschiedlichen Strukturebenen wird unterstützt.

In einem ausführlichen Beispielkapitel wurden die vorgeschlagenen Methoden an konkreten Fragestellungen der Kalkulation eines Horizontalbearbeitungszentrums angewandt und so Formeln für die Kostenabschätzung entwickelt. Die Ergebnisse, die mit den entwickelten Formeln und den in den jeweiligen Konstruktionsphasen zur Verfügung stehenden Daten erzielt wurden, sind den realen verursachten Kosten gegenübergestellt worden. Es konnte dabei gezeigt werden, daß je nach Kalkulations-ebene und Konstruktionsphase eine hinreichende Genauigkeit erzielt werden kann.

Das verallgemeinerte Ziel einer durchgängig rechnergestützten Konstruktion und Evaluierung von Werkzeugmaschinen zeigt Abbildung 8.2. CAE-Werkzeuge sind vollständig in den Konstruktionsprozeß integriert und stehen im ständigen Austausch mit den Hauptwerkzeugen CAD-System (elektrische und mechanische Konstruktions-systeme) und Produktdatenmanagementsystem (PDM). Daraus ergeben sich zusätzliche Möglichkeiten für die konstruktionsbegleitende Kalkulation.

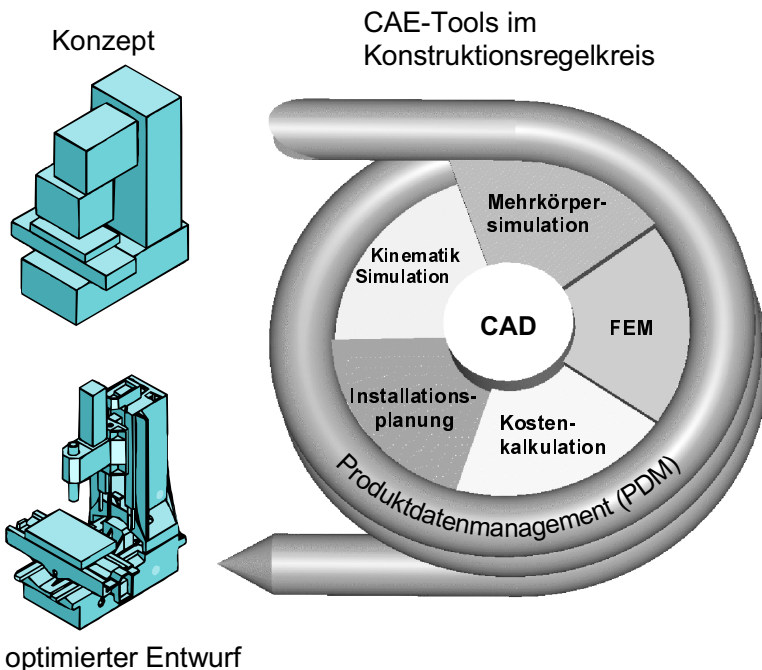


Abbildung 8.2: Beispiel einer CA-integrierten Konstruktion von Werkzeugmaschinen mit Hilfe von Produktdatenmanagement

So gibt es verstärkt Bestrebungen durch eine verstärkte Verknüpfung von Mechanik- und Elektrokonstruktion eine frühzeitige Planung der Installation an Werkzeugmaschinen durchzuführen [WAGNER 1995]. Ziele dabei sind u.a. eine montagegerechte Konstruktion der Gestellbauteile zu ermöglichen, frühzeitig dreidimensionale Verlegungspläne für elektrische, pneumatische oder hydraulische Leitungen zu gewinnen oder detaillierte Stücklisten über benötigte elektrische Komponenten und Kabellängen für eine schnellere Vorfertigung zusammenstellen zu können. Der letzte Punkt bietet auch einen weiteren Ansatz für eine genauere Kostenabschätzung in der Detaillierungsphase, vor allem der elektrischen Ausrüstung. Dies hat eine besondere Bedeutung vor dem Hintergrund, daß ein Großteil der A-Teile bzw. A-Baugruppen von Werkzeugmaschinen elektrische Komponenten sind.

Es wurde bereits hingewiesen auf die Notwendigkeit einer verstärkten Anbindung von Konstruktionswerkzeugen an PDM-Systeme und die damit verbundene Möglichkeit aus dem PDM wichtige Informationen direkt zu beziehen und auch zur Verfügung stellen zu können. Eigene, völlig isoliert mit einem geschlossenen und nicht an die Umgebung angepaßten Datenmodell arbeitende Berechnungsprogramme, die zwar schnell entwickelt werden können, sind damit in Zukunft für einen Betrieb nicht mehr akzeptabel. Konsequenzen daraus sind die Definition eines einheitlichen Rumpfdatenmodells und einer Schnittstelle über die die Information bequem ausgetauscht werden kann. Die Umsetzung eines solchen Konzepts setzt allerdings eine hohe Bereitschaft der Mitarbeiter voraus, sich mit den betroffenen Personen und Abteilungen abzustimmen und im Team die Aufgabe gemeinsam zu lösen. Die Entwicklung von Maßnahmen, die dies fördern sind die zukünftige Herausforderung.

9 Literaturverzeichnis

- [ABELN 1990]: Abeln, O.: Die CA-Techniken in der industriellen Praxis. München: Hanser 1990.
- [ABRAMOVICI & BICKELMANN 1993]: Abramovici, M.; Bickelmann, S.: Engineering Daten Management (EDM). CIM Management 9 (1993) 5, S. 20-28.
- [AICHELE 1980]: Aichele, G.: Leistungskennwert für Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1980.
- [AICHELE 1985]: Aichele, G.: Kalkulation und Wirtschaftlichkeit in der Schweißtechnik. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1985.
- [AKAO 1992]: Akao, Y.: QFD: Quality Function Deployment. Landsberg/Lech: Moderne Industrie 1992.
- [AMBROSY 1997]: Ambrosy, S.: Methoden und Werkzeuge für die integrierte Produktentwicklung. Aachen: Shaker 1997. (Konstruktionstechnik München Bd. 26)
- [BACKHAUS 1994]: Backhaus, K.: Multivariate Analysemethoden. Berlin: Springer 1994.
- [BALGHEIM 1993]: Balgheim, N.: Integration. In: Jansen, F. J.; Berghäuser, K.-H.; Grimm, O.; Balgheim, N. (Hrsg.): Rechnergestützte Betriebsorganisation. Berlin: Springer 1993, S. 257-356.
- [BAMBERG & BAUER 1989]: Bamberg, G.; Bauer, F.: Statistik. München: Oldenbourg 1989.
- [BECKER 1990]: Becker, J.: Entwurf- und Konstruktionsbegleitende Kalkulation. Kostenrechnungspraxis 34 (1990) 6, S. 353-358.
- [BLUMBERG 1991]: Blumberg, F.: Wissensbasierte Systeme in der PPS. Heidelberg: Physika 1991. (Wirtschaftswissenschaftliche Beiträge 54)
- [BMW 1993]: Bundesministerium für Wirtschaft (Hrsg.): Unternehmensgrößenstatistik 1992/93 - Daten und Fakten (erstellt vom Institut für Mittelstandsforschung). Bonn: BMW 1993. (Reihe BMW Dokumentation Nr. 80)
- [BOCK U.A. 1990]: Bock, M.; Bock, R.; Scheer, A.-W.: Konstruktionsbegleitende Kalkulation mit Expertensystem-Unterstützung. Zwf 85 (1990) 11, S. 576-579.

9 Literaturverzeichnis

- [BOOTHROYD & RADOVANOVIC 1989]: Boothroyd, G.; Radovanovic, P.: Estimating the Cost of Machined Components During the Conceptual Design of a Product. In: Crookall, J. R. u.a. (Hrsg.): CIRP Annals Vol. 38/1/1989 - Manufacturing Technology. Bern: Hallwag 1989, S. 157-160.
- [BOOTHROYD 1988]: Boothroyd, G.: Estimate costs at an early stage. American Machinist 132 (1988) 8, S. 54-57.
- [BRANDNER 1996]: Brander, S.: EDM-Definition und Überblick. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: EDM - Engineering Data Management. München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft 1996, S. 7-29. (iwb-Seminarberichte 24)
- [BREIING & FLEMMING 1993]: Breiing, A.; Flemming, M.: Theorie und Methoden des Konstruierens. Berlin: Springer 1993.
- [CERVELLINI 1994]: Cervellini, U.: Marktorientiertes Gemeinkostenmanagement mit Hilfe der Prozeßkostenrechnung. Controlling (1994) 1, S. 64-72.
- [COENENBERG 1993]: Coenenberg, A. G.: Kostenrechnung und Kostenanalyse. Landsberg/Lech: Moderne Industrie 1993.
- [DANNER 1996]: Danner, S.: Ganzheitliches Anforderungsmanagement mit QFD - ein Beitrag zur Optimierung marktorientierter Entwicklungsprozesse. Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München Bd. 24)
- [DEUTSCHLE 1995]: Deutschle, U.: Prozeßorientierte Organisation der Auftragsabwicklung in mittelständischen Unternehmen. Berlin: Springer 1995. (iwb-Forschungsberichte 90).
- [EBERT 1991]: Ebert, G.: Kosten- und Leistungsrechnung. Wiesbaden: Gabler 1991.
- [EHRENSPIEL 1985]: Ehrlenspiel, K.: Kostengünstig Konstruieren. Berlin: Springer 1985.
- [EHRENSPIEL 1988]: Ehrlenspiel, K.: Kostengesteuertes Design - Konstruieren und Kalkulieren am Bildschirm. Konstruktion 40 (1988) 9, S. 359-364.
- [EHRENSPIEL & WOLFRAM 1994]: Ehrlenspiel, K.; Wolfram, M.: Feature-basiertes Konstruieren und Kalkulieren. In: Datenverarbeitung in der Konstruktion '94. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994, S. 657-677. (VDI-Berichte 1148)
- [EHRENSPIEL 1995]: Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. München: Hanser 1995.

- [EITRICH 1996]: Eitrich, O.: Prozeßorientiertes Kostenmodell für die entwicklungs-
begleitende Vorkalkulation. Dissertation Universität Karlsruhe 1996.
- [ERNST 1994]: Ernst, O.: Gestaltung des Informations- und Kommunikationssystems in
kleinen und mittleren Unternehmen. Dissertation Universität Kaiserslautern 1994
- [EVERSHEIM & CAESAR 1990]: Eversheim, W.; Caesar, C.: Kostenmodell zur
Bewertung von Produktvarianten. VDI-Z 132 (1990) 5, S. 75-79.
- [EVERSHEIM 1990]: Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik, Band 2:
Konstruktion. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990.
- [EVERSHEIM U.A. 1994]: Eversheim, W.; Kümper, R.; Gupta, C.: Verursachungs-
gerechte Vorkalkulation. Kostenrechnung Praxis krp (1994) 4, S. 239-243.
- [EVERSHEIM U.A. 1996]: Eversheim, W.; Maßberg, W.; Pritschow, G.; Tönshoff, K.:
Prozeßgestaltung. In: Eversheim, G.; Schuh, G. (Hrsg.): Produktion und Management
„Betriebshütte“. Berlin: Springer 1996.
- [FERREIRINHA 1985]: Ferreirinha, P.: Herstellkostenberechnung von Maschinenteilen
in der Entwurfsphase mit dem HKB Programm. In: Hubka: Proceedings of ICED'85.
Zürich: Edition Heurista 1985.
- [FERREIRINHA 1985]: Ferreirinha, P.: Herstellkostenberechnung von Maschinenteilen
in der Entwurfsphase mit dem HKB Programm. In: Hubka, V. (Hrsg.): Proceedings of
ICED'85. Zürich: Edition Heurista 1985.
- [FLEMMING 1990]: Flemming, M.: Konstruktionsbegleitende Kostenrechnung. In:
Hubka, V. (Hrsg.): Proceedings of ICED'90. Zürich: Edition Heurista 1990.
- [FRECH 1998]: Frech, J. T.: Ein Verfahren zur integrierten, prozeßbegleitenden Vor-
kalkulation für die kostengerechte Konstruktion. Berlin: Springer 1998.
- [GAUSEMEIER U.A. 1995]: Gausemeier, J. u.a.: Integrated product development - an
integral approach to computer aided development of advanced mechanical engineering
products. ICED'95 Prag, 22.-24.08.1995.
- [GESCHKA 1997]: Geschka, H.: Abgrenzung der Klein- und Mittelbetriebe von Groß-
betrieben. In: Pfohl (Hrsg.): Betriebswirtschaftslehre der Mittel- und Kleinbetriebe.
Berlin: Erich Schmidt 1997, S. 191-223.
- [GIAPOULIS 1998]: Giapoulis, A.: Modelle für effektive Konstruktionsprozesse.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München Bd. 27)

9 Literaturverzeichnis

[GRABOWSKI U.A. 1993]: Grabowski, H.; Anderl, R.; Polly, A.: Integriertes Produktmodell. Berlin: Beuth 1993.

[GRÖNER 1991]: Gröner, L.: Entwicklungsbegleitende Vorkalkulation. Berlin: Springer 1991.

[GUTMAN 1985]: Gutman, N.: How to Keep Product Costs in Line. New York: Marcel Dekker 1985.

[HAASIS 1994]: Haasis, S.: Konstruktionsbegleitende Kalkulation im Verbund, Beispiel: Gußgetriebegehäuse. Konstruktion 46 (1994) 2, S. 66-72.

[HAASIS 1995]: Haasis, S.: Wissens- und featurebasierte Unterstützung der Konstruktion von Stirnradgetrieben unter besonderer Berücksichtigung des Gußgehäuses. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995. (VDI-Fortschrittsberichte 254)

[HABERSTOCK 1987]: Haberstock, L.: Kostenrechnung I. Wiesbaden: Gabler 1987.

[HALLER-WEDEL 1973]: Haller-Wedel, E.: Die Einflußgrößenrechnung in Theorie und Praxis. München: Hanser 1973.

[HAMEL 1997]: Hamel, W.: Abgrenzung der Klein- und Mittelbetriebe von Großbetrieben. In: Pfohl (Hrsg.): Betriebswirtschaftslehre der Mittel- und Kleinbetriebe. Berlin: Erich Schmidt 1997, S. 225-254.

[HARTUNG & ELPELT 1989]: Hartung J.; Elpelt, B.: Multivariate Statistik. München: Oldenbourg 1989.

[HARTUNG 1986]: Hartung J.: Statistik. München: Oldenbourg 1986.

[HILLEBRAND 1991]: Hillebrand, A.: Ein Kosteninformationssystem für Neukonstruktion mit der Möglichkeit zum Anschluß an ein CAD-System. München: Hanser 1991. (KM Konstruktionstechnik München Band 4)

[HORVÁTH U.A. 1996]: Horváth, P.; Franz, K.-P.; Eschenbach, R.; Coenenberg, A. G.: Grundlagen und Instrumente des Produktcontrolling. In: Eversheim, G.; Schuh, G. (Hrsg.): Produktion und Management „Betriebshütte“. Berlin: Springer 1996.

[HUBKA 1976]: Hubka, V.: Theorie der Konstruktionsprozesse. Berlin: Springer 1976.

[JORISSEN 1996]: Jorissen, H. D.: Die deutsche Werkzeugmaschinenindustrie hat ihre Schulaufgaben gemacht. VDI-Z 138 (1996) 4, S. 6-8.

- [KERNIGHAN & PIKE 1987]: Kernighan, B. W.; Pike: Der UNIX Baukasten. München: Hanser 1987.
- [KESSELRING 1954]: Kesselring, F.: Technische Kompositionslehre. Berlin: Springer 1954.
- [KLENK 1997]: Klenk, R.: Rechnerwerkzeuge im Entwicklungs- und Applikationsprozeß der Werkzeugmaschine. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Münchener Kolloquium '97 - Mit Schwung zum Aufschwung. Landsberg/Lech: Moderne Industrie 1997, S. 154-171.
- [KLOCK U.A. 1993]: Klock, J.; Sieben, G.; Schildbach, T.: Kosten- und Leistungsrechnung. Düsseldorf: Mohr 1993.
- [KOLLER 1994]: Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Berlin: Springer 1994.
- [KRAUSE & SCHLINGHEIDER 1991]: Krause, F.-L.; Schlingheider, J.: Entwicklung und Konstruktion mit wissensbasierten Softwarewerkzeugen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991, S. 205-231. (VDI-Berichte 903)
- [KRÖNERT 1997]: Krönert, U.: Systematik für die rechnergestützte Ähnlichteilsuche und Standardisierung.
- [LINDEMANN 1997]: Lindemann, U.: Erfolgreiche Produkte durch integrierte Produktentwicklung. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Münchener Kolloquium '97 - Mit Schwung zum Aufschwung. Landsberg/Lech: Moderne Industrie 1997, S. 115-136.
- [LORENZEN 1997]: Lorenzen, J.: Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen. Berlin: Springer 1997. (iwb Forschungsberichte 107)
- [MEINLSCHMIDT & SPRENZEL 1998]: Meinschmidt, J.; Sprengel, A.: Werkzeugmaschinen rechnerintegriert entwickeln. Werkstatt und Betrieb 131 (1998) 4, S. 262-266.
- [MILBERG & KAISER 1993]: Milberg, J.; Kaiser, J.: Parametrisierte Modellbausteine als Grundlage für ein integriertes Produktmodell. VDI-Z 135 (1993) 8, S. 98-101.
- [MILBERG & ROMANOW 1993]: Milberg, J.; Romanow, P.: Konstruktionsbegleitendes Kalkulieren von Werkzeugmaschinen. VDI-Z 135 (1993) 5, S. 197-200.
- [MONTGOMERY & PECK 1991]: Montgomery, D.C.; Peck, E. A.: Introduction to Linear Regression Analysis. New York: John Wiley & Sons 1991.

9 Literaturverzeichnis

[MONTGOMERY 1990]: Montgomery, D.C.: Introduction to Statistical Quality Control. New York: John Wiley & Sons 1990.

[OERLIKON SCHWEIßTECHNIK]: Oerlikon Schweißtechnik GmbH (Hrsg.): Kalkulationstabellen für die Berechnung von Schweißverbindungen. Eisenberg: Januar 1991.

[OLFERT 1994]: Olfert, K.: Kostenrechnung. Ludwigshafen: Kiehl 1994.

[OPITZ 1966]: Opitz, H.: Werkstückbeschreibendes Klassifizierungssystem. Essen: Giradet 1966.

[PACZYNA 1980]: Pacyna, H.: Einfluß der konstruktiven Gestaltung auf die Herstellkosten von Gußstücken. Düsseldorf: VDI-Verlag 1980, S. 97-111. (VDI-Berichte 362)

[PAHL & BEITZ 1993]: Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung. Berlin: Springer 1993

[PAHL & RIEG 1982]: Pahl, G.; Rieg, F.: Kostenwachstumsgesetze nach Ähnlichkeitsbeziehungen für Baureihen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1982, S. 61-69. (VDI-Berichte 457)

[PFOHL 1997]: Pfohl, H.-C.: Abgrenzung der Klein- und Mittelbetriebe von Großbetrieben. In: Pfohl (Hrsg.): Betriebswirtschaftslehre der Mittel- und Kleinbetriebe. Berlin: Erich Schmidt 1997, S. 1-25.

[PICKEL 1988]: Pickel, H.: Kostenmodelle als Hilfsmittel zum kostengünstigen Konstruieren. Dissertation TU München 1988.

[PRODUKTION 1998]: Kögel, G. (Red.): Wechsel zu 3D-CAD läuft auf Hochtouren. Produktion (1998) 10, S. 4.

[REINHART & SPRENZEL 1995]: Reinhart, G.; Sprengel, A.: Werkzeugmaschinen optimieren an rechnerintegrierten Konstruktionsarbeitsplätzen. Maschinenmarkt MM 101 (1995) 41, S. 66-71.

[REINHART U.A. 1997]: Reinhart, G.; Sprengel, A.; Linner, S.; Weißenberger, M.; Meinschmidt, J.; Wagner, P.: Innovative Entwicklung von Werkzeugmaschinen - Methoden und Entwicklungswerkzeuge. In: Y. Ito, E. F. Moritz (Hrsg.): Synergy of Culture and Production Vol. 1 - Holistic Approach to Machine Tool Innovation. Sottrum: Artefact 1997, S. 63-97.

- [REINHART U.A. 1998]: Reinhart, G.; Schneider, C.; Weißenberger, M.; Sprengel, A.; Meinschmidt, J.: Kooperative Entwicklung technologisch komplexer Produkte. Konstruktion 50 (1998) 9, S. 15-22.
- [RODENACKER 1984]: Rodenacker, W.-G.: Methodisches Konstruieren - Grundlagen, Methodik, praktische Beispiele. Berlin: Springer 1984.
- [ROMANOW 1994]: Romanow, P.: Frühzeitige Kalkulation von Werkzeugmaschinenkonzepten am CAD-Arbeitsplatz. CIM Management 10 (1994) 2, S. 36-40.
- [ROMANOW 1995]: Romanow, P.: Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen. Berlin: Springer 1994. (iwv Forschungsberichte 81)
- [ROTH 1982]: Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Berlin: Springer 1982.
- [SACHS 1984]: Sachs, L.: Angewandte Statistik. Berlin: Springer 1984.
- [SCHAAL 1992]: Schaal, S.: Integrierte Wissensverarbeitung mit CAD am Beispiel der konstruktionsbegleitenden Kalkulation. München: Hanser 1992. (KM Konstruktions-technik München Band 8)
- [SCHNEIDER U.A. 1997]: Schneider, C.; Sprengel, A.; Meinschmidt, J.: Frühes Aus für Fehler. Fertigung (1997) 1-2, Sonderteil: Die neue Fabrik S. 38-40
- [SCHUH & STEINFATT 1993]: Schuh, G.; Steinfatt, E.: Konstruktionsbegleitende Prozeßkostenrechnung. ZWF-CIM 88 (1993) 7-8, S. 344-346.
- [SPRENZEL & MEINLSCHMIDT 1997]: Sprengel, A.; Meinschmidt, J.: Schneller zum Endprodukt - Integrierte Entwicklung am Beispiel von Werkzeugmaschinen. Schweizer Maschinenmarkt (1997) 44, S. 40-42.
- [SPRENZEL 1995]: Sprengel, A.: Entwurfsbegleitende Kostenkalkulation von Werkzeugmaschinen. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Konstruktion von Werkzeugmaschinen. München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft 1995, S. 27-39. (iwv-Seminarberichte 3)
- [SPUR 1996]: Spur, G.: Produktionstechnologie. In: Eversheim, G.; Schuh, G. (Hrsg.): Produktion und Management „Betriebsstätte“. Berlin: Springer 1996.
- [STEINER 1995]: Steiner, J. M.: Rechnergestütztes Kostensenken im praktischen Einsatz. Dissertation TU München 1995.

[STEINER U.A. 1993]: Steiner, M.; Ehrlenspiel, K.; Schnitzlein, W.: Erfahrungen mit der Einführung wissensbasierter Erweiterungen eines CAD-Systems zur konstruktionsbegleitenden Kalkulation. In: Rechnerunterstützte Wissensverarbeitung in Entwicklung und Konstruktion'93. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993, S. 33-54. (VDI-Berichte 1079)

[STEITZ 1992]: Steitz, T.: Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung. Dissertation Universität Karlsruhe 1992

[TROSSIN 1995]: Trossin, H. J.: Einsatzmöglichkeiten der Simulationstechnik. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte. München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft 1995, S. 1-10. (iwb-Seminarberichte 4)

[VAJNA 1997]: Vajna, S.: Zukunftsperspektiven für CAX-Technologien. CAD-CAM Report (1997) 6, S. 70-78.

[VDI 2210]: VDI-Richtlinie 2210 (Entwurf): Datenverarbeitung in der Konstruktion; Analyse des Konstruktionsprozesses in Hinblick auf den EDV-Einsatz. Düsseldorf: VDI-Verlag 1975.

[VDI 2221]: VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993.

[VDI 2222, BLATT 1]: VDI-Richtlinie 2222, Blatt 1: Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997.

[VDI 2235]: VDI-Richtlinie 2235: Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren - Methoden und Hilfen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1987.

[VDI 2247]: VDI-Richtlinie 2247 (Entwurf): Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994.

[VDI 3633]: VDI-Richtlinie 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Begriffsdefinitionen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.

[VDMA 1992]: Zwischenbetrieblicher Vergleich, Kennzahlen und Informationen aus dem Bereich Entwicklung und Konstruktion. Frankfurt: VDMA 1992.

[VDMA 1997]: VDMA (Hrsg.): Statistisches Handbuch für den Maschinenbau (VDMA). Frankfurt: Maschinenbau-Verlag 1997.

[VOSS 1993]: VOSS, H.: Wirtschaftlichkeit im Schweißbetrieb - Unterlagen zum SFI-Lehrgang. München: SLV-München, 1993.

[WAGNER 1995]: Wagner, P.: Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte. In: iwv-Seminarberichte Nr. 9. München: Herbert Utz Verlag 1995.

[WARNECKE 1993]: Warnecke, H.-J.: Der Produktionsbetrieb I. Berlin: Springer 1993.

[WIENDAHL 1989]: Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. München: Hanser 1989.

[WILDEMANN 1994]: Wildemann, H.: Kosten- und Leistungsrechnung (Vorlesungsskript TU München). München: 1994.

[WÖHE 1986]: Wöhe, G.: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. München: Vahlen 1986.

[WOLFRAM 1994]: Wolfram, M.: Feature-basiertes Konstruieren und Kalkulieren. Dissertation TU München 1994.

10 Anhang

10.1 Abkürzungen

CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAP	Computer Aided Planning
CLDATA	Cutter Location Data
DV	Datenverarbeitung
E-CAD	Elektro CAD
EDM	Engineering Data Management
ERP	Enterprise Ressource Planning System
FEM	Finite Elemente Methode
FFS	Flexibles Fertigungssystem
HSC	High Speed Cutting
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MKS	Mehrkörpersimulationssystem
NC	Numerical Control
PDM	Product Data Management
PPS	Produktionsplanungs- und Steuerungssystem
RPC	Remote Procedure Calls
SME	Small and Medium Enterprise
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
VDAFS	Flächenschnittstelle des Verbands der deutschen Automobilindustrie

10.2 Formelkurzzeichen

a	Schweißnahtmaß, Nahtdicke
a, b, c	Hauptabmessungen des Hüllquaders
$B = r^2$	Bestimmtheitsmaß der Regressionsrechnung
b_j	Steigungsmaß j in der Regressionsfunktion
D	Dünnwandigkeit
d_m	mittlere Wandstärke eines Gußteils
F	Füllgrad
F_{empir}	empirischer F-Wert der F-Verteilung
$f_i^{(E)}(a_i)$	Funktion zur Berechnung des spezifischen Elektrodenverbrauchs [min/m] in Abhängigkeit vom Schweißnahtmaß a
$f_i^{(h)}(a_i)$	Funktion zur Berechnung der spezifischen Hauptzeit [min/m] in Abhängigkeit vom Schweißnahtmaß a
FK	Fertigungskosten
F_{krit}	kritischer F-Wert der F-Verteilung
f_i	Länderkorrekturfaktor
G	Gestrecktheit
HK	Herstellkosten
k	Anzahl der betrachteten Merkmale in der Regressionsrechnung
k, i, j	Indizes
k_e	Erholzeitzuschlag in %
k_{Gas}	Gaskostensatz in [DM/m ³]
k_{Platz}	Platzkostensatz
k_V	Verteilzeitzuschlag in %
$K_{\text{Verbrauch}}$	Verbrauchskosten beim Schweißen
l_i	Schweißnahtlänge der Naht i

l_x, l_y, l_z	Länge in x-, y- oder z-Richtung
MK	Materialkosten
mk	Materialkostensatz (Kosten pro kg)
n	Anzahl der betrachteten Merkmalsausprägungen (beobachtete Werte pro Merkmal) in der Regressionsrechnung
n	Losgröße
n	Anzahl der Schweißnähte
P	Preis
P-Wert	kritischer t-Wert aus der Studentverteilung
Q^2	Fehler- oder Residuenquadratsumme
Q_{Gas}	Schutzgasverbrauch
ρ	Dichte
R_m	Zugfestigkeit
s	Standardabweichung
S_S	Schwierigkeitsfaktor
t_b	Brachzeit
t_{BC}	Gesamtbearbeitungszeit aller B- und C-Features
t_D	Durchführungszeit
TE, t_e	Einzelzeit
t_{empir}	empirischer t-Wert der Studentverteilung
t_{Feed}	Bearbeitungszeit mit Vorschubgeschwindigkeit
t_h	Hauptzeit
t_{Misc}	sonstige Verfahrzeiten während der Bearbeitung
t_n	Nebenzeit
t_r	Rüstzeit
t_r	Rüstgrundzeit

t_{Rapid}	Verfahrzeit im Eilgang während der Bearbeitung
t_v	Verteilzeit
V	Volumen
V_p	Verpackungssperrigkeit
V_u	Hüllvolumen
\bar{x}	Mittelwert
X	Regressor, unabhängige Variable in der Regressionsrechnung
Y	Zielgröße, Regressand, abhängige Variable in der Regressionsrechnung
Z_K	Zahl der Kerne eines Gußteils

10.3 Regressionsrechnung

10.3.1 Lineare Regression

In der folgenden Beschreibung der Regressionsrechnung wird vor allem auf die bei der Ermittlung von Kostenfunktionen häufigste Art der Regressionsrechnung, die multiple Regression, eingegangen. Die Formeln für die Regression mit nur einer unabhängigen Variablen lassen sich als Sonderfall für $k = 1$ Merkmale aus den Gleichungen der multiplen Regression gewinnen.

Multiple lineare Regression

Die lineare Regressionsanalyse geht von einer linearen Beziehung zwischen der Zielgröße und den unabhängigen Variablen aus. Betrachtet man nun k Merkmale X_1, X_2, \dots, X_k zuzüglich des später abzuschätzenden Merkmals Y , so läßt sich die zugehörige Funktion wie folgt ansetzen:

$$\text{Ansatz: } \hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k = b_0 + \sum_{j=1}^k b_jx_j \quad \text{Glg. (1)}$$

Die nun gesuchte lineare Funktionsbeziehung zwischen der Zielgröße y und den unabhängigen Variablen x_1, x_2, \dots, x_k wird als multiple Regressionsfunktion bezeichnet, deren Lage durch die Parameter b_0 , das *absolute Glied*, und b_j , dem jeweiligen *Steigungsmaß*, bestimmt ist.

Ziel ist es, einen Verlauf der gesuchten Funktion zu finden, der sich möglichst gut an die empirische Punkt- bzw. Datenverteilung anpaßt. Zur Bewertung des Verlaufes ist die Differenz Q zwischen den durch die Regressionsfunktion geschätzten Werten \hat{y} und den tatsächlichen Werten y zu betrachten. Diese Differenz wird auch *Residualgröße* genannt und es wird angenommen, daß es sich dabei um einen zufällig verteilten Fehler handelt. Die Koeffizienten der Regressionsfunktion b_j müssen deshalb so bestimmt werden, daß die Fehler- oder Residuenquadratsumme Q^2 über alle n beobachteten Merkmalsausprägungen minimal wird („Methode der kleinsten Fehlerquadrate“).

$$Q^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (b_0 + b_1x_{1i} + b_2x_{2i} + \dots + b_kx_{ki})]^2 \rightarrow \min$$

Die partielle Differentiation nach den Koeffizienten b_0 und b_j ($j=1 \dots k$) liefert folgende Gleichungen,

$$\frac{\partial Q^2}{\partial b_0} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (b_0 + b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i} + \dots + b_k x_{ki})] = 0$$

Glg. (2)

$$\Leftrightarrow \sum_{i=1}^n b_0 + \sum_{i=1}^n b_1 x_{1i} + \sum_{i=1}^n b_2 x_{2i} + \dots + \sum_{i=1}^n b_k x_{ki} = \sum_{i=1}^n y_i$$

$$\frac{\partial Q^2}{\partial b_j} = -2 \sum_{i=1}^n x_{ji} [y_i - (b_0 + b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i} + \dots + b_k x_{ki})] = 0$$

Glg. (3)

$$\Leftrightarrow \sum_{i=1}^n b_0 x_{ji} + \sum_{i=1}^n b_1 x_{1i} x_{ji} + \sum_{i=1}^n b_2 x_{2i} x_{ji} + \dots + \sum_{i=1}^n b_k x_{ki} x_{ji} = \sum_{i=1}^n y_i x_{ji}$$

die sich unter Verwendung der Gauß'schen Summenkonvention

$$[y \cdot x] = \sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i$$

übersichtlich zu folgendem vollständigen Normalgleichungssystem ordnen lassen.

aus (2): $n \cdot b_0 + [x_1] \cdot b_1 + [x_2] \cdot b_2 + \dots + [x_k] \cdot b_k = [y]$

$$[x_1] \cdot b_0 + [x_1 x_1] \cdot b_1 + [x_2 x_1] \cdot b_2 + \dots + [x_k x_1] \cdot b_k = [y x_1]$$

aus (3): $[x_2] \cdot b_0 + [x_1 x_2] \cdot b_1 + [x_2 x_2] \cdot b_2 + \dots + [x_k x_2] \cdot b_k = [y x_2]$

...

$$[x_k] \cdot b_0 + [x_1 x_k] \cdot b_1 + [x_2 x_k] \cdot b_2 + \dots + [x_k x_k] \cdot b_k = [y x_k]$$

In Matrixschreibweise läßt sich das lineare Gleichungssystem folgendermaßen formulieren:

$$\begin{pmatrix} n & [x_1] & [x_2] & \dots & [x_k] \\ [x_1] & [x_1 x_1] & [x_2 x_1] & \dots & [x_k x_1] \\ [x_2] & [x_1 x_2] & [x_2 x_2] & \dots & [x_k x_2] \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ [x_k] & [x_1 x_k] & [x_2 x_k] & \dots & [x_k x_k] \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [y] \\ [y x_1] \\ [y x_2] \\ \vdots \\ [y x_k] \end{pmatrix}$$

Glg. (4)

$$\Leftrightarrow A \cdot \vec{b} = \vec{c}$$

In dieser Form läßt sich die multiple Regression für eine beliebige Anzahl k an Merkmalen bereits auf Computern implementieren und einsetzen, vorausgesetzt A läßt sich invertieren.

Formuliert man allerdings das Regressionsmodell von Beginn an in Matrixschreibweise,

$$X \cdot \vec{b} = \vec{y} \quad \text{Glg. (5)}$$

$$\text{mit } X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{k2} \\ 1 & x_{13} & x_{23} & \cdots & x_{k3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \cdots & x_{kn} \end{pmatrix}; \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{pmatrix}; \quad \vec{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$$

so läßt sich der Koeffizientenvektor \vec{b} leicht mit folgender Gleichung bestimmen:

$$\begin{aligned} X^T \cdot X \cdot \vec{b} &= X^T \cdot \vec{y} \\ \vec{b} &= (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot \vec{y} \end{aligned} \quad \text{Glg. (6)}$$

Dabei zeigt sich, daß $X^T X$ genau A und $X^T \vec{y}$ genau \vec{c} aus Gleichung 4 entspricht.

Setzt man nun \vec{b} in Gleichung 1 ein, so lassen sich damit Prognosen für „zukünftige“ \hat{y} stellen.

Bestimmtheitsmaß

Es stellt sich allerdings die Frage nach der Güte, der mit Hilfe der Regressionsrechnung gewonnenen Formeln. Ein Maß hierfür ist das Bestimmtheitsmaß B :

$$B = r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{mit } \bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i$$

Es läßt sich als Verhältnis von erklärter Streuung zur Gesamtstreuung um den Mittelwert \bar{y} deuten. Dies soll in folgender Abbildung für den Fall einer Regression mit einer unabhängigen Variablen und 10 beobachteten Merkmalsausprägungen veranschaulicht werden.

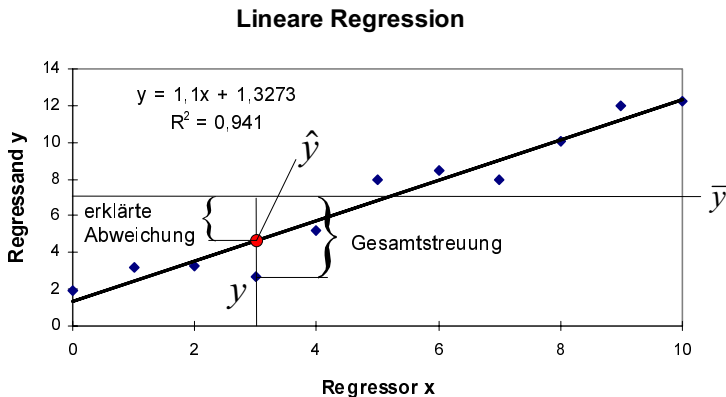


Abbildung 10.1: Beispiel einer Regressionsgeraden

Das Bestimmtheitsmaß B kann dabei Werte von 0 bis 1 annehmen. $B=1$ bedeutet, die Gesamtstreuung ist vollständig durch die Regression erklärt oder anders ausgedrückt: eine Abschätzung mit der Regressionsfunktion ist absolut fehlerfrei möglich. $B=0$ zeigt an, daß mit dem gewählten Regressionsansatz die Datenmenge nicht beschrieben werden kann und die gewonnene Formel unbrauchbar ist. Die Grenze zwischen brauchbar und unbrauchbar wird in der Literatur etwa bei $B=0,6$ bis $B=0,9$ gezogen [HALLER-WEDEL 1973].

Eine alternative Interpretation des Bestimmtheitsmaßes ist mit der Korrelation zwischen den beobachteten Daten und den geschätzten Werten möglich. Diese Korrelation r ist gleichbedeutend mit der Quadratwurzel des Bestimmtheitsmaßes. Die Maßzahl r wird auch als multipler Korrelationskoeffizient bezeichnet, da im Fall der multiplen Regressionsanalyse der Regressand durch eine lineare Verknüpfung von mehreren Variablen gebildet wird [HARTUNG 1986].

Test des Bestimmtheitsmaßes

Das Bestimmtheitsmaß B als alleiniges Gütekriterium ist allerdings noch nicht ausreichend. Der Trivialfall einer einfachen Regressionsgeraden durch 2 Meßpunkte mag dies verdeutlichen. Hier wird das Bestimmtheitsmaß immer 100% sein und eine hohe Qualität der Regressionsgeraden vortäuschen.

Ziel muß deshalb sein, herauszufinden, ob sich der Wert des Bestimmtheitsmaßes aufgrund zufälliger Einflüsse ergeben hat. Zur Prüfung des Bestimmtheitsmaßes wird der sog. *F-Test* durchgeführt, mit dem die Wahrscheinlichkeit einer Nullhypothese H_0

untersucht wird, die unterstellt, daß es keinen Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable und den unabhängigen Variablen gibt und somit die Regressionsfunktion unbrauchbar wäre. Die Wahrscheinlichkeit, welche das Vertrauen in die Verlässlichkeit des Testes ausdrückt, wird üblicherweise zu 95% oder 99% gewählt. Liefert der Test das Ergebnis, daß die Nullhypothese zu verwerfen ist, kann man mit 95% oder 99% Prozent Wahrscheinlichkeit die Alternativhypothese H_1 als richtig ansehen. Somit wäre das Bestimmtheitsmaß signifikant von Null verschieden und die Regressionsgleichung kann als brauchbar angenommen werden [MONTGOMERY & PECK 1991; BACKHAUS 1994].

Bei der praktischen Anwendung besteht der Test darin, einen *empirischen F-Wert* aus den beobachteten Werten zu ermitteln und diesen mit einem *theoretischen F-Wert*, den man einer Tabelle entnimmt, zu vergleichen. Mit dem Ergebnis dieses Vergleiches kann über die Annahme oder Ablehnung der Nullhypothese entschieden werden. Ist der theoretische F-Wert aus der Tabelle kleiner oder gleich dem errechneten empirischen F-Wert, ist die Hypothese H_0 mit der der Tabelle entsprechenden Wahrscheinlichkeit, also 95% oder 99%, zu verwerfen. Berechnet wird der empirische F-Wert folgendermaßen:

$$F_{\text{empir}} = \frac{\frac{B}{k}}{\frac{1-B}{n-k-1}}$$

Test der Regressionskoeffizienten

Im analogen Verfahren läßt sich mit dem t-Test die Signifikanz und individuelle Erklärungskraft der Regressionskoeffizienten untersuchen. Hinter dieser Betrachtung steht die Tatsache, daß je größer die Standardabweichung der Regressionskoeffizienten ist, desto geringer ist die Genauigkeit und Sicherheit mit der die Regressionsfunktion auf die Grundgesamtheit übertragen werden kann. Auch hier wird ein empirischer t-Wert ermittelt und mit dem theoretischen t-Wert der Student-Verteilung aus Tabellen verglichen.

$$t_{\text{empir}} = \frac{b_j}{s_{b_j}}; \quad s_{b_j} = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ji}^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_{ji} - \bar{x})^2} s_e^2; \quad s_e^2 = \frac{1}{n-2} \cdot \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2$$

10.3.2 Nichtlineare Regression

Nicht alle Datenmengen lassen sich durch einen linearen Ansatz, wie er im letzten Abschnitt gezeigt worden ist, beschreiben. In vielen Fällen muß deshalb auf nicht-lineare Ansätze zurückgegriffen werden. Die Bestimmung der Regressionskoeffizienten kann deshalb häufig nur numerisch durchgeführt werden.

Eine Reihe von Funktionen lassen sich allerdings durch eine geeignete Transformation wieder in die Problemstellung der linearen Regression überführen [HARTUNG & ELPELT 1989]. Hierzu gehören z.B. polynomiale Regressionsfunktionen der folgenden Art:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + \dots + b_k x^k = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x^j$$

Die Transformation erfolgt durch einfache Umbenennungen des Regressors und die Koeffizienten können schließlich mit den Methoden der multiplen linearen Regression bestimmt werden:

$$x = x_1; \quad x^2 = x_2; \quad \dots; \quad x^k = x_k$$

Ein anderes Beispiel ist die Cobb-Douglas-Funktion,

$$\tilde{y} = e^{b_0} \cdot \tilde{x}_1^{b_1} \cdot \tilde{x}_2^{b_2} \cdot \dots \cdot \tilde{x}_k^{b_k} = e^{b_0} \cdot \prod_{j=1}^k \tilde{x}_j^{b_j}$$

die durch Logarithmierung und anschließender Substitution in ein lineares System überführt werden kann:

$$\ln \tilde{y} = b_0 + b_1 \ln \tilde{x}_1 + b_2 \ln \tilde{x}_2 + \dots + b_k \ln \tilde{x}_k = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j \ln \tilde{x}_j$$

$$\hat{y} = \ln \tilde{y}; \quad x_1 = \ln \tilde{x}_1; \quad \dots; \quad x_k = \ln \tilde{x}_k$$

iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 1 *Streifinger, E.*
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*
Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, I.*
Schneiderdierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozessgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Grohe, A.*
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*
Klipsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*
Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*
Beitrag für ein Zerspanprozessmodell Metallbandsägen
1989 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Pelker, St.*
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schumann, R.*
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wrba, P.*
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*
Prozesskommunikation und Rechnerverbund in der Produktion
 1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfarr, W.*
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze
 1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
 1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
 1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
 1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*
Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
 1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
 1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
 1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 *Naber, H.*
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente
 1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
 1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*
Dynamisches Verhalten von Kreissägen
 1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
 1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
 1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
 1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
 1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen
 1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabkastens für robotergeführte Klebprozesse
 1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*
Integrierte Diagnose in Produktionszellen
 1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
 1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*
Prozessuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
 1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schröder, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
 1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wisbacher, J.*
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
 1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*
Laserbearbeitung mit Robotern
 1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*
Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe
 1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
 1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helml, H.J.*
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
 1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
 1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
 1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bomm, H.*
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme
 1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
 1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
 1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
 1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayr, R.*
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von
Zubringeinrichtungen**
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*
**Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer
Zellenrechnersoftware**
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*
**Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur
Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes**
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*
**Simulation des Schwingungsverhaltens spanender
Werkzeugmaschinen**
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*
**Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-
Layoutoptimierung**
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummetsteiner, G.*
**3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur
Planung manueller Montagesysteme**
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*
**Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen
Automatisierung von Produktionssystemen**
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*
**Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-
Laserverarbeitung mit integrierter Sensorik**
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*
**Automatische Inbetriebnahme
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von
Produktionssystemen**
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*
**Rechnergestütztes Projektinformations- und
Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*
**Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur
Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*
**Verfahren zur simulationsgestützten
Produktionsregelung in der Einzel- und
Kleinserienproduktion**
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*
**Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer
flexiblen Fertigung**
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Rath, P.*
**Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in
der Arbeitsvorbereitung**
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
**Strömungstechnische Optimierung von
Produktionssystemen durch Simulation**
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zah, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzer, N.*
**Technologisches Prozeßmodell für die
Kugelschleifbearbeitung**
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*
**Konstruktionsbegleitende Kalkulation von
Werkzeugmaschinen**
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*
**Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen
Fertigungszellen**
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
**Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der
Hartbearbeitung**
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in
flexiblen Produktionszellen**
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
**Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und
logistisches Störungsmanagement**
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
**Systematische Planung anwendungsspezifischer
Materialflußsteuerungen**
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*
**Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in
Montageanlagen**
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*
Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*
**Integrierte Planung von Informationssystemen für
rechnergestützte Produktionssysteme**
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutsche, U.*
**Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in
mittelständischen Unternehmen**
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*
Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*
Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*
Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*
Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*
Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*
Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*
Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*
Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Mocetzuma de la Barrera, J.L.*
Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*
Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*
Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischelsrieder, K.*
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*
Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*
Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Kränert, U.*
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*
Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*
Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindnermaier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehrer, J.*
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Plab, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungsgel leitete Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, utz@utzverlag.com

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**
86 Seiten · ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**
80 Seiten · ISBN 3-931327-07-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**
130 Seiten · ISBN 3-931327-08-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**
120 Seiten · ISBN 3-931327-09-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 15 **Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar**
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-X
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ... durch Kooperation steigern**
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen**
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1
- 47 **Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation**
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 **Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen**
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 **Rapid Prototyping - Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung**
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 **Rapid Manufacturing - Methoden für die reaktionsfähige Produktion**
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 **Flexibles Kleben und Dichten - Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle**
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8

Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, utz@utzverlag.com

- 122 Burghard Schneider
Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Bernd Goldstein
Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
170 Seiten · 65 Abb. · 1999 · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Helmut E. Mößner
Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
156 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Ralf-Gunter Gräser
Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Hans-Jürgen Trossin
Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Doris Kugelmann
Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
158 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Rolf Diesch
Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
160 Seiten · 69 Abb. · 1999 · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Werner E. Lulay
Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
170 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Otto Murr
Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Michael Macht
Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Bruno H. Mehler
Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbindungen
152 Seiten · 44 Abb. · 5 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Knut Heitmann
Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle
146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Stefan Blessing
Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
160 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Can Abay
Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · 2000 · ISBN 3-89675-697-4