

UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

SCHRIFTENREIHE PRODUKTIONSTECHNIK

Herausgeber: H. Bley und C. Weber



Band 38

Marc Bossmann

**Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle
in der integrierten Produktentstehung**

LFT

Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM

Saarbrücken 2007

Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung

Dissertation zur Erlangung des Grades des
Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät III
- Chemie, Pharmazie und Werkstoffwissenschaften -
der Universität des Saarlandes

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Marc Bossmann

Tag der Einreichung: 23.01.2007

Tag des Kolloquiums: 10.05.2007

Dekan:	Prof. Dr. Uli Müller
Vorsitzender:	Prof. Dr. Rolf Clasen
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Helmut Bley
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Christian Weber
Akademischer Mitarbeiter:	Dr.-Ing. Avgoustinov

Saarbrücken 2007

Marc Bossmann

Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung

Universität des Saarlandes
Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 38

Geleitwort der Herausgeber

Die Schriftenreihe Produktionstechnik wird von den Inhabern der Lehrstühle für Konstruktionstechnik/CAD (Prof. Dr.-Ing. C. Weber) und für Fertigungstechnik/CAM (Prof. Dr.-Ing. H. Bley) der Universität des Saarlandes gemeinsam herausgegeben. Zweck der Schriftenreihe ist es, die auf dem Gebiet der Produktionstechnik an der Universität des Saarlandes erarbeiteten Forschungsergebnisse einer breiteren Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen. In der Schriftenreihe erscheinen in erster Linie die an den Lehrstühlen entstandenen Dissertationen. Daneben werden aber auch andere Forschungsberichte, die in den thematischen Rahmen passen und von allgemeinem Interesse sind, in die Schriftenreihe aufgenommen. Die Herausgeber wünschen sich ein reges Interesse an der Schriftenreihe und würden sich freuen, wenn hieraus fruchtbare Dialoge mit Praktikern und Forschern entstünden.

Prof. Dr.-Ing. C. Weber

Prof. Dr.-Ing. H. Bley

© Universität des Saarlandes 2007
Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM
Prof. Dr.-Ing. Helmut Bley
Postfach 15 11 50
D – 66041 Saarbrücken

ISBN 3-930429-67-7
978-3-930429-67-7

ISSN 0945-6244

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM der Universität des Saarlandes.

Mein Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Helmut Bley, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungstechnik/CAM der Universität des Saarlandes, der mir die Möglichkeit gab, am Lehrstuhl zu promovieren und die Ergebnisse meiner Arbeit bei verschiedensten nationalen und internationalen Konferenzen sowie Unternehmen zu präsentieren und zu diskutieren. Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Helmut Bley für die Flexibilität bei der thematischen Schwerpunktsetzung bedanken, da sich im Laufe der Zeit immer wieder neue interessante Aspekte ergeben haben.

Für die Übernahme des Korreferates, die konstruktive Kritik sowie die Unterstützung durch hilfreiche Hinweise danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Christian Weber, Inhaber des Lehrstuhls Konstruktionstechnik an der Technischen Universität Ilmenau.

Ebenfalls möchte ich mich bei allen Kollegen und Mitarbeitern der Lehrstühle für Fertigungstechnik/CAM und Konstruktionstechnik/CAD der Universität des Saarlandes bedanken, die in zahlreichen Diskussionen verschiedenste Konzepte und Ergebnisse kritisch hinterfragt haben. Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle meinen Kollegen Herrn Dr.-Ing. Christian Zenner, mit dem ich neben zahlreichen wissenschaftlichen Veröffentlichungen auch eine Vielzahl von Industrieprojekten durchgeführt habe.

Für die tatkräftige Unterstützung bei der Implementierung einiger Ideen bedanke ich mich bei Herrn cand. Ing. Markus Kasper, der verschiedenste Hürden überwinden konnte, wodurch einige prototypische Softwarelösungen entstanden sind.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, die mich auf dem Weg zur Promotion begleitet hat, mir stets ein gutes Vorbild ist und mich in allen Lebenslagen positiv unterstützt. Hierbei möchte ich den beiden wichtigsten Menschen in meinem Leben besonders danken: meiner Freundin, Wiebke Tabellion, und meiner Mutter, Gabi Bossmann, die mir immer mit gutem Rat zur Seite stehen und mir Halt und Stärke geben.

Saarbrücken, im Juni 2007

Marc Bossmann

Kurzfassung der Arbeit

Basierend auf der Tatsache, dass aufgrund der Globalisierung der Märkte sowie des wachsenden Wettbewerbsdrucks die Produktentstehungszeit den entscheidenden Wettbewerbsfaktor für den Erfolg eines Unternehmens darstellt, wird ein umfassendes Konzept der Produktentstehung vorgestellt. Hierbei sind Informationstransfer und Wissensrepräsentation von größter Bedeutung. Daher beruht das neue Konzept auf einer frühest möglichen Vernetzung und Integration aller Abteilungen, die in den Produktentstehungsprozess involviert sind, und einem forcierten Einsatz moderner Software. Innerhalb des Konzeptes wird verstärkt auf flexible Strukturen im Bereich der Produktmodellierung, der Planung der Bauteilfertigung sowie einer abgesicherten Montagesequenzplanung eingegangen. Basis hierfür bilden standardisierte Konstruktionselemente, die unter Verwendung der Feature-Technologie erstellt werden, wodurch es ermöglicht wird, den Konstruktionsprozess zu unterstützen und zu strukturieren. Bei den Feature-Elementen handelt es sich um Skelett- und Funktionselemente, die die Skelettmodellierung standardisieren, wodurch eine höhere Transparenz innerhalb der Produktmodelle erzielt wird, da sie nach einer einheitlicheren Vorgehensweise erarbeitet werden.

Die Feature-Technologie ermöglicht eine Wissensrepräsentation in den digitalen Modellen der Produktentwicklung und der Produktionsplanung, wodurch geometrische Bereiche gezielt angesprochen und Routinetätigkeiten automatisiert vollzogen werden können. Daher wurde ein Konzept für Feature-Kombinationen erarbeitet, dass eine Automatisierung verschiedener Planungsaktivitäten gewährleistet, wodurch es möglich wird Fertigungsalternativen bewerten zu können.

Für die prototypische Umsetzung wurden verschiedene Feature-Elemente erarbeitet, deren Informationen als Eingangsdaten für Fertigungs-Features dienen. Neben der CAD-CAM-Prozesskette werden für den Bereich Montageplanung zwei Methoden zur Ermittlung der Montagereihenfolge vorgestellt. Neben den rein technologischen Aspekten wird eine Methode zur Gruppentechnologie vorgestellt, die unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten flexible Fertigungssysteme analysiert, um Synergieeffekt zwischen Produkten und Produktionssystemen detektieren zu können. Somit bildet das Gesamtkonzept eine Basis zur wirtschaftlicheren Fertigung, da unterschiedliche Planungsebenen mit der Produktentwicklung vernetzt sind, wodurch die verschiedensten Einflüsse aus geometrischer und wirtschaftlicher Sicht bewertet werden können.

Abstract

The awareness that due to the globalisation and growing stress of competition the product development time is the critical factor for companies to stay in market has led to the presentation of a comprehensive concept for product development. In this connexion information transfer and knowledge representation are decisive elements. The new concept is based on an early interaction and integration of all departments that are involved in the product development process and also on laboured software assistance.

Within the concept flexible structures in product design, production and assembly planning as well as in safeguarding of the assembly sequence are the main focus

The basis of the concept is standardised design elements based on feature technology whereby it is possible to support and to structure the design process. The feature elements are referred to as skeleton and functional elements that standardise the skeleton modelling strategy with the result of a higher product transparency following an uniform procedural method.

The feature technology allows knowledge representation in the digital models of product design and also of production planning by what geometrical elements can be selected in a well directed way to automate routine activities in product development. Therefore the concept of feature combinations is developed with the result of automated planning activities with the possibility to evaluate manufacturing alternatives.

For a prototypical implementation different feature elements are developed whose information represents the input for manufacturing features and other planning elements. Beside the CAD-CAM process chain two methods in the field of assembly sequencing are presented. In addition to technological aspects a concept in the field of group technology is introduced that analyses flexible production systems to detect synergy effects of interacting products and production systems. The concept represents a new basis for an economic production based on the interaction of different planning levels connected with the product design model. This makes an evaluation of different impacts from a geometric and an economic view possible.

Inhaltverzeichnis

INHALTVERZEICHNIS	1
1 EINLEITUNG UND MOTIVATION.....	1
1.1 Ausgangssituation.....	3
1.2 Ziele der Arbeit.....	8
1.3 Vorgehensweise und Struktur der Arbeit.....	10
2 PRODUKTENTWICKLUNGSPROZESS IN DER PRODUKTENTSTEHUNG ..	13
2.1 Phasenschema der Produktentwicklung	14
2.1.1 Produktplanung	15
2.1.2 Konstruktion.....	15
2.1.3 Prototypenbau.....	15
2.1.4 Prozessentwicklung.....	16
2.1.5 Vorserie	16
2.1.6 Nullserie	16
2.1.7 Produktionshochlauf.....	17
2.1.8 Barrieren im Produktentstehungsprozess	17
2.1.9 Trends in der Produktentstehung.....	17
2.2 Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik	19
2.2.1 Gestaltung von Produkten und Prozessen	19
2.2.2 Morphologischer Kasten	21
2.3 Modellierungsmethoden	22
2.3.1 CAD	22
2.3.2 Produktmodellierung.....	23
2.3.3 Skelettmodellierung	30
2.3.4 Einsatz der Konstruktionsskelettmodelle	31
2.3.5 Beispiel der Skelettmodellierung – Motorentemplate.....	33
2.3.6 Vor- und Nachteile der Skelettmodellierung	35
2.4 Feature-Technologie.....	36
2.4.1 Begriffsdefinitionen für Feature.....	36
2.4.2 Features	37

2.4.3	Featuretypen	41
2.4.4	Manufacturing-Features (Fertigungs- oder Bearbeitungs-Features)	49
2.4.5	Gezielter Einsatz der Feature-Technologie	51
2.4.6	Wissensspeicherung – Repräsentation	52
2.4.7	Richtlinien für die Verwendung parametrischer und Feature-basierter 3D-CAD-Modelle	59
3	PROZESSENTWICKLUNG IN DER INTEGRIERTEN	
	PRODUKTENTSTEHUNG	61
3.1	Prozessmanagement	61
3.2	Integrierte Produktentwicklung	61
3.3	Kritische Betrachtung von Simulationen.....	69
3.4	Prozessplanung	70
3.4.1	Grundlagen der Fertigungsplanung	71
3.4.2	Grundlagen der Montageplanung	71
3.4.3	Ressourcenplanung.....	73
4	KONZEPT ZUR VERNETZUNG VON PRODUKTENTWICKLUNG UND	
	PROZESSENTWICKLUNG	75
4.1	Konzeptübersicht	76
4.2	5-Ebenen-Modell der Planung	84
4.3	Digitale Fabrik.....	86
4.3.1	Virtual Reality, Virtuelle Fabrik	89
4.3.2	Arbeitssystem Konstruktion	89
4.3.3	Arbeitssystem Produktionsplanung.....	90
4.4	Skelettmodellierung mit Skelett- und Funktionselementen	90
4.4.1	Funktionselemente	91
4.4.2	Skelettelemente	92
4.4.3	Aufbau der Skelettelemente	95
4.5	Skelettmodelle in der Produktionsplanung.....	97
4.5.1	Hierarchieebenen der Skelettmodelle der Produktionsplanung	97
4.5.2	Flexible Fertigungsmodelle.....	100
4.5.3	Schnittstellenkonzept	100

4.5.4	Ableiten der Volumengeometrie	104
4.6	Automatisierte Fertigungsplanung.....	105
4.6.1	Erstellung des Prozessplans	108
4.6.2	Automatisierte Verknüpfung der einzelnen Hierarchieebenen	108
4.6.3	Erstellung von Arbeitsplänen	109
4.7	Automatisierte Montageplanung	110
4.7.1	DMU.....	112
4.7.2	IT in der Montageplanung.....	113
4.7.3	Fügeflächenmatrix.....	113
4.7.4	Fügeflächengraph	116
4.7.5	Montagevorranggraph	116
4.7.6	Dynamische Analyse des Montageprozesses zur Ermittlung der Montagereihenfolge	116
4.7.7	Bewertung der Automatisierbarkeit von Montageoperationen	119
4.7.8	Statische Analyse des Montageprozesses zur Ermittlung der Montagereihenfolge	120
4.8	Fügen durch Schweißen.....	130
4.9	Potentiale von Feature-Kombinationen	132
4.9.1	Kopplung zu weiteren CAx-Anwendungen	132
4.9.2	Skelettelemente als Basisfeature	133
4.9.3	Mess-Feature	133
4.9.4	Weitere Features.....	134
5	PRODUKTIONS-SKELETTMODELLE IM MARKTZYKLUS DES PRODUKTES	135
5.1	Marktzyklus.....	135
5.2	Flexible Fertigungssysteme.....	137
5.2.1	Investitionen in flexible Fertigungssysteme.....	139
5.2.2	Produkt- und Produktionsklassifizierung durch Skelettmodelle und Skelettelemente	140
5.2.3	Ähnlichkeitstheorie von Produkten	142
5.2.4	Möglichkeiten für die Produktionsplanung.....	145
5.2.5	Barrieren für den integrierten Ansatz.....	148

6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	149
6.1	Zusammenfassung.....	149
6.2	Kritische Konzeptbetrachtung.....	155
6.3	Ausblick	156
	QUELLENVERZEICHNIS	159
	Literatur	159
	Normen und Richtlinien	181
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	183
	TABELLENVERZEICHNIS	187
	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	189
	LEBENS LAUF	191

1 Einleitung und Motivation

„Survival of the fittest“ oder natürliche Selektion beschreibt nach Darwin das „Überleben“ einer Lebensform aufgrund ihrer besseren Anpassung an bestehende Umweltbedingungen [Darw84]. Heutzutage wird die Umwelt immer stärker durch den Menschen geprägt, wodurch ihm eine Sonderstellung zugesprochen werden muss. Daher bildet die Selektion durch den Menschen einen Spezialfall, der mit künstlicher Selektion beschrieben wird. Somit besteht der Unterschied zur natürlichen Selektion darin, dass der Mensch Überlebens- und Fortpflanzungskriterien oder Merkmale vorgibt. Wirtschaftssysteme unterliegen einem ähnlichen Sachverhalt, da auch hier der Mensch eine Art der Selektion vornimmt.

Der Unterschied zwischen Unternehmen und Lebewesen besteht darin, dass Eigenschaften nicht auf zufällig auftretenden Genkombinationen basieren, sondern Strategieentscheidungen und Organisationsstrukturen forciert getroffen werden können, um Vorteile zu erzielen und sich gegenüber anderen durchsetzen zu können. Daher kann die Aussage getroffen werden, dass Systeme und Organisationen einen Wettkampf ums „Überleben“ austragen. Sie müssen sich an die stetig verändernden Bedingungen anpassen, um am Markt bestehen zu können. Mit dem Konsumverhalten der Gesellschaft, das starken unvorhersehbaren Schwankungen unterliegt, werden die Rahmenbedingungen für den Verbleib des Unternehmens am Markt definiert, die sich meist nach dem PreisLeistungsverhältnis der Produkte und/oder der Dienstleistungen richten. Daher sind alle Fähigkeiten eines Unternehmens gefordert, die Produkte, den Produktentwicklungsprozess und die Produktion auf den Kunden auszurichten. So ist es z.B. von essentieller Bedeutung für die Hersteller von Mobiltelefonen, dem Kunden neue innovative Entwicklungen in kurzen Zeitabständen anbieten zu können, um mit diesen neuen Funktionalitäten Marktanteile zu erobern oder zu halten. Denn gerade in der Mobiltelefonindustrie hat sich neben der eigentlichen Produktinnovation die Produktentwicklungszeit als der entscheidende Wettbewerbsfaktor neben Qualität und PreisLeistungsverhältnis herausgestellt. Die Absatzzahlen der Unternehmen, die eine Innovation nach einem direkten Konkurrenten auf den Markt bringen, sind bedeutend geringer. Gerade bei Produkten mit kurzen Marktzyklen steht der Produktentwicklungsprozess immer unter dem Druck, den Erfolg des Unternehmens zu sichern. Bei Produkten mit langen Marktzyklen ist dies jedoch nur ein Teilaspekt. So zählen dort mehr das mit dem Produkt verbundene Image oder der Technologievorsprung eines Unternehmens.

Eine Studie von dem Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen und McKinsey&Company, zeigt den in Abbildung 1 dargestellten Unterschied zwischen erfolgreichen

und weniger erfolgreichen Unternehmen bezüglich der Marktanteile bei der Einführung von Produktinnovationen und der Verteilung des Entwicklungsbudgets [McKi00, McKi02].

Weniger erfolgreiche Unternehmen setzen ihr Entwicklungsbudget zum größten Teil für die Optimierung vorhandener Produkte und deren Funktion ein, wohingegen erfolgreiche Unternehmen den Fokus auf neue Produkte und Produktfunktionen legen. Erfolgreiche Unternehmen setzen auf wesentlich kürzere Time-to-Market, um Marktanteile zu erreichen und zu sichern. Frühere Markteinführungen neuer innovativer Produkte verbessern das Unternehmensimage und erschließen somit weitere Marktanteile aufgrund der Vorreiterstellung.

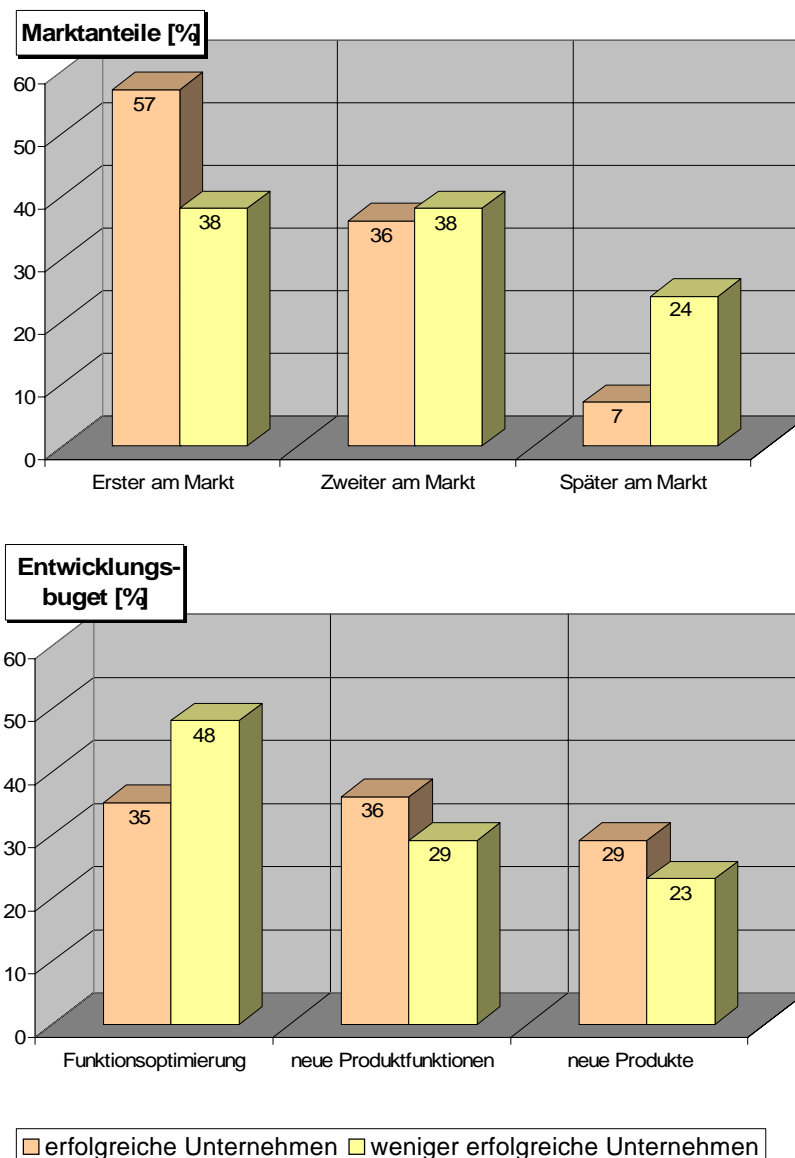


Abbildung 1: Prozentuale Marktanteile bei der Einführung von Produktinnovationen [McKi00, McKi02]

Der Erfolg einer Produktneueinführung spiegelt sich im Unternehmensgewinn wider. Gerade im Bereich von High-Tech-Produkten, wie beispielsweise der Mobilfunkindustrie oder der Chiptechnologie, wirkt sich eine verspätete Markteinführung deutlich negativer aus, als die

klassischen Verfehlungen von Entwicklungs- und Produktionskosten oder dem Absatzpreis. Die verkürzte Time-to-Market und eine daraus resultierende Pionierstellung des Unternehmens führen zu einem höheren Produktionsvolumen, welches sich durch den Effekt der Erfahrungskurve positiv auf die Herstellkosten auswirkt.

Aufgrund von Analysen werden essentielle Eigenschaften von Unternehmen und deren angebotenen Produkten definiert, über die Marktvorteile aus Sicht des Kunden abgeleitet werden können [Capg05]:

- Qualität der Produkte
- PreisLeistungsverhältnis
- Service
- Neue Produktideen (Innovationen)
- Umsetzungsgeschwindigkeit von Innovationen

Aufgrund der Ergebnisse der Analysen ist es von entscheidender Bedeutung, den Produktentstehungsprozess zu beschleunigen, damit Marktvorteile erzielt werden können, um das Überleben des Unternehmens zu sichern. Jedoch gewährleistet die Umsetzungsgeschwindigkeit allein nicht den Erfolg des Unternehmens. So müssen zeitintensive Qualitätssicherungsmaßnahmen im Produktentwicklungsprozess etabliert sein, um den Kundenansprüchen gerecht zu werden und um Imageverluste durch Rückrufaktionen entgegen zu wirken [Roth03, Cele05].

1.1 Ausgangssituation

Die zunehmende Globalisierung der Märkte sowie der wachsende Wettbewerb führten in den letzten Jahrzehnten zur drastischen Verkürzung der Marktzyklen von Produkten. So verringerte sich im Maschinenbau seit 1991 der durchschnittliche Marktzyklus eines Produktes von dreißig auf zwölf Monate [Frau96, Frau00], wodurch das Dilemma entstand, dass der Entstehungszeitraum bei manchen Produkten größer als der eigentliche Marktzyklus ist. Diese Situation zwingt die Unternehmen zu kürzeren Entwicklungszeiten sowie zu niedrigeren Produktentwicklungskosten. Ein im Wettbewerb erfolgreiches Unternehmen unterscheidet sich von der Konkurrenz, indem es seine Produktentwicklungszeit und die Entwicklungskosten senken kann und gleichzeitig den Qualitätsaufwand verringert. Dabei stehen die drei Aspekte Entwicklungszeit, Entwicklungskosten und Qualitätsaufwand in einer engen Verbindung zueinander. Schnellere Entwicklung geht in den meisten Fällen mit einer Finanzersparnis einher, die jedoch die Gefahr einer ungenügenden Anlaufreife birgt, was wiederum mit Nachentwicklungen und Zusatzkosten verbunden ist. Höherer Qualitätsaufwand führt jedoch durch die

höhere Anzahl an Iterationsschleifen im Produktentwicklungsprozess zu einer Verlängerung der Entwicklungszeiten und wirkt sich dadurch negativ auf die Entwicklungskosten aus. Aus einer Studie von Bullinger und Wasserloos geht anhand einer Befragung von 140 industriellen Unternehmen hervor, dass eine frühe Integration aller am Produktentwicklungsprozess beteiligten Abteilungen die größte Reduktion der Entwicklungszeit hervorbringen kann [BuWa90]. Weitere Maßnahmen sowie deren voraussichtlicher Effekt auf die Verkürzung der Produktentstehungszeit sind aus Abbildung 2 zu entnehmen.

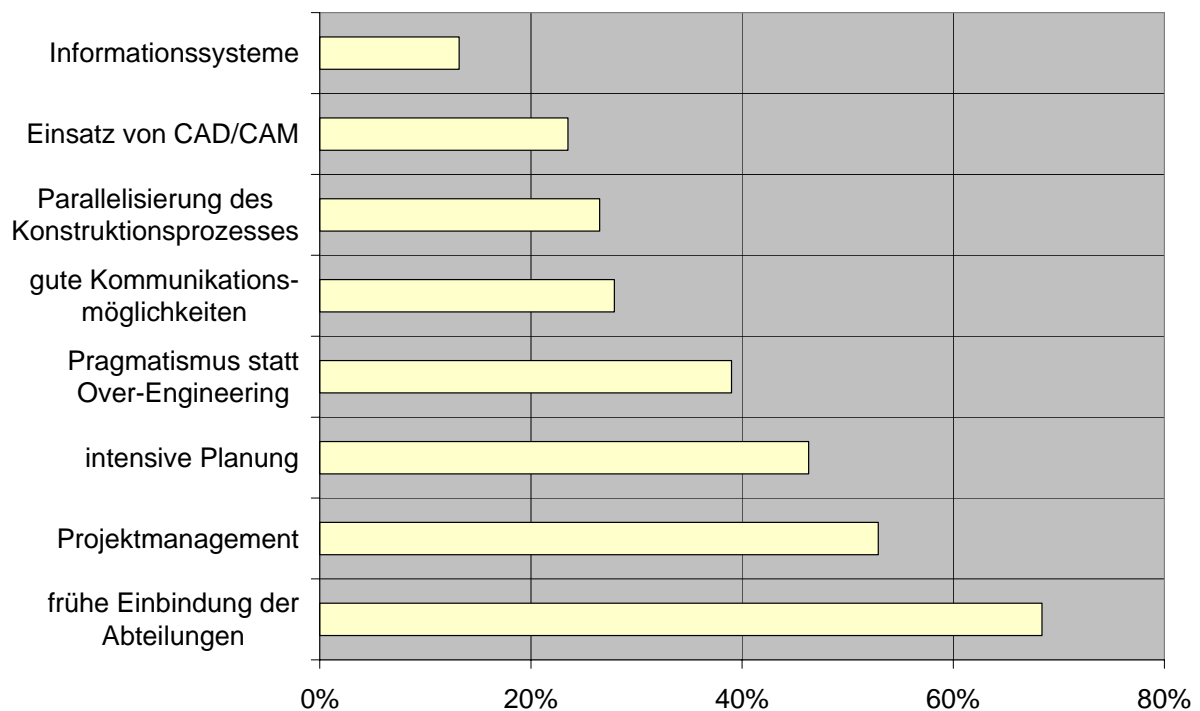


Abbildung 2: Erfolgswahrscheinlichkeiten verschiedener Maßnahmen zur Verkürzung der Produktentstehungszeit [BuWa90]

Eine positive Änderung aller Einflussfaktoren ist nur durch die Integration der digitalen und virtuellen Produktentwicklung sowie durch einen konsequenten Einsatz innovativer Simulationenmethoden möglich [AlNo03]. Aufgrund der gestiegenen Komplexität der Produkte sowie der Forderung nach immer kürzeren Entwicklungszeiten kommt der Produktbeschreibung im Rahmen des Computer Aided Engineering (CAE) eine immer wichtigere Rolle zu. Neben der Verknüpfung mit Fertigungs- und Arbeitsplanung können Werkzeuge zur Produktanalyse (z.B. Finite Elemente Methode (FEM)) und Produktoptimierung (z.B. Virtual Reality, Rapid Prototyping) sinnvoll eingesetzt werden. Basis für die Verknüpfung der verschiedenen Phasen des Marktzyklus ist die Gewährleistung eines sicheren Informationsflusses [HeHW99].

Zur Optimierung des Ablaufes des Produktentstehungsprozesses kursieren in der Literatur zwei Begriffe: Simultaneous Engineering (SE) und Concurrent Engineering (CE), die sich als

Ecksteine der Produktivitätssteigerung herausgestellt haben. Grundsätzlich beschreiben beiden Methoden die Forderung nach einer Parallelisierung aller Abläufe, um den Produktentstehungsprozess zu beschleunigen. Ein wesentlicher Bestandteil des Concurrent Engineering Konzepte ist neben der Intensivierung der Teamarbeit und des damit verbundenen Wissenstransfers eine Reduktion der Regelkreise über den gesamten Prozess. Die Definitionen und Konzepte zur Parallelisierung der Aufgaben werden in Kapitel 3 näher beschrieben. Zur wirkungsvollen Förderung der Teamarbeit gibt es die Werkzeuge Reengineering und Total Quality Management (TQM). Der CE-Prozess hat neben der Forderung nach Parallelisierung auch den Anspruch einer Reduktion der Iterationsschleifen im Produktentstehungsprozess.

Die Erkenntnis, dass in der Konzeptphase der Konstruktion die Kosten und die Qualität der herzustellenden Produkte weitestgehend festgelegt werden, ist weit verbreitet. Abbildung 3 zeigt die in der Literatur durchschnittlich angegebenen Werte der Kostenverursachung und der Kostenverantwortung der in den Produktentwicklungsprozess involvierten Abteilungen [Diet95, EHSS91, Ever98, LoSc94, VDI2235, Wozn92].

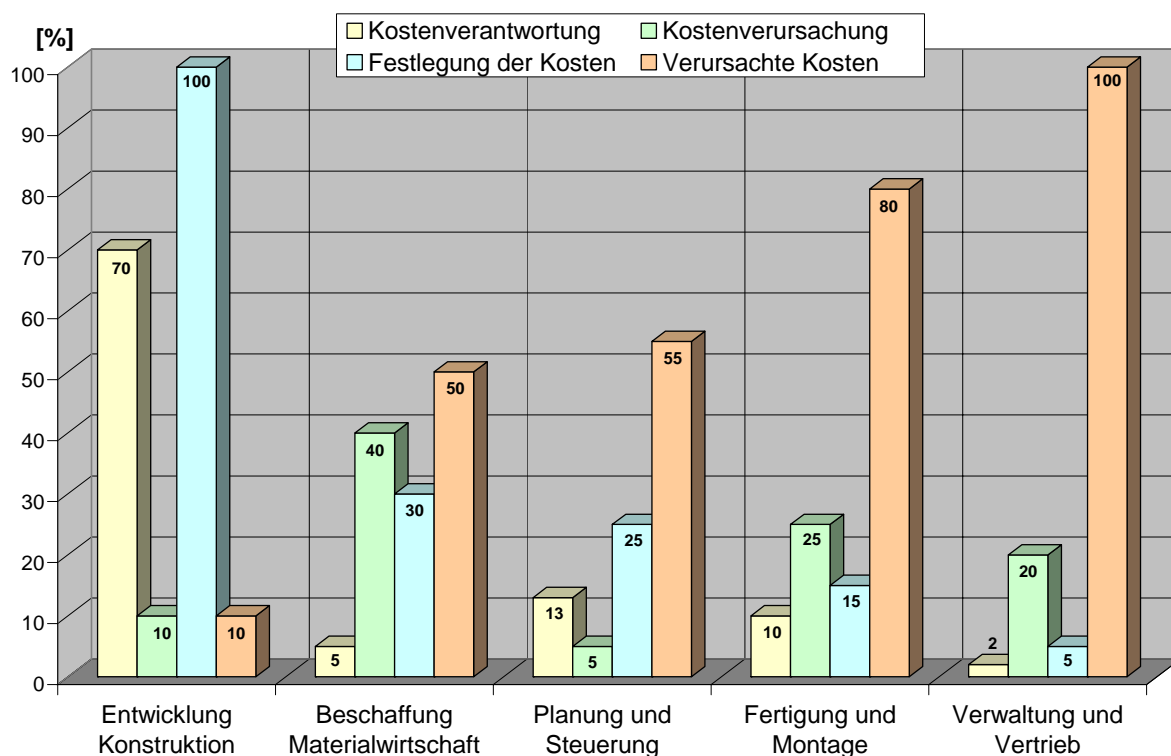


Abbildung 3: Kostenverursachung und Kostenverantwortung in der Produktentwicklung [Ever98]

Erste Ansätze für einen integrierten Produktentwicklungsprozesses liefern Konstruktionsrichtlinien [VDI 3237, Rieb89], die fertigungs- und montagespezifisches Wissen berücksichtigen, um geringere Produktpassungen an die Prozesse erforderlich zu machen oder kostenintensive Prozesse zu vermeiden.

Die Kommunikation zwischen den Abteilungen ist jedoch nicht Teil der Richtlinien, wodurch immer noch die gesamte Kostenverantwortung bei der Konstruktion liegt. Die Notwendigkeit, bereits in den frühen Entwicklungsphasen die Herstellbarkeit durch abteilungsübergreifende, teamorientierte Produktentwicklung zu berücksichtigen, führte daher zur Entwicklung und Anwendung von Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) [BoDK02]. DFMA berücksichtigt in der Konstruktion Aspekte der Fertigung und der Montage, so dass ungünstige Konstruktionsmerkmale vermieden werden. Sind die Produkte durchgängig nach den Regeln der DFMA konzipiert, sollten die Herstellbarkeit von Komponenten und die Montage des Produktes aus technischer Sicht gewährleistet sein. Jedoch führte auch dieser Ansatz nicht zur gewünschten Integration der Abteilungen. Es wurde lediglich eine Performanceverbesserung hinsichtlich der Datentransparenz erzielt.

Nach Abbildung 2 sehen 23,5% der Unternehmen den Einsatz von CAD/CAM-Methoden als eine Möglichkeit, den Produktentstehungsprozess zu verkürzen. Heutigen Einschätzungen zur Folge müsste dieser Wert jedoch deutlich höher ausfallen, da in den letzten 15 Jahren gerade der Einsatz von IT-Systemen deutlich an Zuwachs gewonnen hat. Dieser Zuwachs begründet sich auf der Unterstützung von Routinetätigkeiten, die teilautomatisiert oder sogar vollautomatisiert ablaufen.

Aus Rentabilitätsgesichtspunkten wird die Notwendigkeit des Einsatzes digitaler Werkzeuge (CAD/CAM/CAx) noch deutlicher, wenn die Auswirkungen des Zeitfaktors in der Produktentwicklung näher beleuchtet werden. So wirkt sich beispielsweise bei einer Produktlebenszeit von fünf Jahren eine Verlängerung der Entwicklungszeit um sechs Monate so aus, dass mit einer produktbezogenen Verringerung des Cash-Flows um 30% zu rechnen ist [BaRi00]. Die gleiche Studie ergibt, dass bei 50% höheren Kosten für Entwicklung und Produktionsanlauf lediglich mit einer Verringerung des Cash-Flows um 5% zu rechnen ist, was deutlich macht, dass die Zeit sich zu dem entscheidenden Erfolgsfaktor in der Produktentwicklung ist [Cors98]. Schon in den frühen Phasen der Produktentstehung werden mit dem Aufbau der Produktstruktur Vorentscheidungen getroffen, die die späteren Fertigungs- und Montageprozesse sowie die logistischen Abläufe betreffen. Die Entwicklung und Umsetzung von Zeitstrategien dürfen daher nicht isoliert betrachtet werden, sondern müssen im Gesamtkontext mit den Zielgrößen Kosten, Zeit und Qualität vereinbart werden. Ein weiteres Ziel wird bei den Unternehmen in einem schnellen Produktionsanstieg gesehen, der der Forderung nach Qualität und Ausbringung ebenfalls gerecht werden muss.

Durch kürzere Innovationszyklen und einem rapiden Anstieg der Nachfrage nach kundenindividuellen Produkten werden produzierende Unternehmen gezwungen die steigende Anzahl an

Produktvarianten zu managen. Basierend auf der Zunahme an Produktvarianten entstehen komplexere Planungsaufgaben und führen daher zu aufwändigeren Organisationsstrukturen [MoVM03, WeJR03, Warn93]. Die Beherrschung der Variantenvielfalt in allen Facetten der Produktionsplanung (Produkte, Prozesse, Ressourcen) stellt einen weiteren Wettbewerbsfaktor produzierender Unternehmen dar [Zenn06].

Das Resultat einer variantenreichen Serienproduktion mit vielfach kurzfristig schwankenden Abrufen verursacht zusätzlich Schwankungen in der Fertigung und Fertigungssteuerung [ZäRW05]. Für die Fabrik- und Fertigungsplanung ergeben sich somit folgende wesentliche Herausforderungen: Es müssen mehr Planungsaufgaben (Neu- und Umplanungen) in wesentlich kürzerer Zeit bewältigt werden; daher sind die Produktionssysteme von Beginn an so zu gestalten, dass sie flexibel auf auftretende Nachfrageschwankungen reagieren können. Ebenso steigt die Komplexität der Planungsaufgaben deutlich an, dies zeigt sich besonders bei der Auslegung von Betriebsmitteln, da dynamische Zusammenhänge und stochastische Parameter detailliert berücksichtigt werden müssen. Ein etabliertes Werkzeug zur Analyse, Bewertung und Optimierung dynamischer Zusammenhänge in Produktionssystemen ist die Materialflusssimulation, deren Einsatz wegen der erforderlichen Güte der Eingangsdaten aber meist erst in späten Phasen des Produktentstehungsprozesses sinnvoll ist. Dabei entsteht bei der Feinplanung ein hoher Aufwand für die Modellerstellung und Experimentdurchführung.

Somit lässt sich zusammenfassend sagen, dass neue Methoden erstellt werden müssen, die einerseits die eigentliche Arbeit in der Produkt- und Prozessentwicklung unterstützen, und andererseits die Kooperation untereinander verstärkt wird, um den Informationsaustausch zielgerichtet unter geringstem zeitlichen Aufwand zu realisieren. Somit tritt die Forderung einer integrierten Produktentwicklung und Produktionsplanung immer mehr in den Vordergrund, da ihr die größten Potentiale bei der Optimierung des Produktentstehungsprozesses zugesprochen werden [ReDü00, KrBB02]. Von Seiten der Industrie besteht ebenfalls verstärkt die Forderung nach einer Bewertbarkeit von Produktvarianten oder Produktalternativen hinsichtlich aller Aspekte der Produktentwicklung. Diese Bewertungen sollen online erfolgen, um schneller Entscheidungen treffen zu können. Hierzu werden die Ziele einer stärkeren Parallelisierung der Prozesse im Sinne eines Concurrent Engineering gefordert, um Auswirkungen von Modifikationen vergleichen zu können. Besondere Bedeutung bekommen daher großflächig vernetzte IT-Systeme [LiRI97], um eine größtmögliche Automatisierbarkeit hervorzurufen, die es erlaubt, Varianten für alle Bereiche zu erzeugen und somit eine fundierte Entscheidungsbasis bilden.

1.2 Ziele der Arbeit

Basierend auf dem Ergebnis, dass der Aspekt der Zeit mittlerweile einer der entscheidenden Wettbewerbsfaktoren für Unternehmen darstellt, besteht die Forderung nach Methoden und Konzepten, die die Gestaltung eines zeitoptimierten Produktentwicklungsprozesses gewährleisten sollen.

Das Augenmerk liegt daher auf der Beschleunigung des Produktentwicklungsprozesses. Hierzu muss die Art und Weise des Informationsmanagements optimiert werden, da es die Grundlage eines schnellen Produktentwicklungsprozesses bildet [AlBM02]. Bei der Strukturierung des Entwicklungsprozesses sollen auch andere Problemstellungen berücksichtigt und Verbesserungen im Bereich von Methoden und Konzepten erarbeitet werden, wobei jedoch die Konzeption eines integrierten Produktentstehungsprozesses im Vordergrund steht. Ein wichtiges Merkmal des „Lean Product Development“ ist die Integration aller bedeutenden Aspekte von Beginn bis Ende der Produktentstehung [KaAh96], der als Grundgedanke verstanden werden kann. Die Anforderungen an einen integrierten und parallel ablaufenden Produktentwicklungsprozess (IPD – integrated Product Development Process) sind nach [Ehr195]:

- Flexible Strukturen (Anpassungsfähigkeit)
- Durchgängigkeit der Daten
- Datentransparenz
- Abbildung von Produkt-, Prozess- und Produktionsvarianten (Ressourcevarianten)
- Einsatz moderner Methoden

Eine Reihenfolge der Wertigkeiten der Anforderungen kann nicht erstellt werden, da man die Forderung nach einem beschleunigten Produktentstehungsprozess nur durch die Umsetzung aller genannten Ziele erreichen kann. Flexible Strukturen beziehen sich in diesem Fall nicht auf die Flexibilität der Abteilungen, sondern auf flexible, leicht modifizierbare Datenmodelle. Mit der Forderung nach Durchgängigkeit der Daten sowie einer offenen Gestaltung der Modelle und Ergebnisse aller Abteilungen können Änderungen leichter durchgeführt werden. Der Aspekt der Datentransparenz ist Grundlage für Verbesserungen innerhalb des Produktentwicklungsprozesses, da dieser über den gesamten Zeitraum der Produktentwicklung Änderungen unterliegt, die durch eine bessere Transparenz der Daten bewertet werden können. Durch flexible Strukturen in Konstruktion und Fertigungsplanung soll die Möglichkeit zur Darstellung von Produkt- und Prozessvarianten gegeben werden. Somit bilden bereichsüber-

greifende Ergebnisse die Grundlage für Entscheidungen, da sie durch die Vernetzung der Abteilungen eine umfassende Sicht auf die Auswirkungen und die Unterschiede von Produkt- und Prozessvarianten verdeutlichen.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen neuen Fertigungs- und Planungskonzepte erstellt werden, die die Grundlage für die Vernetzung von Produktentwicklung und Produktionsplanung bilden. Zur Gewährleistung der Prozessparallelisierung muss der Produktentwicklungsprozess in Meilensteine gegliedert werden, damit zu definierten Zeitpunkten „freigegebene“ Daten von der Konstruktion zur Planung transferiert werden, um einen strukturierten Entstehungsprozess und Informationsfluss zu erzeugen. Damit dieser integrierte Produktentstehungsprozess auch zukünftig genutzt werden kann, gilt es, neueste Methoden aus Konstruktion, Fertigungsplanung und Datenmanagement zu berücksichtigen, wobei eine Austauschbarkeit einzelner Methoden und Module gewährleistet werden soll.

Bei der Implementierung des Konzeptes liegt das Hauptaugenmerk auf dem Informationsmanagement und dem Informationsaustausch [AlBM02, MäNS96, ThWe97]. Die Information ist zwar als das wichtigste Gut eines Unternehmens zu behandeln, jedoch ist es nicht sinnvoll, die gleichen Informationen in verschiedenen Formen zu speichern. Daher ist es von enormer Bedeutung, ein Konzept zu erstellen, das über die verschiedensten Abteilungen hinweg eine Unterstützung darstellt, indem Daten in geeigneter redundanzfreier Form abgelegt werden können.

Zurzeit existiert eine Vielzahl an Konzepten und Methoden, um aktuellen Problemen mit der Integration zusätzlicher Daten entgegen zu wirken. Für die Art der Speicherung sowie der Gültigkeit von Informationen müssen jedoch noch Konzepte erarbeitet werden, die diese Datenflut bewerkstelligen können. Daher ist es das Ziel, „einfache“ Strukturen zu entwickeln, die einen hohen Wirkungsgrad besitzen. Ebenfalls soll mit dem neuen Konzept die Möglichkeit bestehen, weitere Informationen strukturiert zu integrieren, um zukünftige gestellte Anforderungen an den Produktentwicklungsprozess erfüllen zu können. Somit besteht die Forderung nach einem beliebig erweiterbaren Ansatz für die Vernetzung von Produktentwicklung und Produktionsplanung.

Ein gezielter Datenzugriff bildet den Fokus aktuell entwickelter Methoden und Konzepte. Daher werden bestehende Ansätze und Konzepte meist mit Informationselementen erweitert, die ein speziell auftretendes Problem lösen. Hierbei geht jedoch oftmals der globale Blick auf den Produktentwicklungsprozess verloren, wodurch die Durchgängigkeit der Daten nicht immer berücksichtigt wird. Ziel eines integrierten Produktentstehungsprozesses, der mit der vorliegenden Arbeit unterstützt werden soll, muss zum einen die Durchgängigkeit der Daten sein

und zum anderen sollen die verschiedensten Aspekte der Produkt- und Prozessentwicklung berücksichtigt werden, um eine Interaktion der Abteilungen zu unterstützen.

1.3 Vorgehensweise und Struktur der Arbeit

Bei dem zu entwickelnden Konzept handelt es sich um einen ganzheitlichen Ansatz für die Produktentwicklung. Er berücksichtigt die Anforderungen aus den Ansätzen der integrierten Produktentwicklung und des Simultaneous Engineering sowie des Concurrent Engineering. Der Produktentwicklungsprozess wird bezüglich des Datenmanagements strukturiert, damit die Parallelisierungspotentiale von überlappenden Prozessen weitestgehend genutzt werden können. Ähnlich der Optimierung von Produktionsprozessen unterliegt der strukturierte Datentransfer einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess, mit dessen Anpassung weitere Optimierungen eingeleitet werden können.

Um den Prozess des Simultaneous Engineering zu unterstützen, zeitkritische sowie zeitaufwändige Tätigkeiten zu detektieren und Aufgaben zu parallelisieren, wird der Produktentstehungsprozess unter dem Aspekt Zeitaufwand analysiert. Neben der Beschleunigung des Produktentstehungsprozesses soll ebenfalls die Planungsqualität gesteigert werden, indem ein integrierter Planungsprozess gestaltet wird. Hierbei soll es ermöglicht werden, abteilungsübergreifend, durchgängig, wirtschaftlich sowie produkt- und prozessorientiert zu entwickeln und zu planen.

An die Analysephase schließt sich die Konzeptentwicklung an, die sich mit der Erarbeitung von Methoden beschäftigt, die zeitaufwändige Tätigkeiten minimieren, indem sie größtmöglich automatisiert werden. Die Modelle der Konstruktion und der Produktionsplanung sollen zusätzlich eine hohe Flexibilität aufweisen, die es erlaubt, Prozess- oder Produktvarianten durchgängig zu unterstützen. Damit zeitaufwändige Anpassungen in Konstruktion und Planung entfallen, werden die Modelle auf unterschiedlichen Ebenen miteinander vernetzt. Ziel sind daher flexible Produkt- und Planungsmodelle, die sich auch für ein Szenariomanagement eignen, um Alternativen in der Produktionsplanung berücksichtigen zu können, ohne diese Modelle manuell erstellen zu müssen. Besonderer Fokus hierbei liegt auf der Verknüpfung der Modelle der Konstruktion mit der Fertigungs- und Montageplanung.

Die Arbeit ist in drei Teile gegliedert, wobei der erste Teil den Stand der Technik im Bereich des Simultaneous Engineering und der integrierten Produktentwicklung darstellt. Der zweite Teil beschäftigt sich mit der Herleitung eines Konzeptes zur Parallelisierung der Aktivitäten in der Produktentwicklung und zur Steigerung des Wissenszuwachses. Die Vernetzungen innerhalb der CAx-Technologien basieren auf der Feature-Technologie, die die bereits in der

VDI 2218 [VDI2218] beschriebenen Potentiale besitzt, um eine Performanceverbesserung innerhalb des Produktentstehungsprozesses hervorzurufen. Der Fokus liegt auf der Automatisierung von Planungsaktivitäten und der Absicherung der Produkt- und Produktionsdaten hinsichtlich verschiedener Kriterien des „Design for X“. Im dritten Teil der Arbeit wird die Konzeptumsetzung beschrieben, wobei das Hauptaugenmerk auf der Unterstützung der Fertigungs- und Montageplanung liegt, aber auch neue Ansätze für die Klassifizierung von Produkten und Produktionseinrichtungen gegeben werden. Zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens muss die in Abbildung 4 dargestellte Vernetzung innerhalb der Produktentstehung realisiert werden, damit die aufgeführten Zeiteinsparungen erzielt werden können.

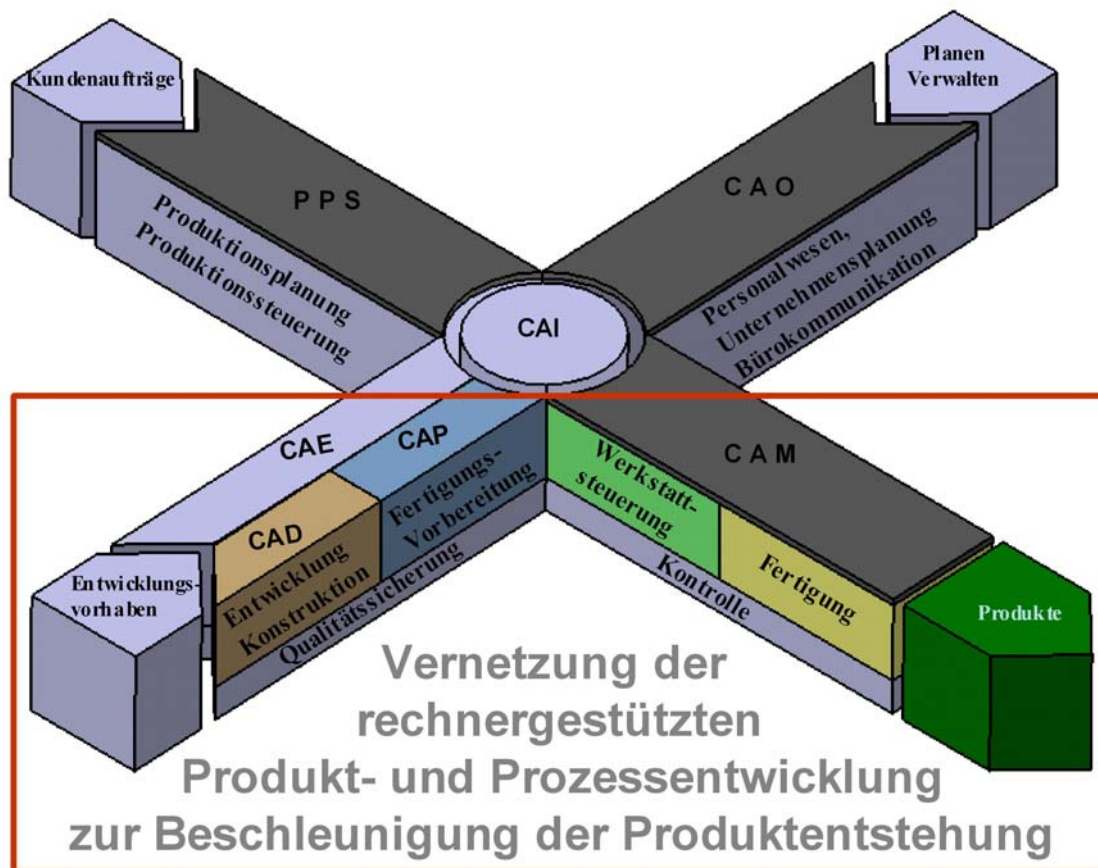


Abbildung 4: Anforderungen an das zu erstellende Konzept in Anlehnung an [Spur98]

2 Produktentwicklungsprozess in der Produktentstehung

Der Produktentstehungsprozess beinhaltet die Aufgaben der strategischen Produktplanung, der Produktentwicklung sowie der Prozessentwicklung. Daher erstrecken sich die Aufgaben von der Produktidee über die Produktionsplanung bis hin zum Startpunkt der Serienproduktion eines Produktes. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Umsetzung der Produktidee in modernen CAD-Systemen sowie den IT-technischen Planungsaktivitäten innerhalb der Technischen Produktionsplanung [Zenn06].

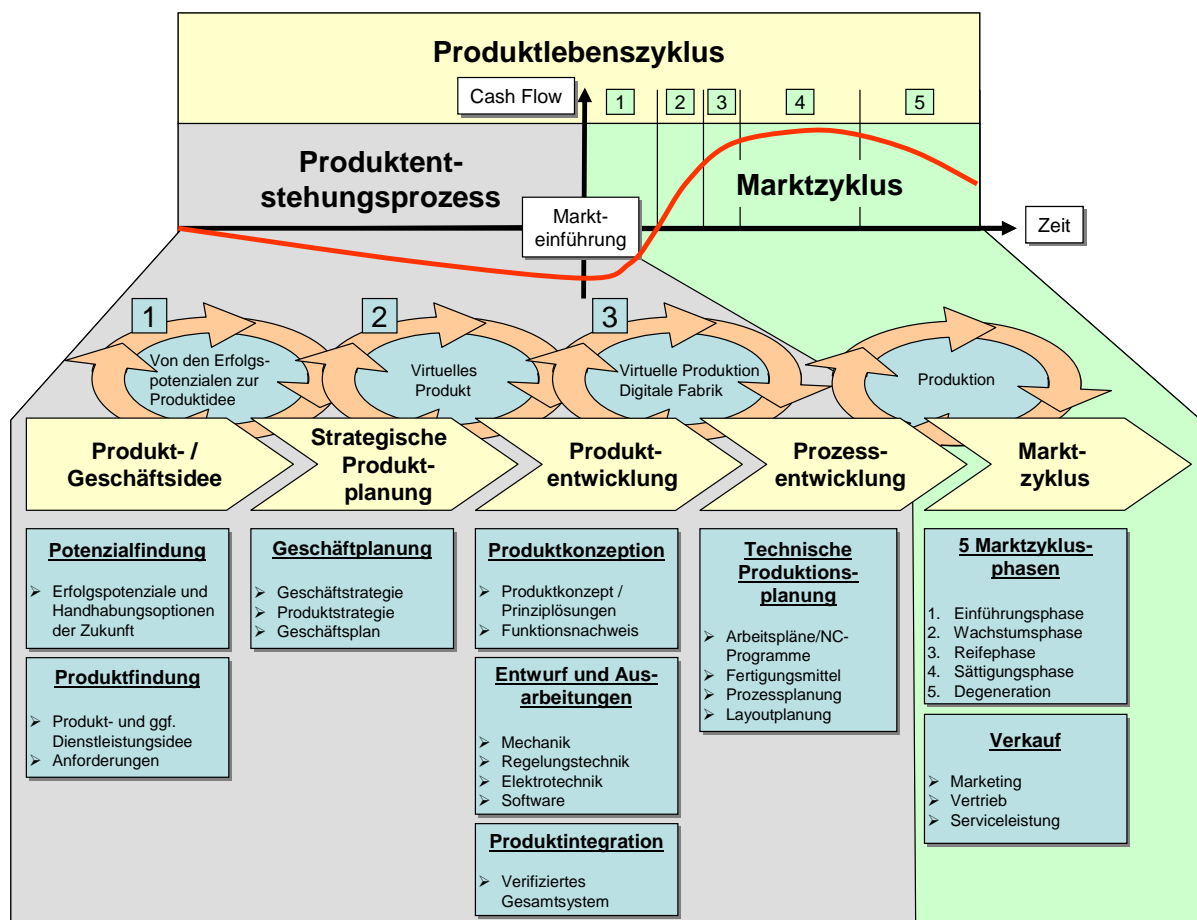


Abbildung 5: Produktentstehungsprozess in Anlehnung an [GaEK01]

Der in Abbildung 5 dargestellte Produktentstehungsprozess beinhaltet als ersten Zyklus die strategische Produktplanung. Der Zyklus ist charakterisiert durch das Auffinden erfolgversprechender Produkt- und Geschäftsideen und umfasst die Aufgabenbereiche Potentialfindung, Produktfindung, Geschäftsplanung und Produktkonzipierung. Die Produktentwicklung bildet den zweiten Zyklus der Produktentstehung. Hierbei wird auf die eigentliche Produktentwicklung aus Sicht der Konstruktion eingegangen. Experten der Domänen Mechanik,

Steuerungs- und Regelungstechnik, Elektrotechnik und Softwaretechnik arbeiten gemeinsam an der Ausarbeitung der Produktkonstruktion. Die Prozessentwicklung bildet den dritten dargestellten Zyklus und bezieht sich auf die Ausarbeitung der Fertigungsplanung und den Serienanlauf der Produktion. Ziel der Fertigungsplanung ist die Bestimmung der Arbeitsanweisungen und die Auswahl der Fertigungsmittel. Im Rahmen des Serienanlaufs erfolgt eine Optimierung des Produktes und des Fertigungssystems. Der Zyklus der Produktentwicklung wird im weiteren Verlauf des Kapitels beschrieben, auf den Zyklus der Prozessentwicklung wird in Kapitel 3 eingegangen.

2.1 Phasenschema der Produktentwicklung

Im Folgenden wird der Ablauf der Produktentwicklung als wesentlicher Bestandteil des Produktinnovationsprozesses beschrieben. Der Ablauf eines Entwicklungsprozesses ist eine unternehmensspezifische Angelegenheit, wobei sich jedoch eine Reihe von unternehmensunabhängigen Gemeinsamkeiten im Ablauf wieder finden lassen. Abbildung 6 zeigt exemplarisch das Phasenschema eines Automobilherstellers, anhand dessen die einzelnen Phasen näher erläutert werden. [BaRi00]

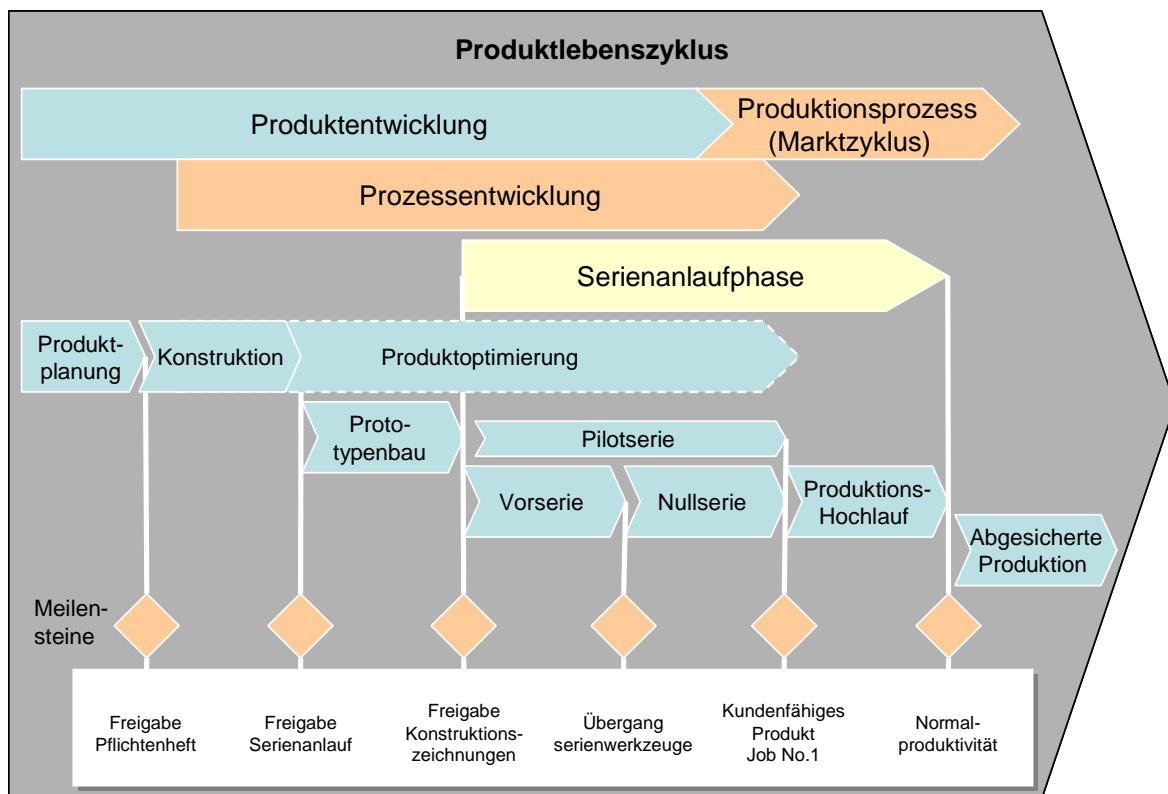


Abbildung 6: Phasenschema des Produktentstehungsprozesses in Anlehnung an [BaRi00]

2.1.1 Produktplanung

In diesem ersten Teilprozess stehen die Konkretisierung und der Transfer der Produktidee in ein Entwicklungsprojekt im Vordergrund. Der Produktentwicklungsprozess ist Resultat eines Projektauftrags, der entweder aus einem Kundenwunsch oder einer Neuentwicklung des Unternehmens hervorgehen. Basierend auf dem Projektauftrag für ein Produktkonzept wird bereits an dieser Stelle der Entwicklungsprozess konzeptionell geplant. Anhand einer dreistufigen Vorgehensweise werden die Schritte Produktstrategie, Produktprofilplanung und Produktkonzeptplanung mit der Erstellung des Pflichtenheftes abgearbeitet. Die Produktplanung ist für die Erfolgsfaktoren Kosten, Zeit und Qualität von entscheidender Bedeutung. In dieser Phase werden nach Reichwald basierend auf Ergebnissen ausgewählter Projektbeispiele [ReSc90] 70-80% der Gesamtentwicklungsdauer, 60% der Entwicklungskosten und 70% der Produktqualität festgelegt.

2.1.2 Konstruktion

Auf Basis der Ergebnisse der Produktplanung werden im Konstruktionsprozess die genauen Produkteigenschaften in Form von Informationen auf unterschiedlichen Medien, wie z.B. Zeichnungen oder Stücklisten erstellt. Ergebnis des Konstruktionsprozesses ist eine umfassende Dokumentation, die es ermöglicht, das Produkt zu realisieren. Bezüglich der Arbeitsschritte lassen sich für den Konstruktionsprozess Unterschiede feststellen, die auf der Stückzahl der zu entwickelnden Produkte basieren. Für Einzelstücke bzw. Kleinserien oder Serienprodukte lassen sich drei Hauptphasen unterscheiden, denen nach Schönfeld et al. folgende Zeitanteile zugeordnet werden können [SPSF80].

- Konzipieren (0-10%)
- Entwerfen (20-40%)
- Ausarbeiten (50-60%)

Aus den Kennzahlen ist es leicht ersichtlich, dass die größten Einsparpotentiale in der Entwurfs- und in der Ausarbeitungsphase liegen, wodurch die Erarbeitung von Konzepten und Methoden für diesen Bereich zum Kernelement der Arbeit definiert werden.

2.1.3 Prototypenbau

Nach der Konstruktionsphase wird mit dem Bau und dem Testen von Prototypen begonnen. Ein Prototyp weist alle wesentlichen Merkmale des Endproduktes auf und dient daher zum

Test der Leistungsfähigkeit des Produktes und stellt somit indirekt den Produktreifegrad dar. Im Prototypenbau werden drei Hauptphasen unterschieden:

- Grundfunktionsprüfung
- Zuverlässigkeitsprüfung
- Prüfung auf Produktionsfähigkeit

Zur Beschleunigung des Prototypenbaus und somit auch der Gesamtentwicklungsdauer wurden Rapid Prototyping Verfahren entwickelt, die es ermöglichen, beliebige Geometrieelemente in relativ kurzer Zeit herzustellen. Durch den Prototypenbau werden Konstruktions- und Fertigungsprobleme früher erkannt, wodurch rechtzeitig Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können. Insbesondere bei der Entwicklung von komplexen Produkten, wie z.B. von Automobilen, ist es unerlässlich, die physische Übertragung der Ergebnisse aus der Entwicklung und des Prototypenbaus auf die Produktion in Form einer Pilotserie, die meist in die Phasen Vorserie und Nullserie unterteilt ist, zu transferieren.

2.1.4 Prozessentwicklung

Parallel zur Produktentwicklung werden die Arbeitsabläufe innerhalb der Prozessentwicklung geplant, um den Serienherstellungsprozess vorzubereiten. Die Arbeitsvorbereitung beinhaltet die Arbeitsplanung, auf die in Kapitel 3 näher eingegangen wird.

2.1.5 Vorserie

In der Vorserie werden Prototypen in großer Stückzahl unter seriennahen Bedingungen hergestellt. Eingesetzte Materialien, Werkzeuge, Anlagen und Prozesse stimmen weitestgehend mit denen in der Serienproduktion überein, um verlässliche Aussagen bezüglich der Produktqualität und der Prozessstabilität treffen zu können. Durch den Einsatz von Virtual Reality (VR) lassen sich umfangreiche Entwicklungen und Tests von Prototypen reduzieren. Aus Produkthaftungsgesichtspunkten kann jedoch nicht vollständig auf diese Phase verzichtet werden.

2.1.6 Nullserie

Die Nullserie repräsentiert eine seriennahe Produktion, in der Teile, Module und Systeme mit Serienwerkzeugen hergestellt werden. Die Zulieferer fertigen bereits unter Serienbedingungen, wodurch eine Integration mit dem OEM (Original Equipment Manufacturer) stattfindet. Von Wagenheim beschreibt, dass in der Nullserie immer noch 20% Änderungen anfallen und

sogar 50% aller Änderungen an Produkten und Prozessen erst nach dem Serienstart durchgeführt werden [Wage98].

2.1.7 Produktionshochlauf

Nachdem die Pilotserie abgeschlossen ist und eine Freigabe für die Serienproduktion erteilt wurde, beginnt die Produktion des ersten kundenfähigen Produktes. Dieser Zeitpunkt wird „Job No. 1“ genannt, da das erste Teil unter Serienbedingungen produziert wird. Die Beschleunigung der Produktion spiegelt sich in der so genannten Anlaufkurve wider, indem ein steilerer Anstieg erzielt wird. Heutzutage werden durchschnittlich sechs Monate benötigt, bis die geforderten Qualitäts- und Produktziele erreicht sind. Das Ziel des Produktionsanlaufes ist eine möglichst steile Anlaufkurve bei gesicherter Qualität.

2.1.8 Barrieren im Produktentstehungsprozess

Der Produktentstehungsprozess ist durch eine hohe Anzahl an Schnittstellen sowohl zwischen internen als auch zwischen internen und externen Unternehmensfunktionen gekennzeichnet. Insbesondere im Unternehmen selbst gibt es vielfältige Schnittstellen, die speziell zwischen Konstruktion und Produktion, Logistik und Produktion sowie zwischen Produktion und Marketing auftreten. An diesen Schnittstellen existiert in der Regel nur eine geringe Anzahl an Routineprozessen, die einen reibungsfreien Datentransfer oder strukturierten Ablauf gewährleisten.

Durch die auftretenden Fehler, die im Rahmen der Pilotserie oder des Produktionshochlaufes ermittelt werden, werden technische Änderungen oder sogar Neukonstruktionen notwendig, um die geforderte Funktionalität und/oder Qualität zu erzielen. Diese Änderungen führen zu Rückkopplungen mit zeitlich vorgelagerten Unternehmensbereichen, woraus eine verzögerte Time-to-Market resultiert.

Für die Einhaltung der geplanten Entwicklungszeit ist es von entscheidender Bedeutung, dass notwendige Änderungen frühzeitig erkannt und in einem zeitlich akzeptablen Rahmen durchgeführt werden können.

2.1.9 Trends in der Produktentstehung

Ein maßgeblicher Bestandteil des Produktentstehungsprozesses ist die Produktentwicklung, die sich mit dem eigentlichen Prozess der Produktfindung und der Umsetzung der Funktionalitäten beschäftigt. Sind die Funktionen und die Bauteile zur Erfüllung der Funktion einmal definiert, ist das Produkt weitgehend irreversibel fixiert [Schu94, RADT95]. Die Entwicklung ist daher der entscheidende Faktor für den Erfolg eines Produktes, da in der Entwicklung die

Kosten für alle Folgeabteilungen, wie in Abbildung 3 gezeigt wird, maßgeblich beeinflusst werden. Mit der Konzeptfreigabe ist die Entwicklung weitgehend vorgegeben, da das Pflichtenheft schon definiert ist. Nach Eversheim sind zu diesem Zeitpunkt bereits 90% der funktionalen Eigenschaften, 80% des Zeitbedarfs, 70% der Qualitäts- und 60% der Herstellkosten definiert [Ever95].

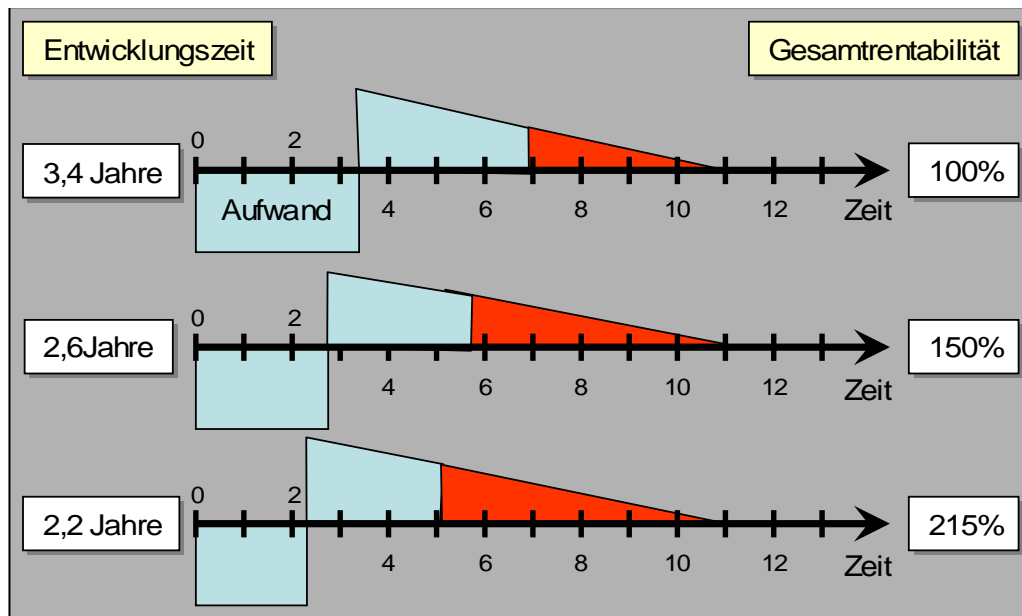


Abbildung 7: Gesamtrentabilität in Abhängigkeit von der Time-to-Market [Puhr90]

Durch eine Verkürzung der Entwicklungszeit kann die Gesamtrentabilität gesteigert werden. Die Auswirkungen der reduzierten Entwicklungszeit auf die Gesamtrentabilität nach Phur werden in Abbildung 7 wiedergegeben. Bei einer Zweidrittellung der Entwicklungszeit und gleichzeitig gleich bleibendem Marktzyklus kann nach [Puhr90] mehr als eine Verdopplung der Gesamtrentabilität erzielt werden. Der Aufwand für die Produktentwicklung wird unterhalb der Zeitachse aufgezeigt. In gleicher Farbe ist der Umsatz über die Zeit gezeigt, der benötigt wird, um den Aufwand zu neutralisieren. Der andere Teil des Umsatzes ist der Gesamtrentabilität zuzuordnen.

Nach der Produktfreigabe, die im besten Fall keine Änderungen mehr hervorruft, werden jedoch aus Fertigungssicht oft Unzulänglichkeiten festgestellt, wodurch trotz des „fixierten“ Produktstatus Änderungen eingeleitet werden müssen, um eine wirtschaftliche Produktion oder die geforderte Produktqualität zu gewährleisten. Mit den Methoden DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) sollen diese Änderungsschleifen aus Sicht der Fertigung und der Montage so weit wie möglich eliminiert werden. Ebenfalls können Kosten durch den Einsatz von virtueller Realität in Form von CAX-Technologien beeinflusst werden, da durch sie ebenfalls eine Verlagerung des Änderungsaufwandes zu früheren Entwicklungsstadien voll-

zogen wird. So unterstützen nach Humbert [Humb00] Simulationen den Produktentwicklungs- und Prozessentwicklungsprozess, indem ein höherer Produktreifegrad erreicht wird, bevor das erste reale Produkt gefertigt wird.

2.2 Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik

In diesem Abschnitt wird der Prozess der Produktkonstruktion ausgehend von der Produktidee bis hin zur Erstellung des digitalen Produktmodells im Rechner beleuchtet. Es werden digitale Modellierungsmethoden vorgestellt, wobei der Feature-Technologie besondere Achtung geschenkt wird, da sie für die vorliegende Arbeit von entscheidender Bedeutung ist. Die Möglichkeiten, mit der Feature-Technologie Wissen zu repräsentieren, werden hinsichtlich ihrer Stärken und Schwächen näher untersucht. Anschließend werden bestehende Featurekonzepte für CAD-Modelle mit Bezug zur Produktentwicklung vorgestellt.

2.2.1 Gestaltung von Produkten und Prozessen

Die in Abbildung 8 vorgestellte VDI 2221 schlägt ein generelles Vorgehen zum Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte vor, und zwar mit Betonung einer breiten Anwendung im Maschinenbau, der Feinwerktechnik, der Schaltungs- und Softwareentwicklung und der Planung von verfahrenstechnischen Anlagen [VDI2221].

Das Resultat eines Arbeitsabschnittes ist ein definiertes Ergebnis, das als Eingangsgröße für den nächsten Arbeitsschritt dient. So wird während des Arbeitsschrittes „Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung“ eine Anforderungsliste erarbeitet, die die Produktmerkmale eindeutig festlegt. Insbesondere der interaktive Charakter des Vorgehens wird betont, wodurch die Arbeitsschritte nicht als starr zu sehen sind. Ziel des Arbeitsschrittes „Ermitteln der Funktionen und Strukturen“ ist die Untergliederung der Gesamtstruktur in Teilfunktionen, bis eine Unterteilung aus technischer Sicht nicht mehr möglich ist. Für die resultierenden Teilfunktionen werden prinzipielle Lösungen erstellt, die anschließend miteinander kombiniert werden, um eine Gesamtlösung zu erhalten. Durch diese Vorgehensweise wird die Komplexität der Aufgaben eingeschränkt, wodurch die Konstruktionsaufgabe vereinfacht wird. Die Suche nach Lösungen wird durch Konstruktionskataloge unterstützt, die ein Standardwerk für Prinziplösungen darstellen.

Nachdem die Gesamtfunktion definiert ist, werden die Teilfunktionen in realisierbare Module untergliedert, die eine überschaubare Komplexität aufweisen. Nur die Schnittstellen zu anderen Funktionsmodulen müssen bekannt sein, wodurch es möglich ist, parallel an einem Pro-

jekt zu arbeiten [Gaul01, Gier01]. An diesen Arbeitsschritt schließen sich die Phasen „Gestalten der maßgebenden Module“ und „Gestalten des gesamten Produktes“ an.

Die Produktdokumentation besteht zu einem Großteil aus technischen Zeichnungen. Dieser Zeichnungsinhalt lässt sich nach der in Abbildung 8 dargestellten VDI 2221 in technologischen und organisatorischen Inhalt untergliedern. Normzeichnungen beinhalten typischerweise nur wenige oder keine Technologiedaten wie Herstellungsweise oder Montageanweisung, die zur ganzheitlichen Beschreibung des Produktes und der Produktherstellung notwendig sind. Deshalb wird heutzutage eine Integration der Technologiedaten durch Dokumenten-Managementssysteme oder durch Feature-basierte CAD-Systeme realisiert.

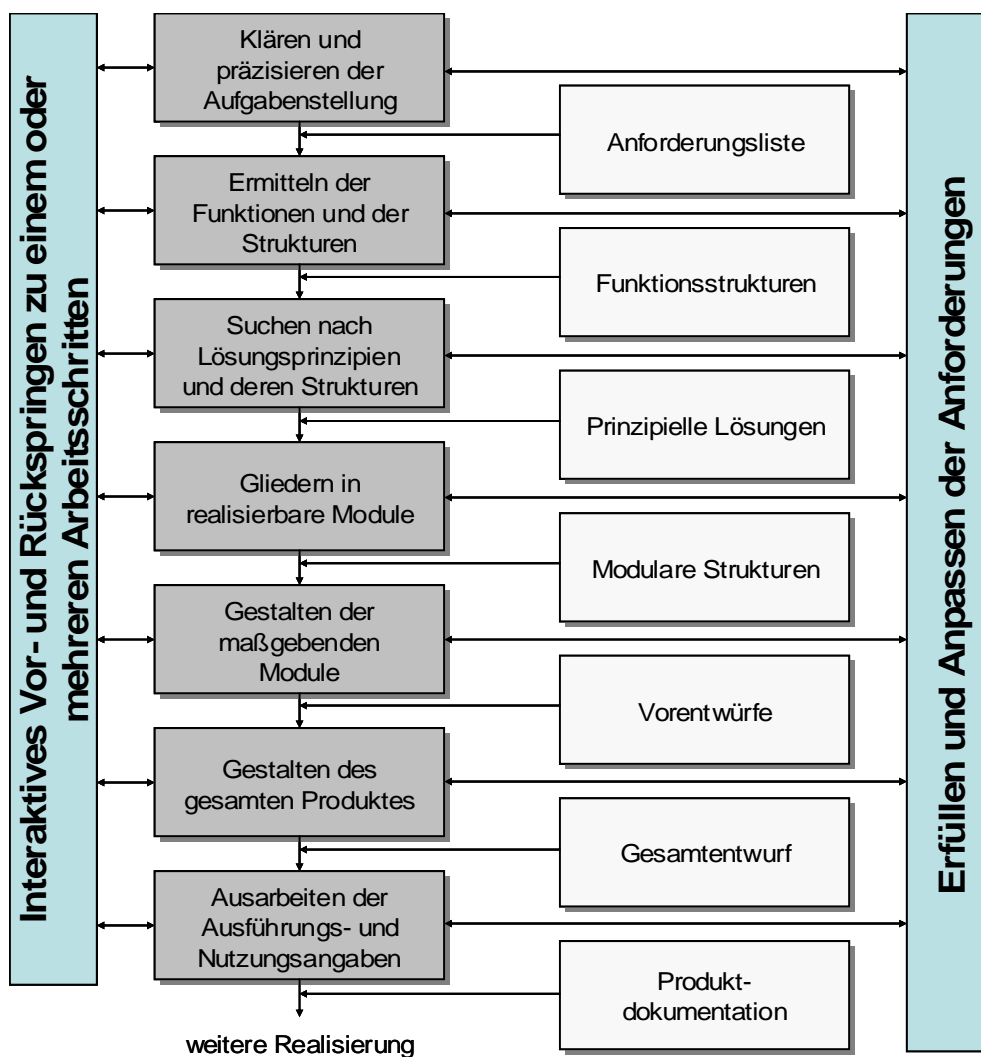


Abbildung 8: VDI 2221 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte

Innerhalb des Konstruktionsprozesses unterscheidet man grundsätzlich vier verschiedene Arten der Konstruktion:

1. Neukonstruktion: Erarbeiten eines neuen Lösungsprinzips bei gleicher, veränderter oder neuer Aufgabenstellung.

2. Anpassungskonstruktion: Anpassen eines bekannten Systems (Lösungsprinzip bleibt gleich) an eine veränderte Aufgabenstellung.
3. Variantenkonstruktion: Variation von Größe und/oder Anordnung innerhalb von Grenzen bestehender Systeme. Die Funktion und das Lösungsprinzip bleiben erhalten.
4. Prinzipkonstruktion: Weitgehende Beibehaltung eines Lösungsprinzips und Neuanpassung im Detail.

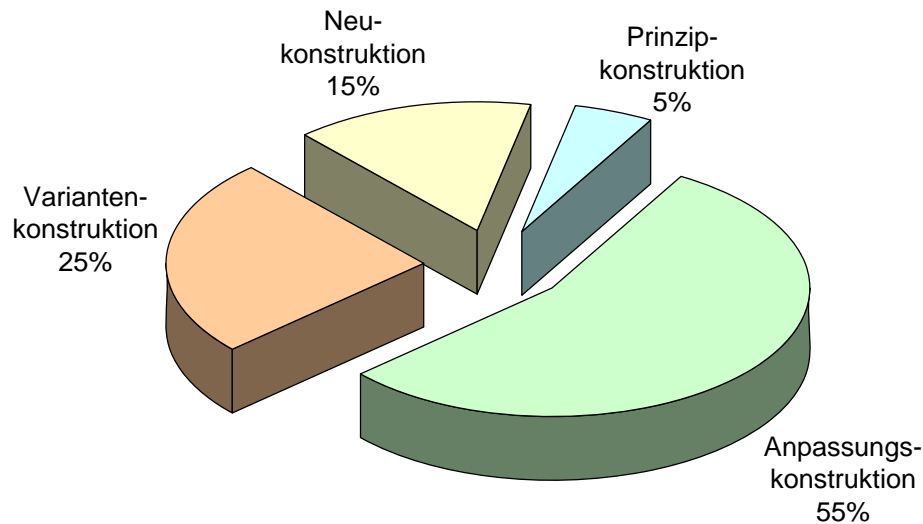


Abbildung 9: Anteile der unterschiedlichen Konstruktionsarten [Abel90]

Die Anpassungskonstruktion hat nach Abbildung 9 mit 55% den größten Anteil innerhalb der Konstruktion, da sie die Transformation einer bestehenden Lösung auf eine neue Aufgabe darstellt. Ein einfaches Beispiel stellt die Lasertechnik dar, die beispielsweise sowohl im Rohbau in der Automobilindustrie als auch in der Medizintechnik zum Aufschmelzen von Substanzen genutzt wird. Die Prozessparameter des Lasers müssen an die Aufgabe angepasst werden, da es sich um unterschiedliche Materialien handelt und die Schmelzzone unterschiedliche Ausdehnungen besitzt.

2.2.2 Morphologischer Kasten

Der Morphologische Kasten hat sich als probates Hilfsmittel zur Findung von Lösungsprinzipien im Konstruktionsprozess erwiesen. Für jede Teilfunktion der Funktionsstruktur werden alternative Lösungsmöglichkeiten gesucht. Die Suche wird durch Konstruktionskataloge, die für bekannte Aufgaben bewährte Teillösungen und Gesamtlösungen beinhalten, unterstützt. Nach dem Sammeln von Lösungen werden in einem nächsten Schritt die Prinziplösungen der Teilaufgaben miteinander zu mehreren unterschiedlichen Gesamtlösungen verknüpft. Diese werden anhand der Anforderungsliste bewertet, wodurch sich eine Gesamtlösung ergibt, die im weiteren Verlauf der Produktentwicklung näher definiert wird.

2.3 Modellierungsmethoden

Die Realisierung der Produktmodelle erfolgt heute in Unternehmen fast aller Größen durch Visualisierung als dreidimensionales Modell im Rechner. Die Modellierung der Produkte bildet die Eingangsinformationen für die im Produktentstehungsprozess nachgelagerten Abteilungen. Die eingesetzte Modellierungsmethode beeinflusst die Arbeit mit den Modellen, besonders wenn eine durchgängige Verwendung der Modelle bei der Produktionsplanung angestrebt wird, was der Philosophie moderner CAD-Systeme entspricht.

2.3.1 CAD

Die Abkürzung CAD steht für Computer Aided Design und bedeutet rechnergestütztes Konstruieren. Im Allgemeinen wird die Wechselwirkung von Mensch und Rechner im Konstruktionsprozess beschrieben [SpKr84]. Demnach kann rechnergestütztes Konstruieren als Methodik verstanden werden, um die Informationen während des Konstruktionsprozesses rechnergestützt umzusetzen.

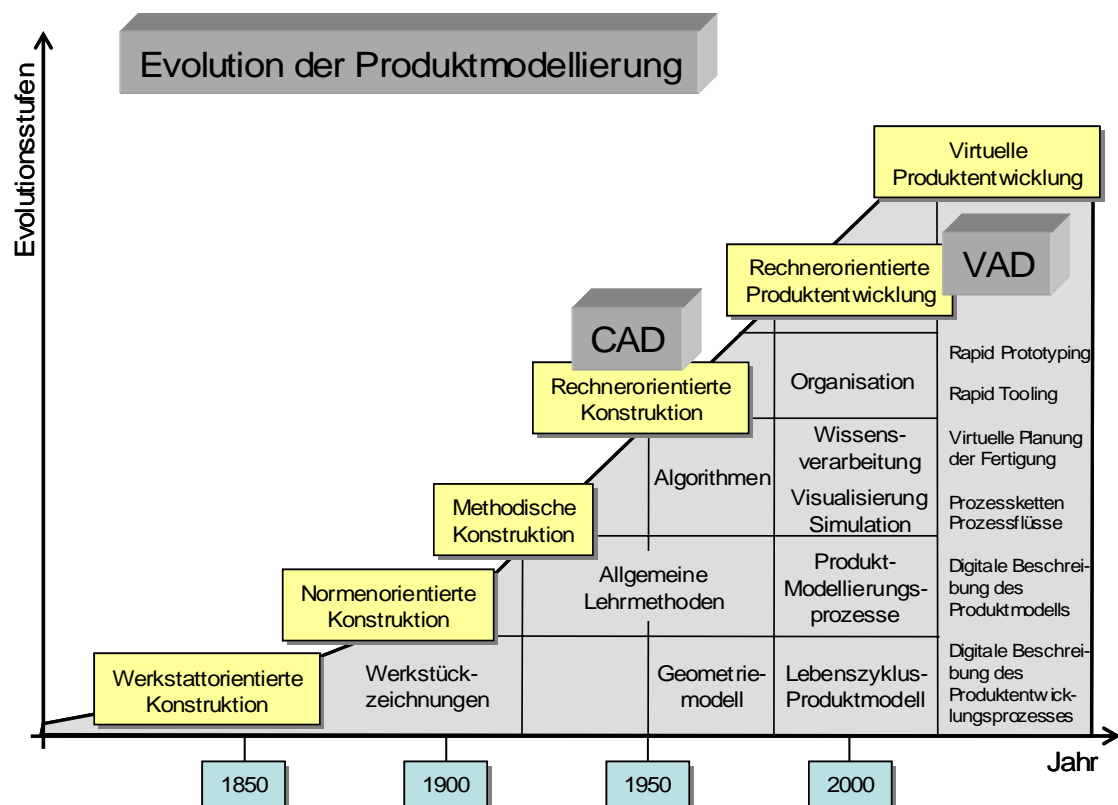


Abbildung 10: Evolutionsstufen der Produktmodellierung [VDI92]

Ein CAD-System umfasst daher die Arbeitsperson, die Hardware sowie die Betriebssoftware und die CAD-Software. Die Leistungsfähigkeit des Systems wird entscheidend von der Software beeinflusst, da sie die Rahmenbedingungen des Systems darstellt. Zusätzlich sind auch

die Methodenkenntnisse des Konstrukteurs von Bedeutung, da die Resultate auf einer Interaktion beruhen. Die Rechnerleistung ist in der heutigen Zeit nicht mehr als der limitierende Faktor zu sehen, da Standard-PC-Systeme meist über den Anforderungen der Software liegen und somit die Software in allen Bereichen unterstützen. Durch die Anforderungen der Benutzer sind die Funktionalitäten der Softwaretools enorm gestiegen. Parametrik, Design in Context und Konstruieren mit Features sind Methoden, die sich in den letzten Jahren beim Konstruktionsprozess mit CAD-Systemen etabliert haben und stellen somit den Stand der Technik dar. Abbildung 10 zeigt die Evolutionsstufen der Produktmodellierung von der reinen werkstattorientierten Konstruktion über die rechnerorientierten Konstruktion bis hin zur virtuellen Produktentwicklung der heutigen Zeit. Daher zählt die digitale Beschreibung des Produktes und der Prozesse sowie moderne Methoden wie Rapid Prototyping und Rapid Tooling zu eingesetzten Standards in Forschungs- und Entwicklungsabteilungen [Gebh96].

2.3.2 Produktmodellierung

Moderne CAD-Systeme verwenden fast ausschließlich die dreidimensionale Produktmodellierung, wodurch die Komplexität der Modellerstellung erhöht und die räumliche Gestalt durch den Produktentwickler umgesetzt wird.

Man unterscheidet grundsätzlich 4 Modellarten der Produktvisualisierung:

1. Kantenmodell: Kantenmodelle werden auch Linien- oder Drahtmodelle genannt, die als Informationsmittel Punkte, Linien, Kreise und Kurven zur Darstellung der begrenzenden Kanten nutzen.
2. Flächenmodell: Flächenmodelle werden durch Rotation oder Extrusion von zweidimensionalen Konturen erzeugt. Einsatzgebiete sind Bereiche, in denen keine Volumen-geometrie vorhanden sein muss. Beispiele hierfür sind Blechteile und fertigungstechnische Aspekte wie Fräsflächen im Formen- und Werkzeugbau.
3. Volumenmodelle: Volumenmodelle sind geschlossene Flächenverbände von Objekten, die durch Materialinformationen erweitert werden können. Daher können neben den geometrischen auch physikalische Aspekte berücksichtigt werden.
4. Atom- oder Zellenmodell (Voxelmodell): Ein Voxel ist ein würfelförmiges Volumenmodell, welches keine weiteren Eigenschaften enthält. Aus den Volumen- oder Flächenmodellen können Voxelmodelle abgeleitet werden, die umgekehrte Richtung ist jedoch nicht möglich. Voxelmodelle werden im Wesentlichen beim Digital-Mock-Up eingesetzt.

2.3.2.1 Direkte Modellierung

Die Elemente bei der direkten Modellierung besitzen neben der Geometrie keine weitere Bedeutung. So wird bei einer Bohrung oder einer Nut ein Negativvolumen erzeugt, das von der bestehenden Geometrie subtrahiert wird.

2.3.2.2 Parametrische Modellierung

Unter Parametrik versteht man die Verwendung variabler Größen, die Eigenschaften und Abhängigkeiten beschreiben [AnMe95]. Durch die Modifikation einer variablen Größe eines Modells erfolgt eine direkte Anpassung, indem das CAD-System eine Aktualisierung vornimmt, wodurch die Konsistenz des Modells sichergestellt wird [KBGE98, MVSO98]. Bestehende CAD-Systeme bieten die Möglichkeit einer Teil- oder einer Vollparametrisierung der Produktmodelle an, die sogar meist auch nachträglich noch erstellt werden kann.

Bei den Parametern handelt es sich um eigenständige Elemente innerhalb der Produktstruktur des CAD-Modells, wodurch Verknüpfungen zu den Variablen erstellt werden können, die die Geometrie des Bauteils beeinflussen. Die meisten aktuell eingesetzten CAD-Programme verfolgen den Ansatz der Parametrik, um dem Benutzer die Möglichkeit zu geben, auf einfache Art und Weise geometrische Ausprägungen zu modifizieren und somit Produktvarianten zu erstellen. Der Aufwand beim parametrischen Konstruieren ist weitaus zeitintensiver als bei anderen Modellierungsmethoden, da ein strukturierter Modellaufbau verlangt wird, durch den einerseits der Überblick gewahrt wird und andererseits das Modell keine Redundanzen oder Lücken in der Parametrik aufweist [VDI2209]. Ein parametrisches Modell verlangt daher einen Modell- oder Strukturplan, wodurch zum einen die Parameter selbst und zum anderen die Parameterauswirkungen festgehalten werden. Somit wird die Modellierung als solche dokumentiert. Parametrik sollte jedoch nicht mit dem Begriff der Variantenprogrammierung verwechselt werden, da im Rahmen der Variantenprogrammierung statische Geometriemodelle mit festen Werten entstehen, wohingegen die Größen in parametrischen Modellen variabel bleiben [MVSO98].

Durch die Verwendung der Methode des parametrischen Konstruierens stellen sich folgende Vorteile im Produktentwicklungsprozess ein:

- Methodisches Vorgehen bei der Modellierung
- Dokumentation der Parameterbeziehungen
- Reduktion des Aufwands für die Erstellung von Varianten und Produktmodifikationen
- Wegfallen notwendiger Programmierkenntnisse für die Variantenprogrammierung
- Einfache Erweiterung und Anpassung von Datenbanken bei Norm- und Zukaufteilen

Nach Eversheim unterstützt parametrisches Modellieren eine integrierte Produkt- und Prozessentwicklung. Durch die eindeutige Strukturierung der Produktmodelle werden eine durchgängige Nutzung der erstellten Modelle sowie die Möglichkeit einer schnellen Änderung der Modelle in der gesamten Prozesskette ermöglicht [EvAW01].

2.3.2.3 Feature-basierte Modellierung

In den letzten Jahren ist im Bereich der Konstruktion die Feature-basierte Modellierung stark in den Vordergrund gerückt, um den Konstruktionsprozess, die Arbeitsplanung und die NC-Programmierung zu unterstützen. In den 80er und 90er Jahren wurde der Ansatz stärker auf den Konstruktionsprozess fokussiert, da der eigentliche Antrieb darin bestand, die NC-Programmierung zu unterstützen.

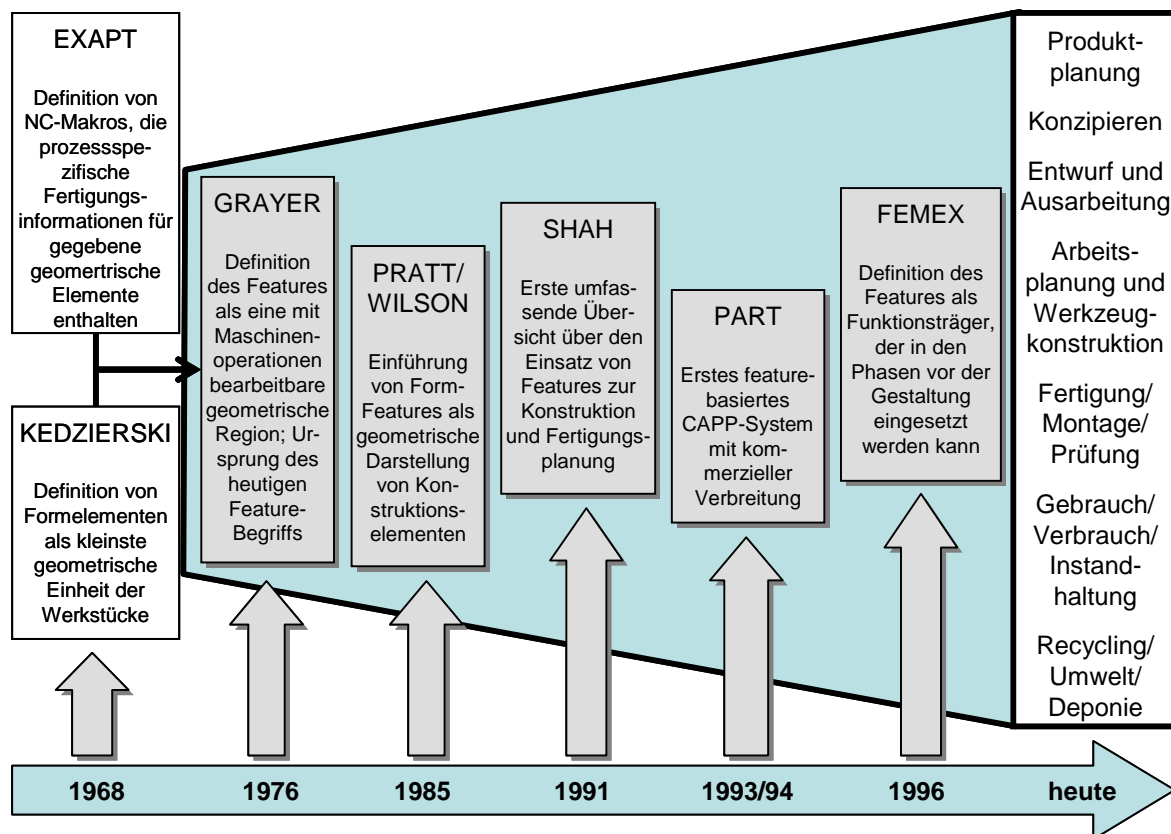


Abbildung 11: Entwicklung der Feature-Technologie [VDI 2218]

In Abbildung 11 kann man über die Definition eines Features den Wandel bezüglich der Aufgabenstellung erkennen, von der reinen Unterstützung der NC-Planung bis hin zu einem Element, das den gesamten Produktentstehungsprozess begleitet und somit diesen auch entscheidend prägt [MeWa99, SpKr97].

Somit sind Features eine eigene Klasse von Bausteinen und Elementen, die neben den geometrischen Ausprägungen Zusatzinformationen tragen, wodurch eine Integration in CAD, CAPP, CAM und FEM-Tools erleichtert wird. So entstanden in den letzten Jahren verschie-

dene Featurekonzepte: Berechnungsfeatures [Bär98, WeWS00], Montagefeatures [BrHJ95, BuWR89, MaBW97, SeB197], Mess-Features [Cies97, HSKP00], Kalkulationsfeatures [EhSc92, Wolf94] und funktionsorientierte Konstruktionsfeatures [Haas95, ScSt94, Brow03]. Alle diese Featuretypen beschäftigen sich mit einer speziellen Aufgabe im Produktentstehungsprozess. Auf einzelne dieser Featuretypen wird im Kapitel 2.4.3 näher eingegangen.

Feature-basierte Modellierung wird in der VDI 2218 [VDI2218] als das Modellieren eines Produktes mit Hilfe von bereitgestellten Elementen charakterisiert. Die für die Modellierung notwendigen Feature-Elemente werden aus Bibliotheken entnommen und nach der Definition der geometrischen Ausprägung und Position im Produktmodell platziert. Die entscheidenden Vorteile der Feature-Technologie bestehen nach Weber und Krause in der Wiederverwendung von Expertenwissen und einem dadurch beschleunigten Entwicklungsprozess [WeKr99].

Kommerzielle CAD-Systeme definieren den Begriff Feature als eine Aggregation rein geometrischer Elemente, die mit einem Element erzeugt, geändert, gespeichert und gelöscht werden können.

Bei der Klasse von Feature-Elementen, die CAD-Systeme zur Verfügung stellen, handelt es sich somit fast ausschließlich um Formfeatures. Daher werden fast alle Elemente und Funktionen, die zur Konstruktion durch das System angeboten werden, als Features bezeichnet. Feature-basierte Modelle werden heute vorwiegend in der Konstruktion, Arbeitsplanung und im Qualitätsmanagement eingesetzt. Derzeit werden in der Praxis Fertigungs-Features für die spanenden Fertigungsverfahren verwendet, wodurch die reine Geometriemodellierung verlassen wird und ein durchgängiges Featurekonzept realisiert werden soll. Ziel von Feature-basierten Konstruktionen ist eine vollständige Vernetzung aller am Produktentstehungsprozess beteiligten Bereiche (vgl. [BäHa01], [HRFW99]). Auf Featurekonzepte und Featureklassen wird detailliert im Kapitel 2.4 Feature-Technologie eingegangen, da sie die Grundlage des im Rahmen dieser Arbeit erstellten Konzeptes bilden.

2.3.2.4 Design in Kontext

Die Modellierungsmethode „Design in Context“ beschreibt den Ansatz einer Produktmodellierung in Einbausituation. Unter Modellierung in Einbausituation wird der Zustand einer Komponente bezeichnet, die an der Stelle im Produktmodell modelliert wird, an der sie ihren Platz hat. Bei der Modellierung von Bauteilen und Baugruppen werden Referenzen zu anderen Produktgeometrieelementen erzeugt, wodurch der Modellierungsaufwand reduziert wird, da vorhandene Bauteilabmessungen für die Designumsetzung genutzt werden können.

Mit der Modellierung in Einbausituation können Kollisionen bei der Modellerstellung erkannt und Maßnahmen ergriffen werden, wodurch der Konstrukteur ein direktes Feedback für

sein Handeln erhält. Nachteile bei der Modellierungsmethode können in einem erhöhter Aufwand bei der Umsetzung der 3D-Geometrie gesehen werden, da bestehende Komponenten ein- und ausgeblendet werden müssen, um die Übersichtlichkeit zu wahren und den positiven Effekt einer Kollisionsüberprüfung zu erzielen.

2.3.2.5 Design for X (DFX)

Unter „Design for X“ versteht Ehrlenspiel die Ausrichtung an einer Hauptforderung. Diese Hauptforderung kann z. B. die Funktion, die Sicherheit, das Gewicht oder die Größe, das Industrial Design, die Kosten, die Produktion, die Ergonomie, die Umwelt oder Ähnliches sein [Ehr195]. Dabei unterscheiden sich weniger die Prozesse oder das Vorgehen bei den Kriterien, als vielmehr das Spezialwissen in Form von Richtlinien.

In Abbildung 12 sind die fünf Hauptgruppen mit einigen Untergruppen gezeigt. Der Idealfall, dass alle Richtlinien bei der Konstruktion eines neuen Produktes berücksichtigt werden, ist unrealistisch. Daher muss die Konstruktionsabteilung von anderen Abteilungen mit Spezialwissen unterstützt werden, um den „Design for X“-Anforderungen gerecht zu werden.

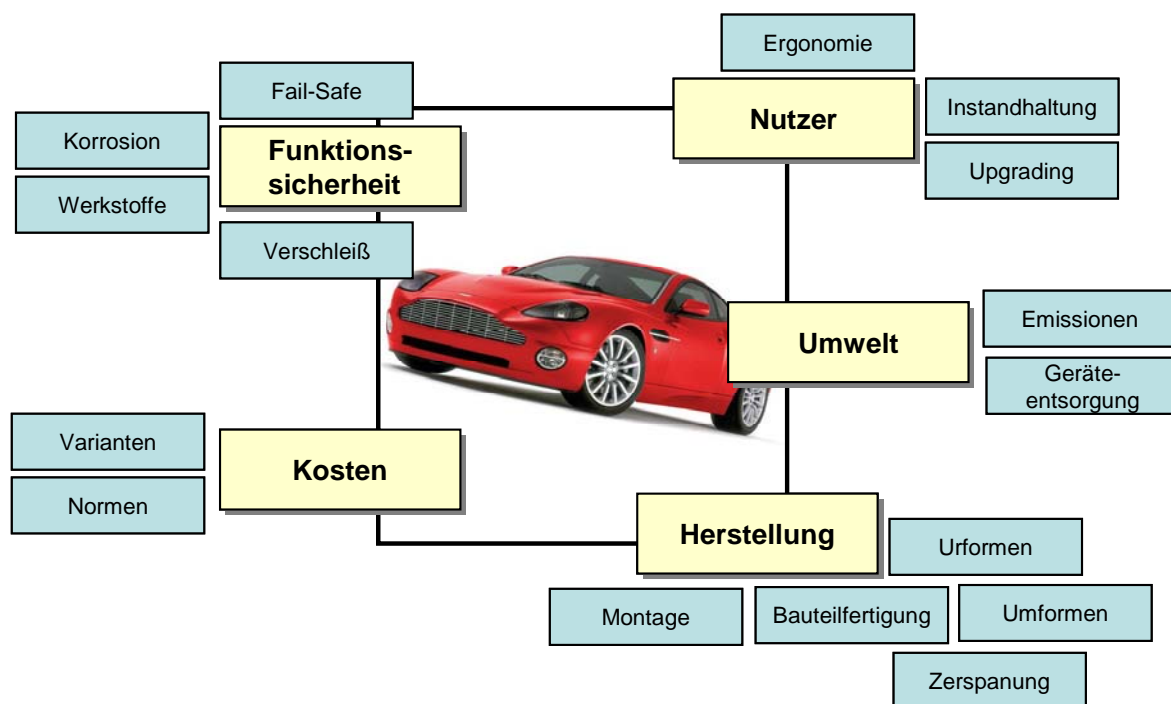


Abbildung 12: Bereiche des „Design for X“

Es gibt verschiedene „design for“ oder „design to“ Kriterien, die unter „Design for X“ (DFX) zusammengefasst werden. Design for Disassembly und Design for Recycling fallen beispielsweise unter die gleiche Rubrik, die mit Design for Environment überschrieben ist. Boothroyd und Alting beschäftigten sich sehr ausführlich mit Design for Assembly. In ihrem Konzept wird besonders auf die Reduktion der Komponentenanzahl eingegangen, um die

Montagekosten zu reduzieren. In einer Veröffentlichung von Trygg aus dem Jahre 1993 wird über erfolgreiche Umsetzungen des DFMA in schwedischen Unternehmen berichtet. Bei 50% der Unternehmen stellte sich eine Reduktion der Entwicklungszeit und der Entwicklungskosten um 33% ein. Die Montagekosten konnten durch den DFA-Ansatz von Boothroyd und Alting um bis zu 85% reduziert werden [Tryg93]. Design for Assembly und Design for Manufacturing werden oftmals unter dem Begriff Design for Assembly and Manufacturing (DFMA) zusammengefasst [BoDK02]. In

Tabelle 1 wird ein Auszug von DFMA-Richtlinien vorgestellt.

Tabelle 1: DFMA Richtlinien

Produktdesign für eine automatisierte Montage (Boothroyd et al.) [BoDK02]	Allgemeine Checkliste für die Produktion (Huang) [Huan96]
<ul style="list-style-type: none"> • Minimierung der Teilezahl • Das Basisbauteil hat die Aufgabe die anderen Komponenten sicher aufnehmen zu können. • Das Basisbauteil soll in eine fixierte Lage gebracht werden können. • Realisierung einer vertikalen Fügeichtung mit verschiedenen Bauteilebenen • Produktmerkmale erarbeiten, die eine Positionierung erleichtern • Kostenintensive Spannsysteme vermeiden 	<ul style="list-style-type: none"> • Einfachheit • Standard-Komponenten und Materialien • Rationales Produktdesign durch Module und Produktfamilien • Angepasste Toleranzen • Materialauswahl an Funktion und Prozesse anpassen • Vermeidung von nicht wertschöpfenden Prozessen • Beachtung von prozessbedingten Konstruktionsrichtlinien • Unterstützt die Teamarbeit
Design for Assembly (Andreasen et al.) [AnKL83]	Design for Assembly – montagegerechte Konstruktion (Redford, Chal) [ReCh94]
<ul style="list-style-type: none"> • Vermeidung von Montageoperationen (Integration von Komponenten und Prozessen) • Vermeidung von Orientierungen (Verwendung von Magazinen, Integration von Produktion und Montage) • Unterstützung bei der Orientierung (gezielte Erzeugung von Symmetrie oder gezielte Erstellung von Asymmetrie) • Transportunterstützung (gezielte Konstruktion eines Basisbauteils) • Unterstützung bei der Montage (Führungsebenen) • Verbindungsmethoden (Vermeidung von Verbindungen und separate Verbindungselemente) 	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl der Komponenten reduzieren • Verwendung neuer Materialien und Technologien • Einfache Montagesequenz • Einfache Qualitätssicherung der Endprodukte oder Baugruppen • Erreichbare Anordnung der Komponenten bei der Montage
	<p>Assembly Evaluation Method – Einsatz auf Konzeptebene, ohne direkten Bezug zum eingesetzten Fertigungsverfahren [MiOI90]</p> <ul style="list-style-type: none"> • für jede benötigte Operation werden ausgehend vom Montagegraph Punkte vergeben • Die Schwächen eines Produktes werden mit zwei Indizes beschrieben: <ul style="list-style-type: none"> ➤ Assemblability evaluation score „E“ ➤ Estimated assembly cost ratio, „K“

Aus den Forderungen des Design for Disassembly geht hervor, dass Komponenten wieder verwendet werden können und ein einfacher Austausch gewährleistet werden muss. Neben zunehmend integrierten Rechnerwerkzeugen werden neue Funktionalitäten entwickelt, die weitere Bereiche der Produktentstehung berücksichtigen und somit zum Design for X gezählt werden können [Huan96]. Hierzu zählen die auch schon in Abbildung 12 gezeigten Hauptkriterien.

Kosten: Neben der betriebswirtschaftlichen Kostenrechnung werden hier Richtlinien zum kostengünstigen Konstruieren vorgestellt. Target Costing und rechnergestützte Kostenrechnungsverfahren sind Ansätze, die von Ehrlenspiel und Seidenschwarz verfolgt werden [ErKL98, Seid93].

Umwelt: Umweltgerechtes oder recyclinggerechtes Konstruieren ist der Fokus des Ansatzes Design for Environment [Phle99, Mört02, GrDB01]. Lindemann et al. versuchen, ökologische Produkte für Unternehmen interessant zu machen, wobei die Nachhaltigkeit oder die Integrierte Produkt-Politik (IPP) im Vordergrund stehen [LMHH02].

Kunde/Benutzer: Die Ausrichtung auf den Kunden lässt sich in verschiedenen Eigenschaften manifestieren; hierzu zählt der Fokus auf die Qualität [Akao1992], die Individualisierung [Pill01] sowie das Inclusive Design [CIKL03], das eine leichtere Anwendbarkeit der Produkte insbesondere durch ältere oder behinderte Menschen betrachtet.

Produktion: Erste Ansätze des DFX bezogen sich auf die Produktion und beinhalteten fertigungsgerechte und montagegerechte Gestaltungsrichtlinien [BoDK94, AnKL88, AdWM00], die sich noch weiter in z.B. gussgerechtes oder schweißgerechtes Konstruieren aufteilen lassen. Die rechnergestützten Produktmodelle enthalten dieses Richtlinienwissen nicht, es ist nur in Form des Expertenwissens des Konstrukteurs enthalten. Neben den Fertigungsaspekten wird ebenfalls die Automatisierbarkeit der Produktion entscheidend durch die Konstruktion beeinflusst und muss daher auch berücksichtigt werden.

Funktion: Die Sicherstellung der Funktion bezieht sich einerseits auf die Materialauswahl, um eine Korrosionsbeständigkeit sowie eine Verschleißfestigkeit zu gewährleisten. Auf der anderen Seite müssen Fail-Safe-Vorkehrungen getroffen werden, damit gefährdende Systemzustände abgefangen werden. Obwohl die Zielsetzungen z. T. sehr verschieden sind, gibt es einige Aspekte, die den meisten DFX-Ansätzen zur Verwirklichung der Ziele gleich sind:

- Kundenorientierung als Zweck des Ansatzes und Kostenbetrachtung als Medium der Effektivität,
- Modularisierung des Produkts,
- zeitlich vorausschauende Entwicklung sowie
- Integration und Kollaboration unterschiedlicher Bereiche und Disziplinen,

- die Methodik zur Entwicklung variantenreicher und individualisierbarer Produktspektren.

Die aufgezeigten Design-Kriterien aus den unterschiedlichsten Bereichen beschreiben Aspekte des Produktlebenszyklus von der Herstellung bis hin zur Entsorgung der Produkte. In frühen Entwicklungsphasen, in denen Entscheidungen getroffen werden müssen, die die Akzeptanz und die Wirtschaftlichkeit der Produkte betreffen, sind keine Konzepte vorhanden, die mehrere Aspekte einzeln oder in kombinierter Form berücksichtigen. Für zukünftige Produktentwicklungskonzepte wird die Realisierung einer übergreifenden Berücksichtigung aller Design-Kriterien den entscheidenden Vorteil für Unternehmen erzeugen. So wird es möglich sein, die Qualität der Produkte sowie deren Produktion und Recycling in ihrem Zusammenspiel unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu bewerten und qualitativ hochwertigere Produkte zu entwickeln. Huang und Mak sehen im Ansatz von Design for X und einem Business-Reengineering-Prozess die Möglichkeit, eine effektive Prozessparallelisierung im Produktentstehungsprozess hervorrufen zu können [HuMa98]. Sie beziehen sich hierbei vor allem auf den durch den DFX-Ansatz verfolgten Gedanken einer verstärkten Zusammenarbeit verschiedener Teams.

Zur Realisierung dieses Zieles müssen bestehende Ansätze in Produktentwicklung und Produktionsplanung angepasst werden, indem neue Methoden und Konzepte zur Vernetzung entwickelt werden. Somit würde eine Art „Design for Product-Lifecycle“ entstehen, welcher alle DFX-Kriterien berücksichtigt.

2.3.3 Skelettmodellierung

Mit der Skelettmodellierung ist eine Art der Strukturierung von Teilen, Baugruppen und Produkten gelungen, die eine Zusammenarbeit an einem Produkt erlaubt und auf dessen Zusammenbau fokussiert ist. Das Basiselement bildet ein Konstruktionsgerüst, welches aus einfachen geometrischen Formen aufgebaut ist und Grundreferenzen zur Platzierung von Bauteilen, Baugruppen oder Feature-Elementen darstellt. Ebenfalls werden durch die Grundreferenzen geometrische Ausprägungen und Positionen der Bauteile im Produktmodell festgelegt, welche über die Anforderungen und Spezifikationen der Bauteile definiert werden. Bei den Referenzen handelt es sich um parametrische steuerbare Elemente, die sich an die Anforderungen anpassen können und somit ein Produkttemplate darstellen. Die Anforderungen können über Schnittstellen mit dem Modell verbunden sein, wodurch ein flexibles Produktmodell entsteht.

In der Literatur wird die Skelettmodellierung meist als Grundlage einer Top-Down-Arbeitsweise in der Konstruktion beschrieben, da sie ausgehend von der obersten Struktur in

untere Bauteilstrukturen integriert wird [Hans01]. Man unterscheidet grundsätzlich drei Arten von Skelettmodellen. Die oberste Hierarchieebene bilden die Skelettmodelle des Zusammenbaus (Assembly Skeletons), die Referenzen und Parameter an die darunter liegenden Ebenen weitergeben, um eine Verlinkung herzustellen. Über diese Links können Baugruppen (Subassembly Skeletons) und Bauteile (Part Skeletons) positioniert und in ihren geometrischen Ausprägungen über Parameter und Formeln definiert werden.

2.3.3.1 Assembly Skeletons

Das Skelettmodell des Zusammenbaus trägt die globalen Parameter und Referenzen, die für die Positionierung und die Parameterdefinition der Baugruppen oder Einzelteile benötigt werden. Diese globalen Informationen werden den anderen Hierarchieebenen zur Verfügung gestellt, indem sie als Verweis in die Modelle integriert werden.

2.3.3.2 Subassembly Skeleton

Baugruppen, die zu einem Produkt montiert werden, nennt man Unterbaugruppen. Diese Hierarchieebene enthält globale Informationen vom Assembly Skeleton sowie lokale Parameter und Referenzen zur Baugruppendefinition, die wiederum Skelettmodellen der gleichen oder einer niedrigeren Hierarchieebene zur Verfügung gestellt werden. Der Subassembly-Skeleton kann mehrere Einzelteile (Part-Skeletons) oder weitere Unterbaugruppen (Subassembly-Skeletons) aufnehmen, deren Position in der Baugruppe über die zur Verfügung gestellten Referenzen definiert wird.

2.3.3.3 Part-Skeletons

Das Bauteil-Skelettmodell stellt die unterste Ebene in der Skelettmodellhierarchie dar. Es erhält Informationen in Form von Referenzen und Parameter aus höheren Hierarchieebenen, gibt selbst jedoch keine Modellierungsinformationen weiter. Ähnlich dem Subassembly-Skeleton enthält die Bauteilebene lokale Parameter und Referenzen, um eine vollständige Parametrisierung zu ermöglichen.

2.3.4 Einsatz der Konstruktions skelettmodelle

Manche Softwaretools besitzen bereits eigenständige Elemente, die mit einem Skelettmodell vergleichbar sind. Jedoch kann man diese Elemente auch eigenständig in jeder beliebigen parametrisch assoziativen CAD-Software erstellen. Die vorgestellten Skelettmodelle sind als eigenständige Elemente erzeugt worden und verwenden daher keine vordefinierten Strukturen einer Software.

An dieser Stelle soll jedoch nicht der Eindruck erweckt werden, dass Skelettmodelle nicht in andere Modelle als Baugruppe integriert werden können, da die verschiedenen Hierarchieebe-

nen im Vorfeld nicht definiert worden sind und somit ein erhöhter Konstruktionsaufwand von Nöten ist.

Die Skelettmodellierung lässt eine Integration des Zusammenbau-Skelettmodells in eine übergeordnete Bauteilstruktur durch einen Hierarchieebenenwechsel zu. Die oberste Ebene des Modells wird daher als Baugruppe verstanden, die wiederum in ein komplexeres Modell integriert wird, wodurch die Baugruppe nicht mehr als oberste Hierarchieebene fungiert, da eine übergeordnete Hierarchieebene erzeugt wird. Um eine solche Modellierung zu unterstützen, ist es von enormer Bedeutung, dass Initialisierungsreferenzen der einzelnen Skelettmodelle vorgesehen werden, die nach der Integration durch neue globale Referenzen ersetzt werden können, damit die Modellierungsmethodik keinem Bruch unterliegt. Diese Vorgehensweise hält die Konsistenz der Modelle aufrecht.

Die Skelettmodellierung kann in den unterschiedlichsten Bereichen der Produktmodellierung Anwendung finden. Jedoch sollten aus Kostengründen nur Produktmodelle nach dieser Modellierungsmethode erstellt werden, die entweder eine große Anzahl an Varianten aufweisen oder tendenziell einer großen Anzahl von Änderungen unterliegen. Gerade im Bereich der Änderungs- oder Anpassungskonstruktion verspricht die Templatetechnologie einen Zeitvorteil, da Parameterkombinationen einfach zu modifizieren sind und somit auf einfache Art und Weise Bauteilvarianten erstellt und bewertet werden können.

Skelettmodelle zeigen Bauraumbeschränkungen und Dimensionen von Bauteilen oder Produkten auf, die als Strukturierungshilfe dienen und den Konstruktionsprozess unterstützen. Um die Stärken einer solchen Modellierungsmethode ausspielen zu können, müssen jedoch die Rahmenbedingungen hinsichtlich der Modellkonsistenz und der Art der Speicherung gegeben sein. Eine Schwierigkeit besteht in der Verwaltung der Modelle hinsichtlich der modellübergreifenden Verknüpfungen und den Parameterkombinationen der einzelnen Produktvarianten. So wird beispielsweise heute jedes Modell unter einer eindeutigen Teilenummer gespeichert. Ein Skelettmodell repräsentiert jedoch mehrere Bauteile in einem Modell, wodurch eine direkte Zuordnung über die Teilenummer nicht möglich ist. An dieser Stelle könnte man sich jedoch das Skelettmodell als Mastermodell vorstellen, das zu Testzwecken von Produktvarianten herangezogen wird, bis ein oder mehrere geeignete Bauteil- oder Produktmodelle erzeugt werden. Ausgehend von der Parameterkombination wird ein Produktmodell mit gesetzten Parametern abgeleitet, welches einen fixierten Produktstatus widerspiegelt und somit eine eigene Teilenummer erhält. Im Skelettmodell sollen jedoch weiterhin alle Parameterkombinationen der abgeleiteten Produktvarianten vorhanden sein, damit existierende Produkte nicht neu erfunden werden müssen und Erfahrungen mit bestehenden Produktstrukturen

in neue Konzepte einfließen können. Weitere Vorteile der vorgestellten Modellierungsmethode in Kombination mit der Feature-Technologie zeigen [BäHa01, Braß03] auf, wodurch die Möglichkeit eine vollständige Vernetzung aller am Produktentstehungsprozess beteiligten Bereiche bezieht.

Anforderungen der Templatetechnologie im Bereich des Produkt-Designs können durch die Skelettmodellierung abgebildet werden. Manche CAD-Systeme besitzen ein eigenständiges Element, welches Grundreferenzen anderer Komponenten aufnehmen kann. In anderen CAD-Systemen muss eine Hilfskonstruktion erstellt werden, die als Skelettmodell fungiert.

Parametrische Konstruktionen eignen sich besonders für Modelle, die über neutrale Schnittstellen mit Berechnungsprogrammen in Verbindung stehen. Die Konstruktionsmodelle passen, basierend auf den physikalischen Soll-Eigenschaften der Produkte, die Geometrie an. So wird z.B. die Länge eines Pleuels entscheidend von der geforderten Motorleistung beeinflusst. Mit der Modifikation der Länge werden gleichzeitig auch andere Geometrieausprägungen der Bauteiltiefe beeinflusst. Eine höhere Motorleistung erzeugt eventuell ein höheres Drehmoment, das übertragen werden muss, wodurch die aufzunehmende Last steigt. Daher wird die Pleuelgeometrie basierend auf den gesetzten Materialkennwerten angepasst [Hans01].

2.3.5 Beispiel der Skelettmodellierung – Motorentemplate

Auf der obersten Ebene befinden sich die Parameter und Referenzen, die als globale Parameter und Referenzen verstanden werden können. Bei einem Motor handelt es sich bei den globalen Referenzen um die Antriebsachse, die Zylinderachsen, die grobe Bauraumbeschränkung, die Exzentrizität der Pleuelwellenhübe und den Kraftabtrieb. Globale Parameter werden indirekt durch globale Referenzen vorgegeben, indem die Position der einzelnen Komponenten variiert werden kann. Mit einem Motorentemplate sollen verschiedene Motorenkonzepte verwaltet werden. Daher müssen die verschiedenen Motorenklassen mit ihren Charakteristiken hinterlegt werden. Tabelle 2 zeigt Motorvarianten, die mit der Skelettmodellierung in einem Modell dargestellt werden sollen. Bei diesem Modell besteht neben der reinen Parametrik zusätzlich die Anforderung, Komponenten zu verwalten und über deren Status die Aktivität zu beeinflussen, da bei verschiedenen Motorvarianten eine unterschiedliche Anzahl von Zylindern verwaltet werden muss.

Aufgrund der Darstellung eines Reihenmotors und eines V-Motors reicht eine reine Parametrisierung nicht aus. Es müssen neben Formeln auch Regeln im Modell verwaltet werden, über die Produktvarianten bestimmt werden. Diese Regeln kommen beispielsweise bei der Geometriedefinition der Breite des Pleuellagersitzes der Pleuelwelle zum Einsatz, da bei einem

V-Motor zwei Pleuels und bei einem Reihenmotor ein Pleuel von dem Exenterwelle aufgenommen werden muss.

Tabelle 2: Prinzipdarstellung ausgewählter Verbrennungsmotoren

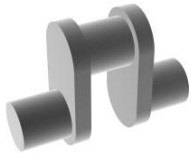
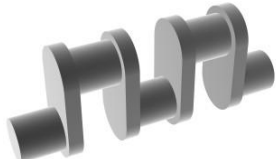




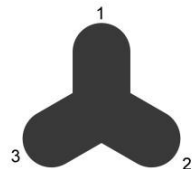





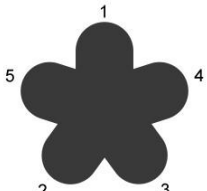

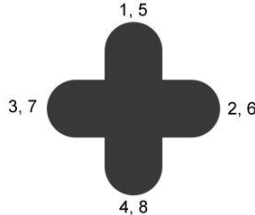
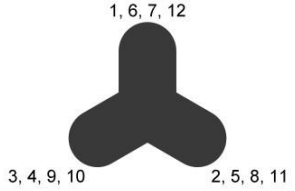
1-Zylinder Reihenmotor	2-Zylinder Reihenmotor	3-Zylinder Reihenmotor	4-Zylinder Reihenmotor
			
			
5-Zylinder Reihenmotor	Flat-Plane V8-Motor	Cross Plane V8-Motor	V12-Motor
			
			

Abbildung 13 zeigt die Baumstruktur des Motorentemplates basierend auf der Skelettmodellierung. Parametrik, Teilestatus und sonstige Informationen werden in einer Konfigurationstabelle verwaltet, die systemunabhängig bearbeitet werden kann. Die Modelle 1 und 2 zeigen Reihenmotoren (4-Zylinder, 6-Zylinder) und die Modelle 3 und 4 stellen V-Motorenkonzepte dar (cross plane V8, V12).

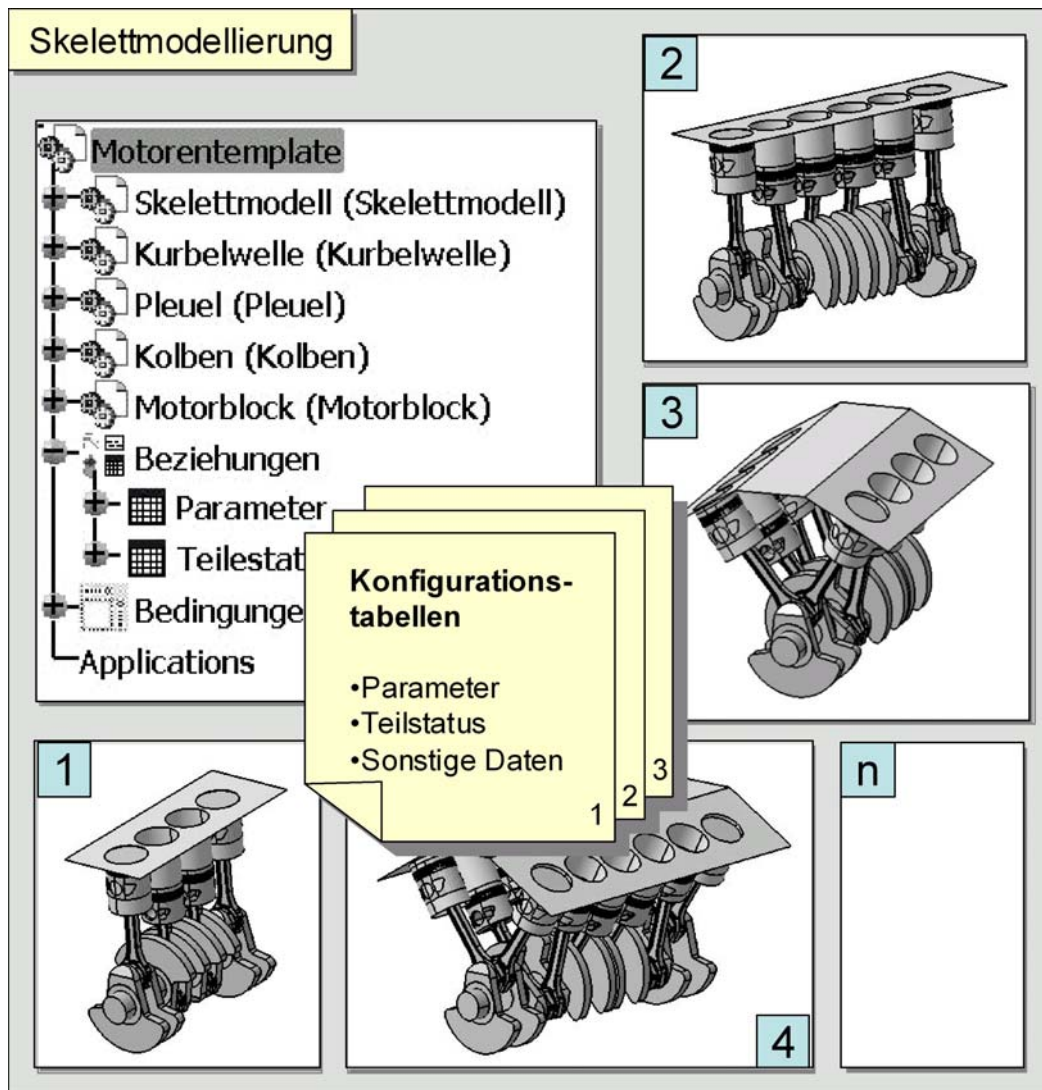


Abbildung 13: Variantendarstellung eines Verbrennungsmotors basierend auf der Skelettmodellierung

2.3.6 Vor- und Nachteile der Skelettmodellierung

Die Skelettmodellierung bietet die Möglichkeit einer verteilten Produktentwicklung, da durch die Verknüpfung von Referenzen neue dynamische Verbindungen entstehen können. So können beispielsweise Komponenten eines Produktes unabhängig voneinander modelliert werden, um nach deren Fertigstellung in eine übergeordnete Produktstruktur integriert werden zu können. Hierzu werden bestehende Bauteilreferenzen der neuen Subassembly Hierarchieebene durch Referenzen des Produktskelettmodells ersetzt, falls diese Rahmenbedingungen für die Komponente darstellen.

Am Beispiel eines Kurbeltriebes sähe das folgendermaßen aus: Die Achse der großen Bohrung des Pleuels wird durch eine Achse des Kurbeltriebs ersetzt, damit die Position des Pleuels fixiert wird. Ebenso kann die Kurbelwelle auf diese Weise in ein Motorenmodell integriert werden, wenn die Hauptantriebsachse mit der Lage im Motorblock vereinbart wird.

Aus Sicht der Modellierung muss hier kein Austausch eines Konstruktionselements stattfinden, es kann auch eine einfache Positionsdefinition erstellt werden. Bei einer Modifikation der Referenz tritt kein Unterschied auf und die Modellkonsistenz bleibt erhalten. Geometrische Zwangsbedingungen sind jedoch leichter zu modifizieren und können unbewusst gelöscht werden, wodurch die Modellkonsistenz erhalten bleibt, jedoch das Modellverhalten bei Änderungen nicht der gewollten Modellintelligenz entspricht. Daher bildet der im ersten Augenschein komplizierte Weg eine größere Modellabsicherung, da bei Modifikationen fehlende Verbindungen direkt angezeigt werden. Ebenfalls können eine Vielzahl von Produkten mit einem Skelettmodell verwaltet werden. Das in Kapitel 2.3.5 vorgestellte Skelettmodell für Verbrennungsmotoren zeigt, dass die Potentiale der Skelettmodellierung sich nicht ausschließlich auf Parameterkonfigurationen beziehen, sondern ein Skelettmodell auch höhere Modellintelligenz enthalten kann. Die Verwaltung der Parameter in einem softwareunabhängigen Dokument hat den Vorteil eines verbesserten Zugriffs und einer übersichtlicheren Darstellung aller Bauteilparameter. Die Konfigurationstabellen können hierbei nahezu beliebig gestaltet werden. Nachteilig bei der Skelettmodellierung ist die aufwändigere Modellerstellung, da sich erst bei einer Wiederverwendung Einsparpotentiale abzeichnen. Ein weiterer Nachteil besteht in einem größeren Planungsaufwand bei der Modellierung, da benötigte Parameter und Referenzen, die lokalen oder globalen Charakter besitzen, im Vorfeld definiert werden müssen. Handelt es sich um globale Parameter oder Referenzen, müssen diese modellübergreifend zur Verfügung stehen, um nach der Integration in ein anderes Produktmodell als dynamische Verbindung fungieren zu können.

2.4 Feature-Technologie

Da die Feature-Technologie für die Arbeit die Vernetzungsgrundlage zwischen Konstruktion und Planung bildet, wird in diesem Kapitel auf bestehende Konzepte eingegangen, wodurch Schwachstellen und Stärken abgeleitet und Anforderungen an neue Konzepte definiert werden. Hierbei liegt der Fokus vor allem auf den Bereichen Montage- und Fertigungsplanung. Daher wird verstärkt auf die Unterstützung dieser Planungsbereiche basierend auf der Feature-Technologie eingegangen.

2.4.1 Begriffsdefinitionen für Feature

Für den Begriff „Feature“ existiert keine einheitliche Definition. Es werden zur Beschreibung von Features oftmals andere Begriffe gewählt wie „Objekt“, „Informationseinheit“, „Technisches Element“, „Gestaltelement“, „Funktionselement“, „Konstruktionselement“ oder „Ferti-

gungselement“ verwendet [WeKr99]. Nach Krause beschreiben Features Objekte, die zusätzlich zu ihren geometrischen Daten weitere nichtgeometrische Informationen aufnehmen können, wodurch sie logische Verknüpfungen von Formelementen (Form-Features) und Semantik darstellen [KrLe89]. Form-Features im Speziellen werden als strukturorientierte Zusammenstellung geometrischer Elemente ohne jegliche Semantik definiert, die Gruppen von Konturen, Flächen, Volumen oder Bauteilen darstellen können [KrLe89].

Weber geht bei der Featuredefinition noch einen Schritt weiter, indem er sie als informationstechnische Elemente bezeichnet, die Bereiche von besonderem (technischen) Interesse einzelner oder mehrerer Produkte darstellen [Webe96]. Somit kann ein Feature eine spezifische Sichtweise auf die Produktbeschreibung repräsentieren, die mit bestimmten Eigenschaftsklassen und bestimmten Phasen des Produktlebenszyklus im Zusammenhang steht. Weber bezieht bei seiner Definition die absehbare Entwicklung mit ein und definiert Features daher umfassender. Die Verarbeitung nichtgeometrischer Produkteigenschaften nimmt einen immer höheren Stellenwert in der Produktentwicklung ein, daher wird der Begriff des Features von [Kies97] zum Informations-Feature erweitert, das keine Geometrie repräsentiert. Das Feature-Element wird ausschließlich als Speicherort für Textinformationen genutzt.

2.4.2 Features

Aufgrund der Fülle von Anwendungen im Bereich der Feature-Technologie werden verschiedene Klassen unterschieden. Auf der einen Seite stehen die Features, die von der Software zur Verfügung gestellt werden. Auf der anderen Seite stehen benutzerdefinierte Elemente (User Defined Features; UDF), die verschiedene Software-Features zu einem neuen Element zusammenfassen. Features, die uns die Software zur Verfügung stellt, sind beispielsweise im Design-Modul die eigentlichen Geometrie-Features (Punkt, Linie, Kreis, Ebene, Rotieren, Extrudieren, usw.), Parameter (Zahlen, Zeichen, Länge, Winkel, Masse, usw.), Regeln oder sogar Programme, die Aktionen innerhalb der Konstruktion ausführen können.

Die Features der Softwarehersteller sind flexibel gestaltet, um dem Benutzer viele Konstruktionsmöglichkeiten zur Verfügung zu stellen. So kann beispielsweise auf unterschiedliche Arten eine Bohrung in einem CAD-System erzeugt werden:

- Erstellung eines Konturzuges, der in einem zweiten Schritt extrudiert wird.
- Platzierung eines Negativvolumens auf einem Volumenkörper über das Feature „Bohrung“.
- Erzeugung eines Zylinders (Extrudieren oder Rotieren einer Geometrie), der über eine Operation vom Volumenkörper subtrahiert wird.

Die drei vorgestellten Alternativen variieren zusätzlich noch in ihrer Erstellung, d.h. der Aufbau der Referenzen sowie die Platzierung der Geometrie unterliegen wiederum einer Vielzahl von Möglichkeiten. Über die Kombinatorik der Geometrieerstellung und ihrer Positionierung ergibt sich eine große Anzahl an unterschiedlichen Möglichkeiten der Modellierung ein und desselben Produktes. So kann davon ausgegangen werden, dass komplexe Produkte zwar die gleiche geometrische Gestalt besitzen, jedoch auf unterschiedliche Art und Weise erzeugt worden sind. So kann ein Bohrmuster mit sieben Bohrungen auf 3^7 verschiedene Arten erzeugt werden, wenn man davon ausgeht, dass jedes Bohrloch als eigenständiges Element erzeugt wird. Kommen zusätzlich spezielle Funktionen wie „Spiegeln“ oder „Muster“ zum Einsatz, so kann die Anzahl der Möglichkeiten nicht mehr spezifiziert werden, da bei der Spiegelung von Elementen eine Spiegelebene definiert wird, deren Erstellung einer nicht definierbaren Anzahl an Alternativen unterliegt. Werden die Bohrungen mit einer Fase erweitert, entstehen zusätzliche Elemente, die wiederum auf mindestens drei verschiedene Arten erzeugt werden können. So besitzt das Produkt weitere Geometrielemente, wodurch die Zahl der Modellierungsvarianten weiter ansteigt. Seitens der Software-Hersteller wurde die Feature-Technologie in den letzten Jahren stark vorangetrieben, um den Kunden bei der Erstellung der Produktgeometrie eine bessere Performance bieten zu können. Jedoch durchdringen die Features immer noch nicht alle Bereiche des Entwicklungsprozesses.

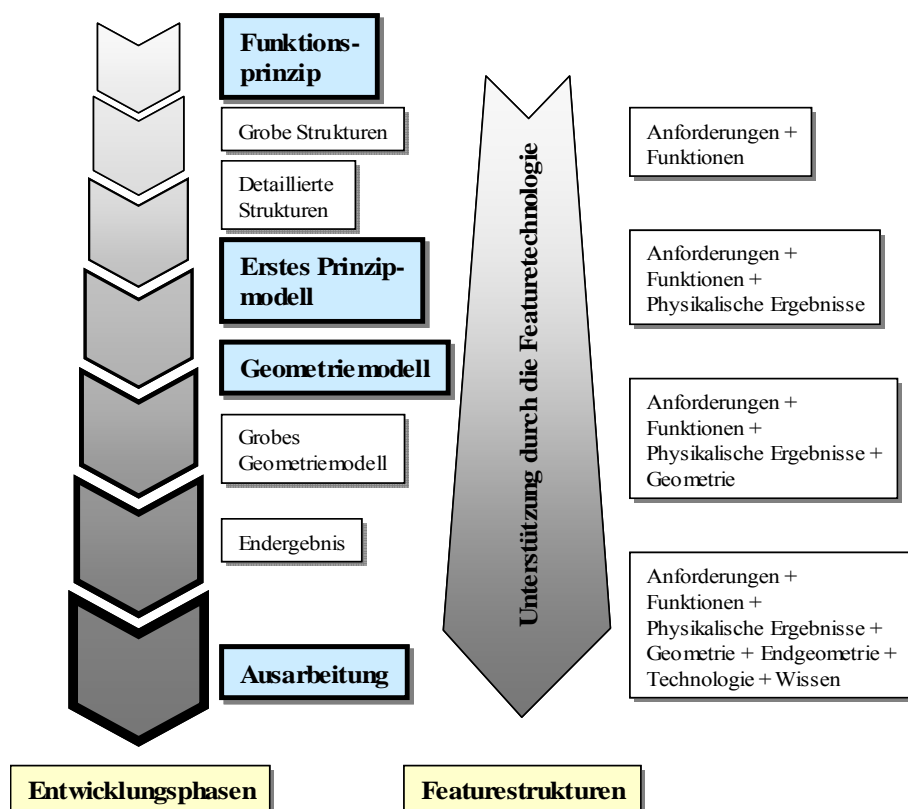


Abbildung 14: Einsatzdichte der Feature-Technologie in den einzelnen Produktentwicklungsphasen [VaPo98]

So besitzen beispielsweise moderne CAD-Systeme eine Feature-Erkennung im Bereich von Taschen und Bohrungen, die über interne Regeln zu Mustern verknüpft werden können, wodurch eine unterstützte Fertigungsplanung erzielt wird. Taschen und Bohrungen werden unabhängig von der eingesetzten Modellierungsmethodik erkannt und unter Berücksichtigung definierter Kriterien zusammengefasst. Die so erstellten Gruppen dienen als Eingangsinformation für softwarespezifische Features aus anderen Bereichen. Die gruppierten Elemente unterstützen in Form von so genannten Mustern die NC-Planung, da sich Funktionen oder Features auf die gesamte Gruppe beziehen und nicht für jedes Element einzeln erstellt werden müssen. Dies ermöglicht eine bessere Struktur der Elemente und ein schnelleres und fehlerfreieres Arbeiten.

Grundsätzlich verfolgt der Ansatz der Feature-Erkennung einen Informationsexport, um Daten des Produkt- oder Prozessmodells auslesen zu können, da gezielt auf Informationsbereiche zugegriffen werden kann. Die Feature-Erkennung wird in den meisten CAx-Systemen über Visual Basic (VB) Programme realisiert. Diese Programme können in Form eines Makros als Softwaremodul integriert werden, um einen direkten Zugriff auf die Produktstruktur zu ermöglichen. VB hat sich ebenfalls für den Datentransfer zu Office-Anwendungen etabliert, um Daten in „neutralen“ Formaten abzulegen.

Die ursprünglich aus dem Gebiet der Arbeitsplanung zur Automatisierung von Fertigungsschritten entstandene Feature-Technologie hat mittlerweile Einzug in das CAD-Umfeld gefunden, weil sich dadurch die Erstellung von CAD-Modellen drastisch vereinfachen und beschleunigen lässt. Diese Vorteile sind bereits durch den Einsatz von Form-Features erreicht worden, deren Fokus ausschließlich auf einer Geometrieerstellung liegt. Durch die Gruppierung von geometrischen Basiselementen wie Kurven und Skizzen oder Basis-Features entstehen komplexere Objekte, die vom Konstrukteur als bauteilneutrale Einheit in die Konstruktion eingebracht werden können. Neben der Klasse der Form-Features haben sich Bearbeitungsfeatures etabliert, die in den meisten Fällen Zerspanprozesse darstellen. Beispiele hierfür sind Bohrungen, Zentrierbohrungen oder Freistiche. Im Gegensatz dazu gehören Keilwellenverbindungen zu den zusammensetzenden oder fügenden Verfahren und Gussaugen zu der Fertigungstechnologie Gießen, die ebenfalls als Feature-Element abgebildet werden können.

Es ist ersichtlich, dass bei komplexen Geometrieformen das Suchen und Auswählen aus einer Featurebibliothek deutlich schneller vonstatten geht als das Neuerstellen der gesamten Geometrie. Allerdings gilt auch hier die gleiche Voraussetzung wie bei allen CAD-Bibliotheken, dass eine benutzerfreundliche Auswahl auf Basis einer alphanumerischen Klassifizierung gewährleistet sein muss [Bole02].

Der Gebrauch einer Featurebibliothek wird nur dann akzeptiert, wenn sich durch schnelles Finden der zu importierenden Elemente der Arbeitsprozess beschleunigt. Ein wesentlicher Begleiteffekt ist, dass die so eingefügten Features alle einem einheitlichen Industrie- oder Firmenstandard gehorchen. So ist die bereits erwähnte Zentrierbohrung beispielsweise eindeutig genormt. Also liegt es nahe, die möglichen Größen einer solchen Bohrung tabellarisch in einem so genannten Spreadsheet darzustellen.

Diese Konstruktionstabelle erleichtert dem Konstrukteur die Auswahl der passenden Bohrung erheblich, denn er muss sich nicht um die richtige Kombination der Parameter untereinander kümmern, sondern entscheidet sich für eine genormte und standardisierte Größe. Diese standardisierten Formelemente tragen im Idealfall das Wissen über ihre Ursprungswerte in sich, so dass bei einer nachträglichen Änderung im CAD-System die Verletzung des Standards erkannt wird. Der Konstrukteur hat dann entweder die Wahl, diese Abweichung zu begründen oder kann auf eine im Spreadsheet definierte Standardreihe zurückzugreifen. Hierbei ist es wichtig, dass die Begründung für die Auswahl direkt dem Feature zugeordnet wird, damit eine spätere Auswertung in nachfolgenden Prozessen ermöglicht wird.

Letztendlich tragen diese Funktionalitäten dazu bei, dass das Prinzip der eindeutigen Produktbeschreibung realisiert werden kann, da nicht auf eine vereinfachte Darstellung zurückgegriffen werden muss. Außerdem trägt die Nutzung von standardisierten Formfeatures zur Verringerung von Fehlern und zu einer Kostensenkung bei, da in den sich anschließenden Fertigungsprozessen eine eindeutige Zuordnung von Werkzeugen zu den verwendeten Formelementen hergestellt werden kann. Beispielsweise kann dem Feature „Zentrierbohrung“ einer bestimmten Größe der passende Zentrierbohrer eindeutig zugeordnet werden. Solche Verbindungen können entweder direkt im Feature hinterlegt werden oder wie vielfach angewandt, in der beiliegenden Featuredokumentation, die am besten in einem annähernd „neutralen“ Format wie HTML vorliegt, aufgeführt sein.

In Featuredokumentationen lassen sich weitere Hilfen wie Prinzipskizzen, verbale Beschreibungen, 3D-Bilder des Features, Anwendungsrichtlinien oder Fertigungsinformationen abbilden. Das Feature wird somit zum Informationsobjekt, welches weit über die geometrische Beschreibung hinausgeht.

In der Praxis ergeben sich zusätzliche Anforderungen bei der Anwendung von Features. So fordert beispielsweise der Konstrukteur, dass zu einer gewählten Schraube (Variantenteil) auch gleich die passende Bohrung (Feature) gesetzt werden soll. Es gibt bereits Lösungsansätze, mit denen der Anwender so genannte Schablonen zusammenstellen kann, in denen Kombinationen von einem oder mehreren Variantenteilen in Verbindung mit einem oder

mehreren Features möglich sind. Die Teile sind assoziativ mit den Features verknüpft, so dass bei einer nachträglichen Positionsänderung des Teils auch das Feature neu positioniert wird. Wird ein Variantenteil, das analog zum Feature auf einem Spreadsheet basiert, gegen eine geometrisch ähnliche Variante ausgetauscht, etwa ein größerer Schraubendurchmesser, so kann das verknüpfte Feature bei eindeutiger Zuordnung automatisch ausgetauscht werden. Sollte diese Zuordnung nicht eindeutig gegeben sein, so kann sich der Konstrukteur anhand des hinterlegten Spreadsheets für das passende Feature entscheiden. Damit lässt sich einerseits der Aufwand für Änderungen reduzieren, andererseits wird der Konstrukteur in den frühen Phasen der Produktauslegung bei der Untersuchung mehrerer Varianten unterstützt. Interessant werden Features besonders dann, wenn über die Konstruktion hinaus andere Bereiche der Prozesskette Berücksichtigung finden sollen. Hierbei ist in jedem Fall zu klären, ob und wie die Featureinformationen weiterverarbeitet werden können. Im idealen Fall wird das gleiche CAD/CAM-System durchgängig eingesetzt, denn dadurch wird, da zwischen den Prozessstufen keine Daten verloren gehen, eine integrierte Featureauswertung möglich. Hier stehen prinzipiell sämtliche Featureinformationen zur Verfügung. Aus dem Featuretyp und den technischen Attributen ergibt sich ein Prinzip, nach dem die Fertigung erfolgen soll. Beispielsweise bestimmt die Qualität (Attribut) einer Oberfläche (Form-Feature) maßgeblich die Art des Werkzeuges und die Prozessparameter. Semantikbehaftete Features besitzen eine höhere Informationsdichte für den Produktlebenszyklus und ermöglichen dadurch eine größere Entwicklungsgeschwindigkeit und Effizienz.

Mit der Integration multimedialer Informationen in Features und der Unterstützung verteilter Arbeitsweisen erschließen sich neue Formen der Produktmodellierung beim Einsatz der Feature-Technologie. Hierbei entstehen verbesserte Möglichkeiten der Systemkommunikation, wie bei der Unterstützung von Geometriedefinitionen. Zusätzlich dient die Feature-Technologie der Standardisierung, wodurch wiederkehrende Aufgaben, die ähnlich bearbeitet werden, gleiche Strukturen besitzen.

2.4.3 Featuretypen

Der Einsatz von Features unterstützt wie bereits beschrieben den Konstrukteur oder den Fertigungsplaner bei Routinetätigkeiten. In Tabelle 3 werden unterschiedliche Featuretypen beschrieben, die aufgabenspezifische Informationen tragen, wodurch deren Einsatzgebiet gekennzeichnet wird.

Grundsätzlich sollte die Featuremodellierung so konzipiert sein, dass sie ohne einen großen Mehraufwand erfolgen kann und auch für die Abteilung, die die Features in das Produktmo-

dell integriert, einen Vorteil hervorruft. So muss man sich in erster Linie Gedanken über die Informationen der Feature machen, damit ein möglichst großer Effekt erzielt wird. Weiter ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Features zu einem frühen Zeitpunkt im Produktentstehungsprozess integriert werden, damit das Nutzenpotential voll ausgeschöpft werden kann. Die meisten Featurekonzepte setzen erst bei einem gewissen Reifegrad des Produktes an, um weitere Schritte im Produktentstehungsprozess einzuleiten [KrKR92].

Tabelle 3: Featuretypen

Featuretyp	Featureinformation	Einsatzgebiet	Routinetätigkeit	Literatur
Geometrie-Feature	Volumen- oder Flächengeometrie von Bauteilen	Konstruktion	Modellierungsaufwand wird reduziert	[Han96]
Design-Feature	Höherwertige Konstruktionselemente	Konstruktion	Produktmodellierung	[ScSt93]
Informations-Feature	Textinformationen für den entsprechenden Anwendungsbereich	Konstruktion + Planung	Dokumentenstrukturen unterstützen die Informationsintegration	[Kies97]
Manufacturing-(machining) Feature	Prozessinformationen	Technische Produktionsplanung	Verknüpfungen zu anderen Aufgabenbereichen werden erzeugt	[Nest00,LiON02, Han96]
Assembly-Feature	Montageinformationen	Technische Produktionsplanung	Dokumentenstrukturen unterstützen die Informationsintegration	[BBDH97, BIFZ04, BrHJ95, BuWR89, HoBJ95, MaBW97, SeBI97, Holl97]
Feature / Semantik-Feature	Geometrieinformation + semantische Information	Konstruktion	Reduzierter Modellierungsaufwand und Dokumentenstruktur	[BiBr00; Bida99]
Funktions-Feature	Darstellung der Funktion eines Geometriebereiches und des funktionalen Zusammenhangs	Konstruktion	Erstellung einer Funktionssicht auf das Produktmodell	[Haas95, ScSt94, Brow03]
Ästhetik-Feature	Charakteristische Linien, Freiflächen, Krümmungen	Konstruktion; Design		[FuNA99]
Berechnungs-Feature	Vorbereitung einer FEM-Simulationen, Ergebnisspeicher der FEM-Berechnung	Konstruktion, Bauteilauslegung	Modulintegration, Berechnung	[Bär98, WeWS00]
Kalkulations-Feature	Repräsentation der Kostenentstehung	Controlling der Produktentwicklung	Transparenz der Kostenbeeinflussung	[EhSc92, Wolf94]
Mess-Feature	Definition der zu messenden Produktmerkmale	Technische Produktionsplanung	Integration der Qualitätssicherung	[Cies97, HSKP00]

2.4.3.1 Geometrie-Features

Durch die Feature-Technologie besteht die Möglichkeit der Datenintegration in das Produktmodell. Hierbei werden vorhandene Strukturen des Produktmodells zur Platzierung genutzt. Durch den Aufbau der Feature-Elemente wird eine Strukturierung der Daten erzeugt, damit zusammengehörige Daten auch als solche erkannt werden können. So werden die Informationen abteilungs- oder aufgabenbezogen zusammengefasst.

Die automatische Erstellung von Geometrieelementen ruft ebenfalls eine immer wiederkehrende Logik hervor, die die Feature-Elemente mit weiteren Informationen unter gleichen Knoten im Produktmodell ablegt. Somit wird eine Standardisierung der Produktmodelle erzielt, wodurch verteiltes Konstruieren und eine verbesserte Modelltransparenz ermöglicht werden. Durch diesen einheitlichen Ansatz der Modellierung von Produkten, Prozessen und Ressourcen wird ebenso die verteilte Produktentwicklung gefördert, da ähnliche Produktstrukturen erzeugt werden, die immer auf gleiche Elemente zurückgreifen.

2.4.3.2 Assembly-Features

Bei Assembly-Features handelt es sich um Informationselemente, die Einsatz in der Montageplanung finden, indem das Produktmodell zusätzliche Informationen über den Montageprozess erhält. Im Bereich der Assembly-Features gibt es unterschiedliche Definitionen über die Inhalte und die Repräsentation im Produktmodell. Shah und Rogers beschreiben Assembly-Features als „mating pair of form features“ mit Parametern und verträglichen Constraints als ein Teil der Featuredefinition [ShRo93].

Anantha et al (1996) hingegen beschränken die Definition auf geometrische Bereiche, denen nach Fertigungsgesichtspunkten keine Bedeutung zukommt, jedoch für die Montageplanung eine Zusatzinformation darstellt. Neben dem Begriff Assembly-Feature findet man in der Literatur auch den Ausdruck „mating pair“ oder „mating conditions“. Mullins und Anderson definieren so die Kontakt-Beziehungen zwischen zwei Bauteilen [MuAn98]. Bronsvooort beschreibt einen erweiterten Assembly-Feature-Ansatz, der neben einem „connection feature“ zusätzlich ein „handling feature“ besitzt. Das „connection feature“ beschreibt die Eigenschaften der Verbindung wie z.B. die Bauteillage der Komponenten, die Montagebewegung und die Kontaktflächen. Die „handling features“ repräsentieren die Bereiche des Bauteils, die von Greifern und anderen Handhabungsgeräten verwendet werden können [BIFo94]. Über „handling features“ werden ebenfalls die Einspannungen des Basisbauteils definiert. Eine weitere Interpretation von Assembly Features geben Gui und Mäntylä [GuMä94], indem sie „connectors“ definieren, die Verbindungen zwischen den zu fügenden Komponenten darstellen und in erster Linie die Funktion der Verbindung repräsentieren. Eine weitere Variante von Assembly

Features stellt das „virtual link“-Konzept von Lee and Gossard dar. Das Konzept verbindet die Bauteilflächen, die gepaart werden, und definiert zusätzlich die Information über die Freiheitsgrade der Verbindung.

Im Bereich Assembly-Features gibt es verschiedene Ansätze, die Informationen zu hinterlegen. An dieser Stelle stellt sich die grundsätzliche Frage, welche Informationen für die Montageplanung interessant sind und wie diese Informationen bereitgestellt werden sollen, um die Planung bestmöglich zu unterstützen. Die Montageplanung basiert unter anderem auf einer Fügeflächenmatrix, daher ist es notwendig, die Information der Fügeflächen im Modell zu hinterlegen. Über die Fügeflächen und die Position der Komponenten wird im Produktmodell die Endposition der Fügebewegung definiert. Für die Montageplanung ist die Fügebewegung der Komponenten eine wichtige Information, die daher ebenfalls implizit oder explizit im Feature enthalten sein muss. Weitere wichtige Informationen bilden die Toleranzen der Bauteile, da es oft im CAD nicht gibt, aber den Fügeprozess und die Funktion der Komponenten stark beeinflussen. Es gibt unterschiedliche Ansätze, die den Forderungen der Integration der Montageinformation in Teilaspekten nachkommen. Grundsätzlich bieten neueste Softwaresysteme verschiedene Alternativen an, ein Modell um die entsprechenden Informationen zu erweitern.

1. Die meisten CAD-Systeme haben eigene Module, die den Zusammenbau von Komponenten unterstützen, indem Beziehungen zwischen den Bauteilen aufgebaut werden. Diese Beziehungen bilden die ersten Informationen über den Zusammenbau eines Produktes, da die Position der Bauteile (Konzentrität, Offset oder Kontakt) zueinander definiert wird.
2. Benutzerdefinierte Elemente mit selbst definierten Parametern werden als eigenständiges Element im Produktbaum platziert. Dieses Feature enthält beispielsweise einen Verweis auf die Bauteile, die eine gemeinsame Fügefläche besitzen, sowie die Information über den Montageprozess.
3. Jedes Bauteil besitzt ein Feature, das in einem korrelierenden Feature verlinkt ist und somit einen Montageprozess repräsentiert. Die Information des Montageprozesses wird in beiden Elementen platziert, um bei Änderungen keinem Informationsverlust zu unterliegen.
4. Moderne CAD-Systeme besitzen gegebenenfalls Anbindungen an CAx-Systeme, die Prozesspläne abbilden. Daher ist es auch möglich, eine direkte Verbindung zur Prozessplanung herzustellen, indem die Features des Produktmodells, die die Fügefläche darstellen, die Prozessinformation im Prozessgraphen detaillieren.

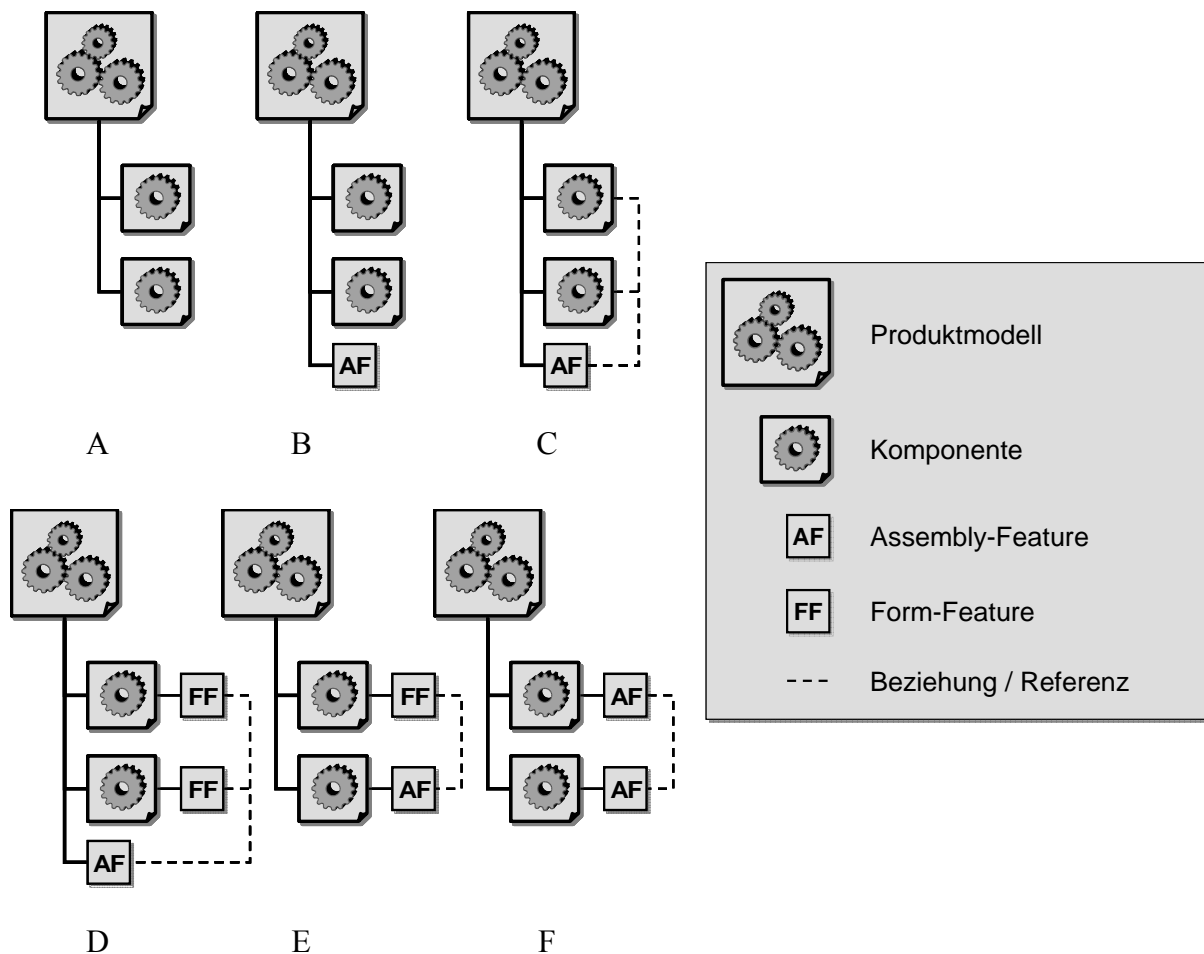


Abbildung 15: Assembly-Feature-Konzept [AvBB06]

Fast alle Methoden der Assembly-Feature-Konzepte basieren auf der Verknüpfung von Bauteilen durch informationstechnische Verbindungen im CAD-System. Diese Verbindungen werden in den meisten CAD-Systemen durch Links oder Constraints repräsentiert.

Ein Link oder ein Constraint stellt eine Verbindung bzw. einen Verweis zwischen zwei oder mehreren Elementen her. Diese Verbindung lässt sich am einfachsten am Beispiel der Internet-Links verdeutlichen, über die man zu anderen Internetseiten gelangen kann. So repräsentiert der Link eines Assembly-Features eine Verbindung zwischen den Bauteilen, die miteinander gefügt werden. Bei der Verknüpfung kann es sich um eine Verbindung handeln, die auf den Bauteilnamen oder den zu fügenden Flächen, die nach der Montage eine Kontaktzone beschreiben, basiert.

Abbildung 15 beschreibt bestehende Featurekonzepte der Montageplanung, die Zusatzinformationen zur Verfügung stellen. Die in das Modell integrierte Information bezieht sich bei den meisten Konzepten auf die Definition der Geometriebereiche der interagierenden Komponenten und auf erste grobe Prozessinformationen. Die Konzepte werden auf ein Produkt-

modell, bestehend aus zwei Komponenten, angewendet, um die Unterschiede in der Produktstruktur und die Art der Verknüpfungen zu verdeutlichen.

Produktbaum A in Abbildung 15 zeigt die Struktur des Produktes mit seinen zwei Komponenten. Das Produktmodell kann beide Komponenten aufnehmen, da es in der Hierarchie eine Ebene höher liegt. Konzept B verwaltet zusätzlich ein Assembly-Feature als ein eigenständiges Element, welches auf Komponenten-Ebene gesetzt wird und als Information die beiden Bauteilnamen trägt, die gefügt werden sollen. Ebenfalls enthält dieses Element die Information über den Montageprozess, der die beiden Komponenten fügt. Bei Konzept C handelt es sich um eine verbesserte Lösung, da die zu fügenden Komponenten über einen Constraint mit dem Assembly-Feature verbunden sind und daher bei Änderungen in der Produktstruktur erkannt werden können. Es existiert dann nur noch eine Verbindung mit dem Assembly-Feature und die gelöschte Komponente wird über eine fehlende Verknüpfung angezeigt. Vielhaber [Viel05] beschreibt einen derartigen Ansatz, wobei er die Assembly-Features als so genannte generische Montageobjekte bezeichnet, die einerseits den Namen der korrespondierenden Komponenten tragen und andererseits Schweißpunkte verwalten können.

Konzept D geht noch einen Schritt weiter und stellt dem Assembly-Feature nicht nur die Komponenten als Link zur Verfügung, sondern referenziert zusätzlich die Bereiche der Bauteile, die miteinander in Kontakt treten. Ein Assembly-Feature Konzept mit einer solchen Struktur wird von Bronsvort, Van Holland und Jansen beschrieben [BrHJ95, BBDH97]. Van Holland beschreibt in seiner Arbeit eine Softwareumsetzung (DIAC 1), die Assembly-Feature-Elemente zur Verbindung zweier Geometriebereiche erstellt. Die Featuretypen der Verbindung sind durch die Software vorgegeben und verwalten die zugehörigen Produktoberflächen.

In Konzept E wird ähnlich verfahren wie in Konzept D, mit dem Unterschied, dass das Assembly-Feature nun Teil eines Bauteils ist und der geometrische Bereich der anderen Komponente über einen Constraint mit dem Assembly-Feature verbunden wird. Variante F stellt einen weiteren in der Literatur beschriebenen Ansatz dar, Montageinformationen mit der Hilfe von Features zu unterstützen. Hier werden beide Komponenten jeweils mit einem Assembly-Feature erweitert und miteinander bidirektional verknüpft. Dieser Assembly-Feature-Ansatz wird in den Arbeiten von Franke und Avgoustinov et al. beschrieben [Frank03, AvBF02a, AvBF02b].

Der Trend in der Speicherung von CAD-Daten geht immer mehr in die Richtung von EDM/PDM-Systemen. Diese Systeme sind zurzeit jedoch noch nicht uneingeschränkt in der Lage, bauteilübergreifende Verbindungen zu verwalten. Daher besteht an dieser Stelle noch

Implementierungsbedarf für die Systemanbieter, damit neuartige Modellierungsmethoden verwaltet werden können, um Akzeptanzproblemen aus den operativen Bereichen entgegen zu wirken. Die vorgestellten Konzepte für Assembly-Features werden hinsichtlich folgender Kriterien bewertet, um Anforderungen an neue Konzepte zu definieren:

- Inhalt, Speicherort und Qualität der Informationen
- Art und Weise der Verbindungsrealisierung zwischen den Komponenten
- Aufwand bei der Integration der Information (Anzahl der Feature-Elemente, Systemunterstützung)
- Stabilität des Konzeptes bei Änderungen der Produktstruktur
- Flexibilität des Konzeptes bei Änderungen von Fertigungstechnologien
- Nutzenpotential des Konzeptes in anderen Bereichen der Technischen Produktionsplanung

Die Konzepte aus Abbildung 15 werden ebenfalls hinsichtlich Aufwand, Datenredundanz und Wissensrepräsentation untersucht. Grundsätzlich ist es das Ziel bei der Verwendung der Feature-Technologie, Verschwendungen zu vermeiden, indem der Aufwand minimiert wird und die benötigten Informationen vollständig abgebildet werden. Die Stabilität ist ein bedeutendes Kriterium, um die Akzeptanz neuer Technologien zu fördern. Ist das Modell mit den entsprechenden bauteilübergreifenden Verknüpfungen erzeugt worden, so handelt es sich bei allen vorgestellten Konzepten um ein stabiles Modell.

Die Stabilität der Konzepte ist jedoch eingeschränkt, wenn eines der beiden Bauteile gelöscht wird. Durch das Löschen einer Komponente verliert beispielsweise das in Abbildung 15 vorgestellte Konzept B die Beziehung zwischen den beiden Bauteilen. Konzept C besitzt noch immer das Assembly-Feature, wobei nur noch ein Link verwaltet wird und ein zweiter erzeugt werden muss oder man das Feature löschen muss und bei einer neuen Verbindung erneut platziert. Bei Konzept D geht ebenfalls der bauteilübergreifende Link verloren. Das Feature der verbleibenden Komponente ist noch in vollen Zügen wirksam und benötigt einen neuen Partner. Die Bewertung der bestehenden Assembly-Featurekonzepte wird in Tabelle 4 dargestellt.

Der optimale Zustand der Informationsintegration ist jedoch ein Konzept, das ohne neue Elemente auskommt und sich auf Informationen bereits integrierter Elementen bezieht. Natürlich soll das Konzept auch softwareunabhängig arbeiten, damit unterschiedliche Systeme genutzt werden können. Ein zusätzliches Assembly-Feature ist nicht erstrebenswert, da bei Änderungen der Produktstruktur fehlende Verbindungen aufgezeigt und neu gesetzt werden oder das Element gelöscht werden muss, da durch Konstruktionsmodifikationen keine Verbindung

mehr zu der noch bestehenden Komponente existiert. Auffällig ist auch die Forderung nach einer minimalen Anzahl an Feature-Elemente zur Informationserstellung, um den Aufwand so gering wie möglich zu belassen. Man geht sogar soweit, dass Konzepte gefordert werden, die ohne zusätzliche Elemente auskommen. Dieses Ziel kann nur dann verwirklicht werden, wenn die relevanten Informationen in anderen Elementen integriert sind, die zu einem früheren Zeitpunkt platziert worden sind.

Tabelle 4: Bewertung bestehender Assembly-Feature-Konzepte

Konzept	B	C	D	E	F
Anzahl der Feature-Elemente	1	1	3	2	2
Information	Produktnamen Montage- informationen	Komponenten über Verknüpfung	Geometrische Bereiche, Komponenten über Verknüpfung	Geometrische Bereiche mit direkter Verknüpfung	Geometrische Bereiche mit bidirektionaler Verknüpfung
Verknüpfungen / Constraints	nein	Bauteile werden verlinkt	Geometrische Bereiche besitzen dynamische Verknüpfung	Geometrische Bereiche sind miteinander verknüpft	zwei Assembly- Features sind miteinander verlinkt
Systemabhängigkeit	nein	ja	ja	ja	ja
Zusätzlich benötigte Software	nein	nein	ja	nein	ja
Stabilität bei Produktänderungen	ja (ohne Anzeiger)	ja (mit fehlendem Link)	ja (mit fehlendem Link)	Ja (mit fehlendem Link)	ja (mit fehlendem Link)
Flexibilität bei Technologieänderungen	Montage- information (MI) muss explizit gesetzt werden	MI muss explizit gesetzt werden	MI durch Software unterstützt (Datenbank muss angepasst werden)	MI muss explizit gesetzt werden (nur ein intelligentes Element)	MI durch korrelierende Elemente unterstützt (Datenbank muss angepasst werden)

Hierzu kann die Integration von Beziehungen, die über bestehende Featurekonzepte abgebildet werden, zur Lösung beitragen. In Kombination mit einer hinterlegten Logik können semantische Interpretationen vorgenommen werden, wodurch Wissen generiert wird. Die Prozessinformation kann daher bereits mittels Semantik erstellt werden. Jedoch können beispielsweise nicht alle montagerelevanten Informationen auf diese Art erzeugt werden. Die Montagerichtung sowie geometrische Montageaspekte können automatisiert erzeugt werden. Informationen über den Montageprozess wie ein Anziehdrehmoment oder eine Einpresskraft müssen hingegen explizit integriert werden. Damit an dieser Stelle keine redundanten Daten erzeugt werden, sollte diese Information über eine dynamische Verknüpfung mit dem Pro-

duktmodell im Prozessgraph verankert werden. So entsteht eine integrierte Planungsumgebung, bei der jede Abteilung den Fokus auf die eigentlichen Arbeitsinhalte legen kann.

2.4.4 Manufacturing-Features (Fertigungs- oder Bearbeitungs-Features)

Unter Fertigungsfeatures versteht man ein Element, das in ein oder mehrere Bearbeitungs-Features unterteilt werden kann mit einem Bezug zur Arbeitsplanung [VDI2218]. Ein Bearbeitungs-Feature wird durch die Bearbeitungsverfahren bestimmt, die im Unternehmen zur Verfügung stehen. Die Feature-Elemente orientieren sich u.a. an der Denkweise des NC-Planers. Synonym verwendete Begriffe für Manufacturing-Features sind Fertigungs- oder Operations-Features. Die in der Literatur behandelten Fertigungsfeatures sind fast ausschließlich auf die spanende Bearbeitung ausgerichtet. Mit den Feature-Elementen werden Negativvolumina beschrieben, die vom Grundkörper entfernt werden. Li et al. beschreibt neben dem reinen Subtraktionsvolumen auch additive Formelemente, durch die die Rohteilgeometrie erzeugt wird [LiON02]. Bearbeitungs-Features repräsentieren einen Arbeitsschritt, der mit einem Werkzeug ausgeführt wird, wobei die Gestaltkomponente das zu zerspanende Volumen darstellt. Haasis und Rudolph verwenden den Begriff des Bearbeitungs-Features für einen Arbeitsabschnitt, der mit demselben Werkzeug ausgeführt wird. [Haas97, Rudo93]. Die semantischen Daten sind in diesem Fall die technologischen Daten des Prozesses und der verwendeten Werkzeuge [Rudo93]. Basierend auf der Rohteilgeometrie werden die Zerspanungsvolumen definiert, indem die Endgeometrie von der Rohteilgeometrie entfernt wird. Das Zerspanvolumen wird unter Randbedingungen zerlegt und in Fertigungsabschnitte unterteilt. Bereits 1996 haben Mäntylä, Neu und Shah ein Klassifizierungskonzept vorgestellt, das Konstruktionsfeatures direkt mit Prozesselementen verknüpft, die wiederum die Informationen über Werkzeuge und Ressourcen tragen [MäNS96]. Somit wurde ein erstes Kommunikationsmodell erstellt, das sich mit einer Feature-basierten Verknüpfung von Konstruktion und Fertigungsplanung befasst hat. Daher wird der Prozessplaner hinsichtlich der Fertigungsaspekte in seinen Tätigkeiten unterstützt, indem das Produkt aus fertigungstechnischer Sicht überprüft wird. Werden Unstimmigkeiten in Bezug auf die Produktgeometrie ermittelt, so können Modifikationsvorschläge unterbreitet werden, die eine fertigungsgerechte Produktion der Komponenten gewährleisten [GNRZ99, MäOP89]. Wenn man in den Bereich kommerzieller Softwaretools wechselt, werden Fertigungsfeatures ebenfalls ausschließlich für die Zerspanung definiert, wobei neben der Fräsbearbeitung das Drehen berücksichtigt wird. Die Features, die von den Softwareanbietern zur Verfügung gestellt werden, besitzen neben der Geometrie des zu zerspanenden Volumens zusätzlich weitere Prozesseigenschaften. Intern

werden die Werkzeugwege basierend auf den geometrischen Ausprägungen des Formelementes in Kombination mit der Zerspangeometrie und dem verwendeten Werkzeug berechnet, wodurch eine CAD-CAM-Kopplung realisiert wird, die einen NC-Code für die Werkzeugmaschine generiert [Nest00]. Die Kombination der Bearbeitungsfeatures mit einem NC-Programm besitzt Freiheiten im Bereich der Reihenfolge und der Festlegung der Werkzeugwechsel. Die Integration von Erfahrungswissen stellt eine Möglichkeit der Anlagerung von prozesstechnischem Wissen dar. Die Nutzung von technologie- und prozessspezifischem Wissen ist einer der entscheidenden Erfolgsfaktoren der Unternehmen [KIFK99]. Falls dieses Wissen im Datenmodell enthalten ist, kann es kontinuierlich durch neueres fertigungstechnisches Wissen ersetzt werden [TöZa99].

Die Nutzung von Feature-Informationen, die Erfahrungen repräsentieren, verbessert die Nachvollziehbarkeit und die Angemessenheit von Maßnahmen, Hinweisen und ähnlichem, wodurch die Transparenz der Planungsvorgaben und der Prozessrealisierung verbessert wird. Die Beherrschung der nahtlosen Prozesskette ruft zusätzliche Anforderungen an die gesamte Informationsversorgung Feature-basierter Konzepte hervor, da neben den geometrischen auch die fertigungsspezifisch relevanten Produktinformationen frühzeitig zur Verfügung stehen sollen [Nest00]. Zusammenfassend kann man sagen, dass es sich bei Fertigungs- oder Bearbeitungsfeatures um Informationselemente handelt, die über geometrische Ausprägungen von Formelementen und einer hinterlegten Prozesscharakteristik (Werkzeuge, Ressourcen, Prozessstrategie, usw.) Prozesswissen generieren. Jedoch wird die Prozessdefinition in vielen Fällen eingeschränkt, da Alternativen nicht berücksichtigt werden können und die Auswahl geeigneter Fertigungs-Features auf den Erfahrungen der Mitarbeiter basieren. So ist es z.B. erstrebenswert, bei der Zerspanung zweier unterschiedlicher Taschen einer Komponente verschiedene Bearbeitungsalternativen zu simulieren, um die wirtschaftlichste Alternative zu ermitteln. Hierbei müssen ebenfalls verschiedene Kombinationen aus eingesetztem Werkzeug und eingesetzter Bearbeitungsstrategie analysiert werden. Das Ergebnis sind kalkulierte Taktzeiten, die in Verbindung mit hinterlegten Maschinenstundensätzen den Produkten als Bearbeitungskosten aufgeschlagen werden. Neben der Zerspanung können auch andere technologische Prozesse über die Feature-Technologie unterstützt werden. So kann beispielsweise ein Formelement hinsichtlich der Eignung für den Schmiedeprozess überprüft werden. Hierbei wird das Konstruktionselement im Hinblick auf Gestaltungsrichtlinien für die Technologie Schmieden untersucht. Entsprechen nicht alle Elemente des Produktmodells den Richtlinien, so sollte die Technologie jedoch nicht von vornherein ausgeschlossen werden, sondern immer noch als Alternative berücksichtigt werden, die unter gewissen Modifikationen der Produkt-

geometrie Anwendung finden kann. Die Modifikationen dürfen dabei jedoch keine Funktionseinschränkungen hervorrufen, um die Produktfunktionalität und somit die Produktidee nicht einzuschränken.

2.4.5 Gezielter Einsatz der Feature-Technologie

Zukünftig wird die Feature-Technologie mehr und mehr zum Einsatz kommen, um die Abteilungen zu entlasten, indem Routinetätigkeiten durch Automatismen abgearbeitet werden. In diesem Zusammenhang besteht jedoch die Gefahr, dass die Modelle mit Informationen überhäuft werden, wodurch das Handling erschwert wird und Umstrukturierungen vorgenommen werden müssen, damit eine Transparenz erhalten bleibt. In der Wissenschaft gibt es viele Ansätze, die Produktionsplanung unter Zuhilfenahme der Feature-Technologie zu unterstützen. Jeder dieser Ansätze verfolgt, wie zuvor beschrieben, jedoch nur das Ziel, eine spezielle Aufgabe zu lösen. Die Feature-Technologie kann jedoch verwendet werden, um gleichzeitig verschiedene Aufgabestellungen zu berücksichtigen. Subrahmanyam, DeVries und Pratt verfolgen einen solchen Ansatz, der über so genannte „Feature Attribute“ eine Fertigungssicht, eine Montagesicht und eine Greifersicht für die Montage eines Produktes ermöglicht [SuDP95]. Bei der Erstellung von Featurekonzepten darf die Modellgröße nicht unberücksichtigt bleiben, da sie den Umgang mit den Modellen entscheidend beeinflusst. Aus diesem Grund ist es wichtig, die Struktur der Features und deren Informationsgehalt bestmöglich zu gestalten. Semantik in Kombination mit Bauteilgeometrie bildet einen hohen Informationsgehalt, da die semantische Information für verschiedenste Aufgaben genutzt werden kann. In diesem Zusammenhang ist es das Ziel, den Informationsgehalt eines Elementes zu maximieren, indem die Informationsdichte erhöht wird. Diese Vergrößerung wird durch eine Mehrfachverwendung erzielt, wodurch die Informationen eines Elements einer optimierten Verwendung unterliegen. Zusammenfassend können folgende Potentiale der Feature-Technologie abgeleitet werden, die auch nach Vajna und Podehl als grundsätzliche Vorteile der Feature-Technologie beschrieben werden [VaPo98]:

1. Umfassende Produkt- und Prozessdarstellung in einem integrierten Datenmodell
2. Verbesserung der Kommunikation
 - a. innerhalb des Produktentstehungsprozesses
 - b. zwischen den Benutzern von CAx-Systemen
 - c. zwischen den verschiedenen CAx-Systemen
3. Verkürzung der Produktentwicklungszeit

2.4.6 Wissensspeicherung – Repräsentation

Mit der Feature-Technologie ist es, wie bereits beschrieben, möglich, Modelle um Produkt- oder Prozesswissen zu erweitern. Der Begriff „Wissen“ wird in der Regel in Abgrenzung zu Informationen und Daten definiert. Daten werden als Einträge beschrieben, deren Typ oder syntaktische Struktur bekannt sind. Als Wissen hingegen werden Einträge definiert, die einem Zusammenhang unterliegen, d.h. bei denen bekannt ist, was sie beschreiben oder welche Eigenschaften eines Objektes sie repräsentieren.

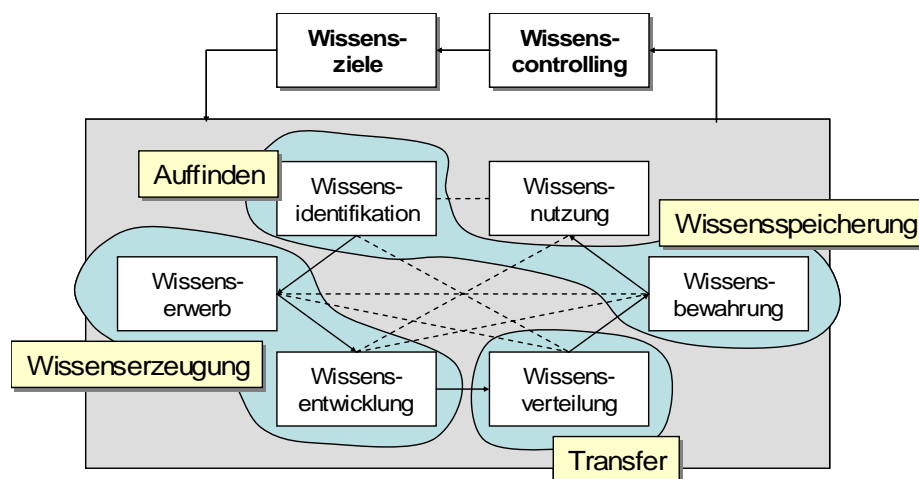


Abbildung 16: Prozess des Wissensmanagements [PrRR99]

Wissen setzt somit eine semantische Struktur voraus, wobei Informationen kontextgebundene Daten darstellen, die mit einer konkreten Situation in Verbindung gebracht werden. Man unterscheidet prinzipiell Wissen in die Formen des "impliziten" und des "expliziten" Wissens. Ersteres ist nicht fassbar, sondern basiert auf persönlichen Erfahrungen, erlernten Fertigkeiten und deren beliebiger Kombination. Explizites Wissen ist konkret erfassbar, da es in formalen Strukturen vorliegt. Zusammenfassend kann man sagen, dass Wissen die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten ist, die Individuen zur Lösung von Problemen einsetzen.

Wissensmanagement besitzt die wesentlichen Ziele der Wissenserschaffung, des Wissenstransfers, der Wissensspeicherung sowie des Auffindens von Wissen in Form von Daten und Informationen, die in Beziehungen zueinander gesetzt werden. Probst et al. stellen einen praxisbezogenen Bezugsrahmen des Wissensmanagements vor, der zur Gestaltung und Beeinflussung der Ressource Wissen dienen soll. Abbildung 16 zeigt den Prozess des Wissensmanagements und die Beziehungen zwischen den einzelnen Wissensbausteinen auf [PrRR99]. Die inneren Bausteine tragen zur Lösung von Aufgaben bei und weisen eine starke Verknüpfung auf, wodurch von einem ganzheitlichen Ansatz ausgegangen werden kann [Lehn00]. Eine Verbesserung von wissensintensiven Prozessen hängt im hohen Maße von der Verbesserung

der prozessinternen und -externen Kommunikationsstruktur ab. Daher muss die Integration von Prozess- und Kommunikationsmodellen über verschiedene Sichten verfügen, um eine Kommunikationsbasis zu realisieren [Remu02]. Ebenso sind unterschiedliche Sichten sowie verschiedenste Strategien der Wissensspeicherung und Wissensrepräsentation von essentieller Bedeutung für die Realisierung einer beschleunigten Produktentstehung.

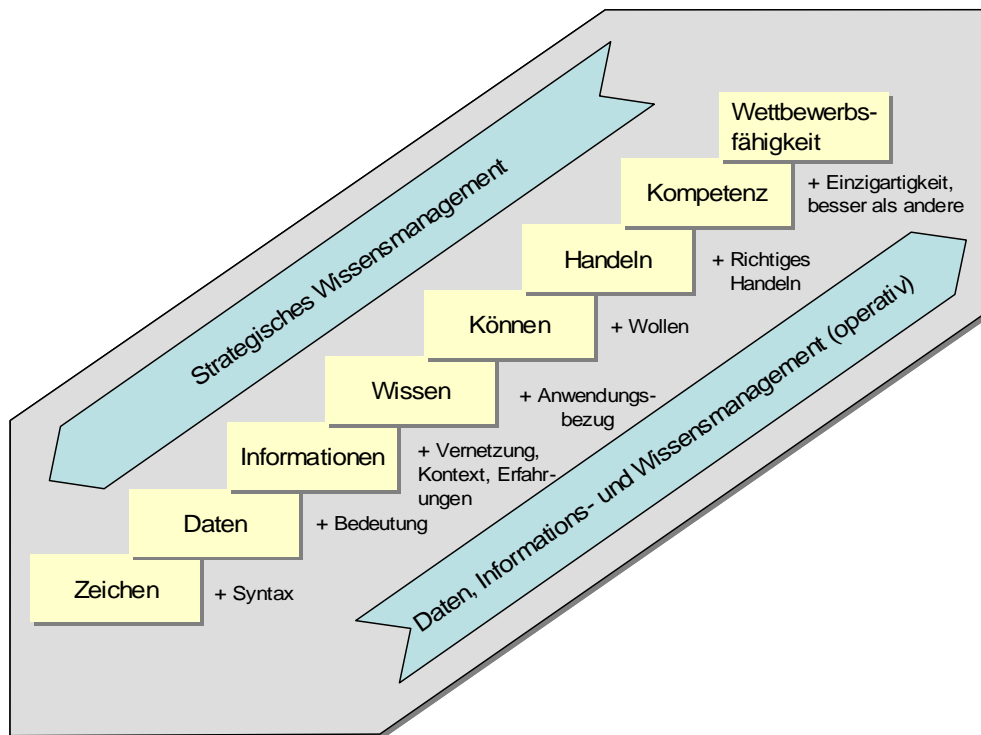


Abbildung 17: Wissenstreppe [Nort99]

Neben dem Konzept des Wissensmanagement stellt North den Übergang von Daten zu Wissen in einer so genannten Wissenstreppe dar, die die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens erklärt, wenn es gelingt, die Kernkompetenzen richtig einzusetzen [Nort99]. Das zu entwickelnde Konzept muss daher ebenfalls die Forderung nach einer unternehmensspezifischen Wissensintegration erfüllen, um Kernkompetenzen unterschiedlicher Unternehmen sinnvoll einsetzen zu können. Damit Wissen durchgängig verwendet werden kann und die Verbindung zu Produktmodell gewährleistet wird, bilden viele Konzepte und Methoden Informationen und Daten im Produktmodell ab. Hierbei besitzen CAD-Systeme unterschiedlichste Formen der Wissens- und Informationsrepräsentation:

1. Textfeld
2. Parameter
3. Formel
4. Regel
5. Tabellen
6. Feature
7. Feature-Kombinationen

Die klassische und einfachste Form der Wissensrepräsentation wird durch ein Textfeld ermöglicht, das an beliebigen Stellen des Produktmodells integriert werden kann und somit gewisse Bereiche näher charakterisiert. Das Textfeld wird in den meisten CAD-Systemen mit einer so genannten Flagge symbolisiert, die einen direkten Bezug zu einer Geometrie besitzt. Eine weitere Form der Wissensrepräsentation stellen Parameter dar. Parameter sind nicht ausschließlich auf Längen- oder Winkelangaben eines Produktes beschränkt. Sie können auch als Textfeld dienen, wodurch es möglich ist, Informationen eines Bereiches direkt im Modell anzeigen zu lassen. Die dritte Stufe der Wissensrepräsentation stellt die Klasse der Formel dar, die aus der Kombination einer Konstanten mit einem Parameter oder aus der Kombination von mehreren Parametern erzeugt wird. Unter diese Klasse fallen auch Beziehungen von Komponenten, die sich aufgrund einer geometrischen Bedingung ergeben. Ein Beispiel hierfür ist eine Offset-Bedingung, die einen bestimmten Abstand zwischen zwei Komponenten definiert. Die Formel, die intern im System erzeugt wird, bezieht sich auf die Translation eines Bauteils zu seinem Zielort. Mit einer Formel wird eine feste Beziehung einer geometrischen Ausprägung oder auch eine Beziehung zwischen zwei Elementen gebildet. Unter einer Regel versteht man eine weitere Möglichkeit, Wissen in ein Modell zu integrieren, welches jedoch nicht unbedingt einer festen Beziehung unterliegt. So gibt es für Durchmesserbereiche von Wellen standardisierte Passfedergrößen. Somit wird die Varianz der Produkte eingeschränkt, wodurch für produzierende Unternehmen z. B. wirtschaftliche Losgrößen bei der Passfederproduktion möglich sind.

Die höchste Ebene der Wissensrepräsentation in modernen CAD-Systemen stellt die Klasse der Features und Feature-Kombinationen dar. Auf der einen Seite existieren softwarespezifische Features, die beispielsweise durch eine Rotation einer Geometrie um eine Achse einen Volumenkörper entstehen lassen. Auf der anderen Seite stehen benutzerspezifische Features, die alle Klassen der zuvor genannten Informationsspeicherung sowie zusätzlich alle softwarespezifischen Featureklassen enthalten können. Durch diese unterschiedlichen Wissensrepräsentationen, die miteinander kombiniert werden, können aus reinen Datensätzen Informationen und Wissen generiert werden. Unter der Klasse „Feature-Kombinationen“ versteht man die Möglichkeit, Feature-Elemente miteinander zu kombinieren, die dann wiederum neues Wissen aus der Kombination unterschiedlicher Feature-Elementen erzeugen. Hierbei können Softwarefeatures und benutzerspezifische Elemente beliebig miteinander interagieren. Somit kann der knowledge based Engineering-Prozess (KBE) unterstützt werden, da Fachwissen, Regeln und Prozessabläufe in den Konstruktionsprozess integriert werden.

Hinsichtlich der Wissensverarbeitung in CAD-Systemen werden im Folgenden die verschiedenen Alternativen der Wissensrepräsentation bewertet. Hierzu werden Kriterien in drei unterschiedliche Klassen unterteilt, die wiederum durch mehrere Eigenschaften näher definiert werden. Die Eigenschaften unterliegen einer Bewertung von 1 bis 5, wobei 5 die höchste Punktzahl beschreibt und 0 als niedrigste Punktzahl vergeben wird, wenn das Kriterium nicht erfüllt ist. Der Einfluss der einzelnen Kriterien wird durch einen Gewichtungsfaktor wiedergegeben, der keiner Allgemeingültigkeit unterliegt.

1. Grundlagen: Welcher Aufwand ist mit der Wissensrepräsentation verbunden und welche Systemeigenschaften besitzen sie?
2. Datenhaltung: Wie werden Daten gehandhabt und mit welchem Datenoutput kann gerechnet werden?
3. Weitere Potentiale: Können sich weitere Vorteile für andere Bereiche ergeben?

Die Grundlagen der Wissensrepräsentation kann man aus Unternehmenssicht in nachstehende Kriterien unterteilen:

- Systemunabhängigkeit: Hierbei wird auf den Aspekt der universellen Konzepteinsetzbarkeit eingegangen, der im besten Fall in jedem CAD-System umgesetzt werden kann.
- Knowhow: Bezieht sich auf den Kenntnisstand des Personenkreises, der die Wissensrepräsentation implementieren und verwalten muss. An dieser Stelle wird beispielsweise bei system- oder softwaretoolübergreifenden Anwendungen die Kenntnis vorausgesetzt, in welcher Form Daten zur Verfügung gestellt werden müssen.
- Geringer Aufwand bei der Implementierung: Der Implementierungsaufwand soll nach Möglichkeit so gering wie möglich gehalten werden, um eine Akzeptanz zu erzeugen.
- Geringer Aufwand bei der Instanziierung (Integration der Elemente): Instanziierungsaufwand steht im direkten Zusammenhang mit der Zeit, die benötigt wird, um die Information in das Modell zu integrieren, da der Integrationsaufwand die Arbeitsweise und Arbeitsinhalte entscheidend beeinflusst.
- Konsistenz: Unter Konsistenz der Daten versteht man, dass bei Verlust des Bezugs das Modell nicht unnötig belastet wird. Jedoch sollte bei Bedarf die Möglichkeit bestehen den Datensatz mit einem neuen Bezug zu erweitern. (siehe Problematik bei bestehenden Assembly-Feature Ansätzen)
- Geringer Modifikationsaufwand: Der Modifikationsaufwand bezieht sich auf strukturelle Änderungen bis hin zur Umsetzung eines neuen Elements. In den meisten Fällen geht eine strukturelle Änderung zwangsweise mit einer Neuimplementierung einher, da der Aufwand gleich zu bewerten ist. Können jedoch immer wiederkehrende Strukturen verwendet werden, so ist der Änderungsaufwand geringer einzuschätzen.

Im Bereich der Datenhaltung werden das Zusammenspiel und die Wissensrepräsentation der Daten bewertet:

- **Hohe Informationsflexibilität:** Das Zusammenspiel der Daten in Bezug auf ihre Syntax wird mit diesem Kriterium bewertet. Hierbei wird besonders berücksichtigt, mit welchem Informationslevel der Daten zu rechnen ist und ob es sich um Datensätze, um Informationen oder sogar um Wissen handelt.
- **Hoher Informationsgehalt:** An dieser Stelle soll besonders die Informationsmenge, die durch eine gewisse Anzahl an Elementen hervorgerufen wird, bewertet werden. Der zuvor definierte Begriff der Informationsdichte ist ein Maß für dieses Kriterium.
- **Hoher Informationsnutzen:** Unter Nutzen von Informationen versteht man die Anwendungsvielfalt von Daten, Information oder Wissen. Dieses Kriterium berücksichtigt eine integrierte Sicht auf die Daten [ChZh02]. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, müssen Datensätze eine semantische Interpretation erlauben, wodurch, wie auch schon in der Definition von Features erwähnt, eine Aggregation von textuellen Informationen in Verbindung mit der entsprechenden Geometrie gebildet werden kann.
- **Guter Informationszugriff:** die Informationen sollen strukturiert abgelegt sein, um sie automatisiert auslesen zu können. Daher müssen standardisierte Konstrukte erzeugt werden, die einem Algorithmus erlauben, gezielt auf Datensätze zugreifen zu können. Informationen müssen schnell verfügbar sein, um zeitraubende Suchen zu vermeiden und die Qualität der Arbeit für den Benutzer zu steigern.

Die letzte Kategorie der Wissensrepräsentationen wird durch die Rubrik Potentiale gebildet, die weitere Entscheidungsaspekte für Unternehmen darstellen, sich für die eine oder andere Wissensrepräsentation zu entscheiden, da sie mit den Unternehmenszielen und der Unternehmensphilosophie vereinbar sind:

- **Modelltransparenz (Standardisierung):** Die vorgestellten Wissensrepräsentationen eignen sich ebenfalls zur Standardisierung und erhöhen somit die Modelltransparenz, da klare Regeln und Richtlinien für die Modellbildung existieren. Auch wird beispielsweise durch eine standardisierte Farbgebung der Elemente ein schnellerer Bezug zum Modell gefunden, da eine einheitliche Sprache zu Grunde gelegt werden kann und nach ähnlichen oder bestenfalls gleichen Konventionen Modelle erstellt werden.
- **Möglichkeiten einer semantischen Verknüpfung:** Dieses Kriterium zielt darauf ab, dass die eingesetzten Wissensrepräsentationen mit anderen Elemente gekoppelt werden können, um neues oder komplexeres Wissen zu generieren.
- **Kopplungsmöglichkeiten:** Unter Kopplungsmöglichkeiten wird die potentielle Möglichkeit verstanden, modellübergreifende Verbindungen zu erstellen. An dieser Stelle wird kein neues Wissen generiert, sondern eine Verbindung zu anderen Modulen oder Softwaretools erstellt, die diese Informationen als Input benötigen, um somit einen Datentransfer zwischen den einzelnen Aufgaben zu gewährleisten.

- Automatisierbarkeit: Der Aspekt der Automatisierbarkeit basiert auf dem gezielten Wissenszugriff und der Ausführung von Aktivitäten, die den Produktentstehungsprozess beschleunigen.

		Wissens- repräsentationen	Textfelder	Parameter	Formeln	Regeln	Tabellen	Features	Feature - Kombinationen
Kriterien		Gewichtungs- faktoren							
Grundlagen	Systemun- abhängigkeit	1	5	4	4	4	5	3	3
	vorausgesetztes Knowhow	2	5	4	4	3	4	2	2
	geringer Implement- ierungsaufwand	3	5	5	4	3	4	3	2
	geringer Integrationsaufwand	3	2	5	4	3	3	4	3
	Konsistenz	2	3	5	4	4	3	4	4
	geringer Struktur- änderungsaufwand	2	4	4	3	2	4	2	2
	Summe		42	52	44	36	40	36	30
Daten	hoher Informationsgehalt	5	1	3	4	4	4	5	5
	hohe Informationsqualität	5	2	2	2	2	4	5	5
	hohe Anwendungsqualität	3	2	2	2	3	5	5	3
	Flexibilität der Information	2	5	2	2	3	4	4	4
	einfacher Informationszugriff	2	2	5	4	3	5	4	4
	Summe		35	45	48	51	73	81	75
Potentiale	Semantische Verknüpfung	4	3	3	2	4	3	5	5
	Standardisierungs- element	3	2	2	2	3	3	4	4
	Automatisierbarkeit	3	1	2	2	3	4	4	5
	Kopplungs- möglichkeit	4	1	3	3	3	5	5	5
	Summe		25	36	32	46	53	64	67
Grundlagen			42	52	44	36	40	36	30
Daten			35	45	48	51	73	81	75
Potentiale			25	36	32	46	53	64	67
Gesamt			102	133	124	133	166	181	172

Abbildung 18: Bewertungsmatrix von Wissensrepräsentationen in CAD-Systemen

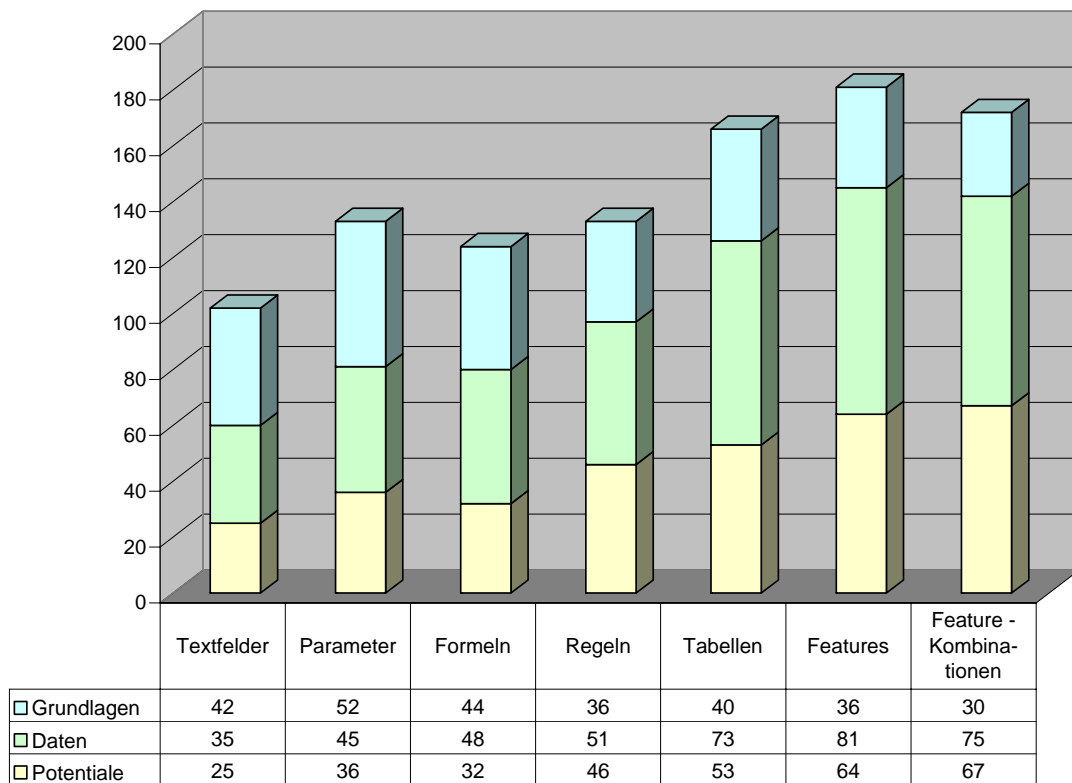


Abbildung 19: Bewertung der Wissensrepräsentation nach Hauptgruppen

Aufgrund der Bewertungen der Wissensrepräsentationen in CAD-Systemen, die in Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellt sind, wird in der Arbeit hauptsächlich mit der Klasse der Features gearbeitet, da sie den höchsten Grad des Wissensmanagements in der Produktentstehung darstellen. Zugleich besitzen die Feature-Elemente die beste Performance für die Konstruktion, da Informationen strukturiert abgelegt werden können und sich Vorteile durch die Informationsvernetzung ergeben, wodurch Datenredundanzen vermieden werden können. Des Weiteren kann automatisiert auf die Strukturen der Feature-Elemente zugegriffen werden, um den Datentransfer und Routinetätigkeiten im Produktentstehungsprozess zu beschleunigen.

Die Informationsdichte kann sich neben der eigentlichen Wissensrepräsentation als entscheidender Faktor im Kampf gegen redundante Daten herausstellen. So wird beispielsweise der Platzbedarf eines Codes in Beziehung zu seinem Informationsgehalt gesetzt. Die unterschiedliche Codelänge steht im umgekehrten Verhältnis zur Informationsdichte bei gegebener Informationsmenge (geringe Codelänge bedeutet hohe Informationsdichte, große Codelänge entspricht geringer Informationsdichte). Dieser Sachverhalt ist besonders bei Speichermedien verbreitet. Im Fall der Wissensrepräsentation innerhalb der Feature-Technologie wird die Informationsdichte als Maß definiert, das es möglich macht, die Art und Weise der Informationsspeicherung zu bewerten. Der Begriff der Informationsdichte dient daher als Qualitätskennzahl für informationstechnische Systeme, da Informationen über ein Medium transferiert werden. Das Medium der Informationsübertragung ist in der Produktentwicklung jedoch nicht

physikalischer Art und kann daher nicht über einen Raum oder eine Fläche definiert werden. Als Maß eignet sich die Anzahl der Elemente, die benötigt werden, um Informationen und Wissen zu speichern und zu übertragen. An dieser Stelle sei jedoch darauf hingewiesen, dass der Aufwand mit den Zielen vereinbar sein muss. Falls beispielsweise eine Längeninformati- on benötigt wird und diese als eigenständiges Element verwendet werden soll, ist es ungünstig, diese Information in Form eines Features integrieren zu wollen, da ein Feature einen Geometriebezug benötigt, um instanziiert zu werden. Daher würde man Aufwand generieren, der nicht zielführend ist und sogar zusätzlich eine Datenbelastung für das Modell darstellt. Natürlich ist nicht lediglich die Kompaktheit eines Barcodes von Belang, sondern auch dessen Lesesicherheit, die mit abnehmender Informationsdichte in der Regel zunimmt. Ein ähnlicher Bedarf besteht auch in der Wissens- und Informationsdarstellung in der technischen Produktionsplanung. Es ist wichtig, die Daten kompakt und vollständig zur Verfügung zu stellen, um einerseits Redundanzen zu vermeiden und andererseits die Informationsqualität zu verbessern, um alle Planungsaspekte berücksichtigen zu können. Daher wird die Informationsdichte der Wissensrepräsentation in CAD-Systemen bewertet, um eine Entscheidungsunterstützung bei der Wissens-Übertragung und -Speicherung zu erzielen.

2.4.7 Richtlinien für die Verwendung parametrischer und Feature-basierter 3D-CAD-Modelle

Mit einer durchgängigen Parametrisierung eines Produktmodells steigt dessen Komplexität. So können Modelle mit einer großen Anzahl an Bauteilen, welche komplexe Strukturen aufweisen und aus mehreren hundert Parametern bestehen. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, dass vor Beginn der Konstruktion die Vergabe der Parameter und deren Verknüpfungen geplant werden. Bei der Modellerstellung sollten auch mögliche Änderungen berücksichtigt werden, welches das eigentliche Ziel der Parametrisierung ist. Der Planungsaufwand steigt weiter, wenn es sich bei dem Modell um eine vollparametrisierte Konstruktion handelt, daher sollten folgende Richtlinien aus VDI 2209 Berücksichtigung finden [VDI 2209]:

- Bei der Parametrisierung sollten möglichst wenig Führungsparameter vereinbart werden, um eine Übersichtlichkeit zu gewährleisten.
- Über die Namensgebung der Features soll eine sinnvolle Beziehung zu den Parametern hergestellt werden.
- Parametrische Modelle sollten bestenfalls zusätzlich einer Dokumentation unterliegen, um die Parametervergabe zu erläutern und die Beziehungen zwischen den Parametern zu erklären. Außerdem ist man heutzutage dazu angehalten, aufgrund von Produkthaftungspflichten eine durchgängige Dokumentation zu erstellen. Werden diese Dokumentationen außerhalb des CAD-Systems abgelegt, so ist die Sorgfaltspflicht erfüllt.

- Neben der eigentlichen Dokumentation der Parameter und Beziehungen ist es anzustreben, die Vorgehensweise bei der Modellierung festzuhalten. Von Interesse sind vor allem die Begründungen für Entscheidungen, wenn andere Alternativen zur Verfügung stehen.

3 Prozessentwicklung in der integrierten Produktentstehung

Wie aus der Einleitung der Arbeit hervorgeht, liegt das Hauptaugenmerk auf einer Optimierung und Beschleunigung des Produktentstehungsprozesses. In diesem Kapitel werden bestehende Konzepte zur Parallelisierung der Produktentstehung analysiert und Grundlagen der Produktionsplanung gegeben, die auf einer effizienten Gestaltung des Prozessmanagements basieren.

3.1 Prozessmanagement

Unter Prozessmanagement (PM) versteht man planerische und organisatorische sowie steuernde Maßnahmen mit dem Ziel der Prozessoptimierung. Grundlage des PM und damit auch der Konzeption und Realisierung prozessorientierter integrierter Informationssysteme ist die Prozessmodellierung.

Ein Unternehmen lässt sich als ein System von Prozessen darstellen, das eine Vielfalt von Beziehungen zwischen internen und externen Kunden und Lieferanten enthält. Damit die Wettbewerbsfähigkeit erhalten und eine integrierte Produktentwicklung und Prozessplanung möglich wird, müssen Prozesse folgende Anforderungen gewährleisten:

- effektiv sein, d.h. die vorgegebenen Ziele und Aufgaben müssen erfüllt werden, wobei der Grad der Erfüllung an der Übereinstimmung mit den Anforderungen gemessen wird,
- effizient sein, d.h. sie müssen die gestellten Aufgaben mit einem Minimum an Aufwand erfüllen,
- kontrollierbar und steuerbar sein, d.h. die für die Prozesse verantwortlichen Personen müssen zu jeder Zeit den Zustand des Prozesses kennen und in der Lage sein, korrektive Maßnahmen einzuleiten, sollte diese erforderlich sein,
- anpassungsfähig sein, d.h. auf eventuelle Veränderungen in der Prozessumgebung muss reagiert werden können, bevor eine nachhaltige Wirkung auf das Geschäftsergebnis eintritt.

3.2 Integrierte Produktentwicklung

Allgemein besteht die Forderung, dass durch neue Methoden innerhalb des Produktentstehungsprozesses die Produktentwicklungszeit verringert [BuWa90], die Produkt- und Prozesskosten reduziert [Nobl93] und die Qualität gesteigert werden sollen [SaRF93]. Dazu ist es

notwendig, den Produktentstehungsprozess und das Zusammenwirken aller Unternehmensebenen neu zu organisieren. Seit den letzten 12 Jahren ist Concurrent Engineering zu einem wichtigen Thema in der Produktentstehung geworden. Ansätze wie Computer Integrated Manufacturing (CIM) [HiAc97] oder Lean Production [WoJR92], die bedeutende Änderungen in der Produktionstechnik und der Unternehmensorganisation herbeiführten, bilden die Eckpfeiler des Concurrent Engineerings. In den vergangenen Jahren sind sehr viele Definitionen von Concurrent Engineering (CE) entstanden, wobei diese Vielfalt als Stärke oder auch als Schwäche interpretiert werden kann. Als Stärke könnte man vermerken, dass eine Vielzahl von Ansätzen vereint wird, wohingegen man als Schwäche anbringen könnte, dass kein einheitliches Verständnis für CE existiert. So definiert Canty CE als Philosophie und Umgebung gleichzeitig [Cant87]. Die Philosophie ist auch Definitionsinhalt in den Beschreibungen von Jo et al. [JoPS93]. Als eigentliche Definition hat sich jedoch die von Pennell und Winner als die meist angewendete herausgestellt.

„Concurrent Engineering is a systematic approach to the integrated, concurrent design of products and their related processes, including manufacture and support. This approach is intended to cause the developers, from the outset, to consider all elements of the product life cycle from conception through disposal, including quality, cost, schedule, and user requirements.“ [PeWi89]

Pennell und Winner benutzen jedoch das zu definierende Wort in der Definition selbst und beschreiben deshalb nicht, was Concurrent Engineering eigentlich ausmacht. Um Concurrent Engineering zu definieren, bedarf es lediglich einer Beschreibung, was unter concurrent in Bezug auf den Produktentstehungsprozess zu verstehen ist. Webster beschreibt den Begriff als „occurring side by side“ und als „acting in cooperation“. Diese beiden Aspekte können als Parallelität und Kooperation verstanden werden und beschreiben ebenfalls nach Weber [Webe99] die wichtigsten Aspekte des CE. Neben dem Begriff der CE wird in der Literatur auch der Ausdruck des Simultaneous Engineering verwendet.

Simultaneous Engineering, übersetzt etwa "Gleichzeitige Entwicklung", bezeichnet eine Vorgehensweise in der technischen Entwicklung. Damit sollen die Entwicklungszeit eines neuen Produktes verkürzt, spätere Produktänderungen vermieden und die Abstimmung von Entwicklung und Produktion verbessert werden [BuWa90]. Dieser Ansatz kann mit der traditionell verwendeten „over the wall“-Methode in der Entwicklung nicht erfüllt werden, da sie eine sequentielle Vorgangsweise beschreibt, die alle Informationen weiterleitet, nachdem die Teilaufgaben eines Bereiches vollständig abgeschlossen sind. Man spricht daher bei der Methode von geistigen Mauern, über die die Informationen „geworfen“ werden müssen. Hierbei repräsentiert der Informationsfluss eine Einbahnstraße, da keine Feedback-Schleifen vorgese-

hen sind. Aus diesem Grund werden bei der „over the wall“ Methode eventuell auftretende Fehler erst sehr spät im Produktenstehungsprozess, oder sogar erst beim Kunden entdeckt. Kommunikation oder Abstimmungen der Abteilungen untereinander sind nicht verwirklicht. Jede Abteilung betrachtet die übertragenen Informationen als einen fixierten Stand.

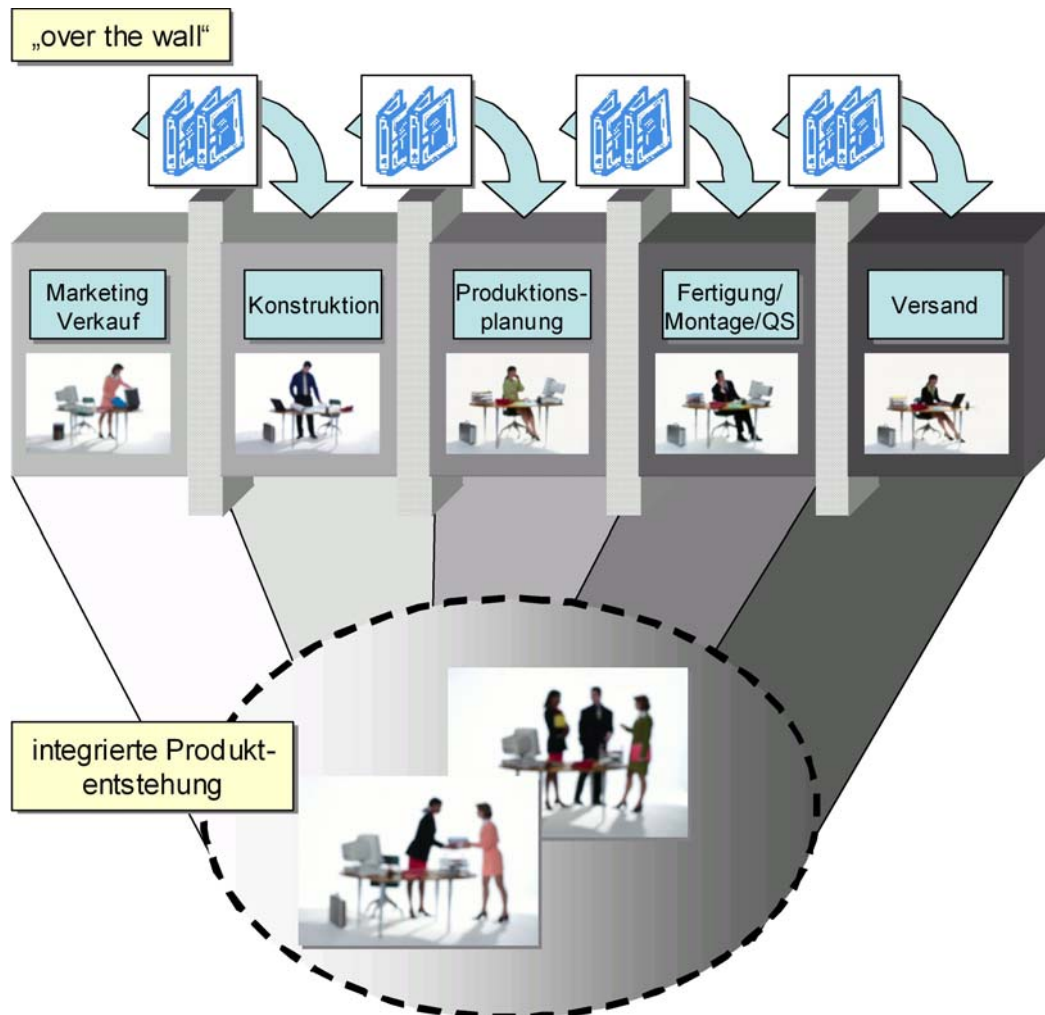


Abbildung 20: „over the wall“ zur integrierten Produktentstehung

Grundgedanke des Simultaneous Engineering im Entwicklungsprozess ist die zeitliche Überlappung von eigentlich aufeinander folgenden Arbeitsabläufen. Sobald in einem Arbeitsablauf genügend Informationen erarbeitet wurden, wird parallel der nächste Arbeitsablauf begonnen. Dies führt teilweise zu Mehrarbeit, da nicht mit dem endgültigen Informationsstand gearbeitet wird, sondern sich die Arbeitsgrundlage jederzeit ändern kann. Dafür können aber Fehler schneller erkannt und rechtzeitig beseitigt werden, bevor sie in einer späteren Phase große Kosten verursachen. Abbildung 21 zeigt den Effekt einer Verlagerung von Änderungen in die Konzeptphase. Durch einen integrierten Ansatz kann diese Verlagerung realisiert werden, wodurch eine parallele Produktentwicklung forciert wird und nicht nur einzelne Arbeitsbereiche zur Optimierung herangezogen werden.

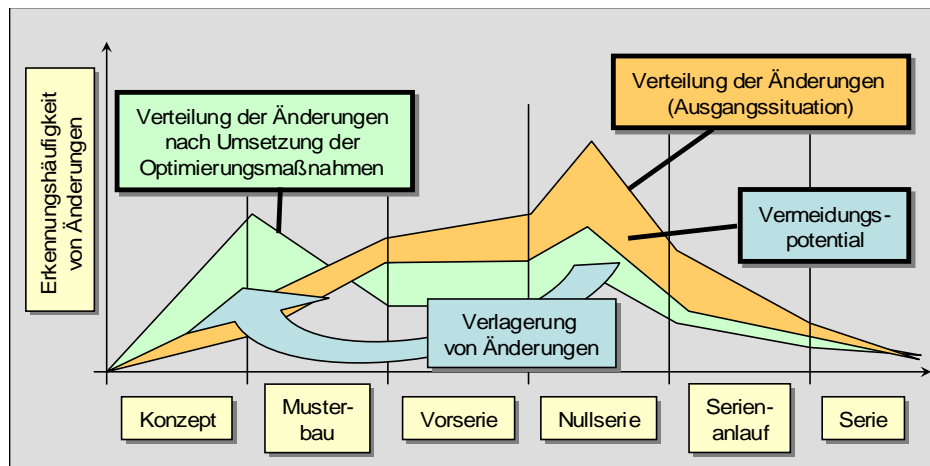


Abbildung 21: Vorverlagerung von Änderungen [LiRe98]

Im Rahmen von Optimierungsmaßnahmen sind die Einsparpotentiale der Einzelprozesse bereits weitestgehend ausgereizt und bieten daher nicht das Potential einer zeitlichen Überlappung der Prozesse. Um den Gedanken eines simultanen Entwicklungsprozesses durchzusetzen, müssen in einer ersten Phase die Abhängigkeitsbeziehungen der Prozesse festgestellt werden. Nach Eppinger [Eppi94] können Abhängigkeiten in drei verschiedene Klassen unterteilt werden:

1. einfache abhängige Aufgaben, die einen vollständigen Abschluss des Vorgängers erwarten → Sequentielles Vorgehen,
2. gegenseitige abhängige Aufgaben,
 - a. die einer Teilfreigabe unterliegen, können mittels intensiver Kommunikation und Absprache mit dem Vorgänger früher eingeleitet werden → Teilüberlappung,
 - b. die einer ständigen Kommunikation unterliegen und sich daher gegenseitig beeinflussen, können parallel bearbeitet werden → Vollständige Überlappungen,
3. unabhängige Aufgaben können ohnehin parallel bearbeitet werden → Vollständige Überlappungen.

Abbildung 22 zeigt die drei Klassen von Abhängigkeitsverhältnissen der Aufgaben und die sich daraus ergebenden Potentiale der Prozessüberlappungen mit deren Informationsflüssen. Basierend auf diesen Abhängigkeiten fordern Bullinger et al. [BuBW96], dass im Zuge des Simultaneous Engineering unabhängige Aufgaben vollständig parallelisiert werden, falls die Ressourcen zur Bearbeitung zur Verfügung stehen. Risse [Riss02] geht sogar soweit, dass mit der Kenntnis von Abhängigkeitsbeziehungen die Möglichkeit besteht, Vorabinformationen weiterzuleiten, die für den Start des Folgeprozesses und somit für die Prozessüberlappung als Grundvoraussetzung zu sehen sind.

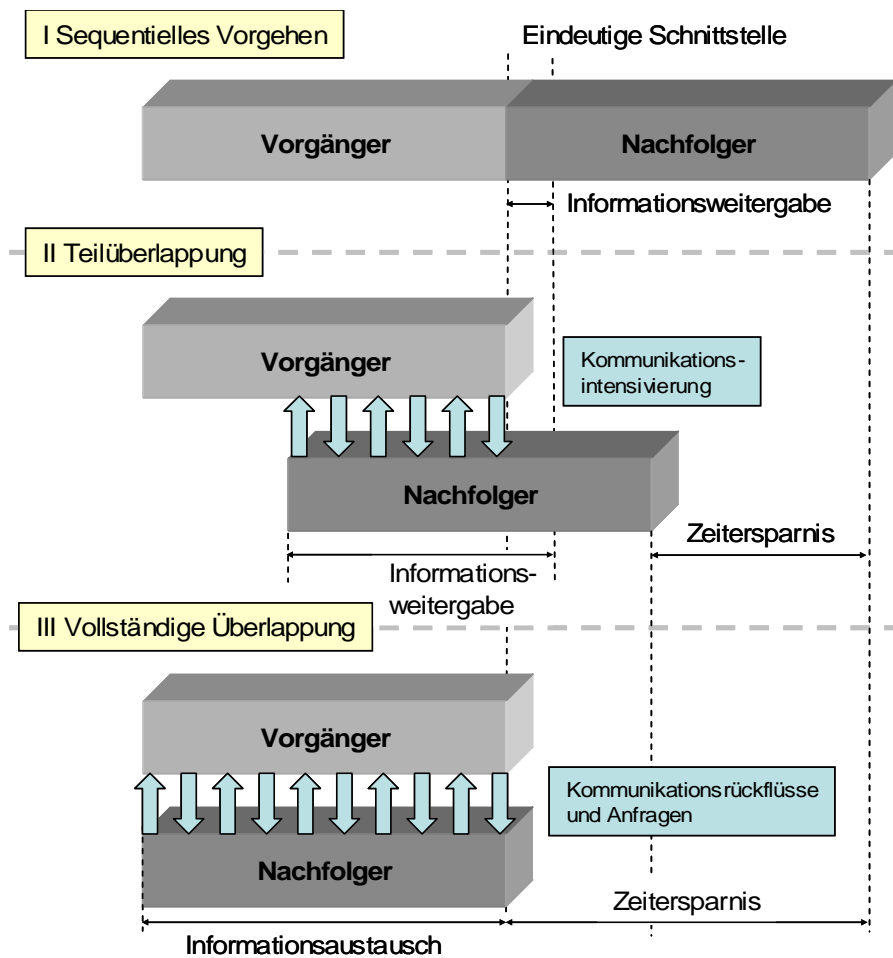


Abbildung 22: Vorgänger-Nachfolger-Beziehung verschiedener Strategien

Der Status der Daten wird über deren Freigabe bewertet. Bleicher [Blei97] charakterisiert Freigaben als stabile Informationen, die als Eingangsinformationen für Nachfolgeprozesse verwendet werden können. Durch Freigaben wird die Kontrolle und Steuerung des Produktentstehungsprozesses möglich, indem abgesicherte Ergebnisse den nachfolgenden Abteilungen zur Verfügung gestellt werden. Die Sollanforderung einer Freigabe ist die Einhaltung eines Standards und kann durch so genannte Quality Gates gehandhabt werden. Freigaben verlangen daher eine sehr genaue Vorarbeit, um der geforderten Reife und somit der Freigabe zu entsprechen. Oft werden Freigaben noch sehr streng behandelt und Daten vorab nicht weitergegeben. Teilfreigaben sind lediglich in DIN 6789 vorgesehen. Mit den heutigen starren Freigaben ist kein hoher Parallelisierungsgrad von Prozessen zu erzielen. Daher besteht das Bestreben, diese starren Strukturen zu verlassen und Wettbewerbsvorteile durch neue Methoden im Freigabemanagement zu erzielen. Nach Düching [Düec05] besteht das Ziel, Freigaben in mehreren Stufen zu vollziehen oder existierende Informationen und Dokumente vorab handhabbar zu machen, um einen kontinuierlichen Austausch von Entwicklungsergebnissen zu erzielen. Dieses Bestreben bildet daher die Grundlage stärkerer Parallelisierung der Aktivitäten im Produktentstehungsprozess. Besonders nutzbringend ist das Simultaneous Enginee-

ring zwischen den Arbeitsabläufen Produktentwicklung und Prozessentwicklung: Traditionell waren Produktentwicklung und Prozessentwicklung zwei streng getrennte, nacheinander folgende Schritte. Zuerst wird das neue Produkt konstruiert und komplett ausgearbeitet. Danach beginnt die eigentliche Planung der Produktionsanlagen, mit denen sich dieses Produkt herstellen lässt. Bei Anwendung von Simultaneous Engineering beginnt die Produktionsplanung bereits früher. Sobald Teile des Produktes fertig entwickelt oder auch nur vorläufige Versionen davon ausgearbeitet sind, wird damit begonnen, deren Produktion zu planen. Die Entwicklung läuft parallel dazu weiter. Während beide Abteilungen in ihrem jeweiligen Bereich weiterarbeiten, findet ein ständiger Informationsaustausch statt. Änderungen der Konstruktion müssen in die Planung der Betriebsmittel einfließen, damit alle Abteilungen einen aktuellen Stand der Produktentstehung vorliegen haben. Vorteil dieser Vorgehensweise ist die Zeitersparnis, da die Produktionsmittel bereits teilweise geplant sind, wenn das Produkt fertig entwickelt ist. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist aber das frühzeitige Aufdecken von konstruktionsbedingten Produktionsproblemen. Somit besteht bei einer simultanen Produktentstehung die Möglichkeit, Änderungen hervorzurufen, um einerseits die Produktion kostengünstiger zu gestalten und andererseits die Qualität der Produkte zu verbessern, indem die Produktion und das Produkt besser aufeinander abgestimmt sind. Durch eine permanente Vernetzung der involvierten Abteilungen werden Probleme oder Unstimmigkeiten früher entlarvt und können daher weitestgehend zu kostenunkritischen Zeitpunkten Änderungen hervorrufen. Diese Änderungen beziehen sich auf das Produkt oder den Produktionsprozess. Eine solche Herangehensweise ist vergleichbar mit einem Regelkreis in der Systemtheorie, wodurch kleine Änderungen der Führungsgröße mit eventuell minimalen Änderungen der Stellgröße behoben werden können. Handelt es sich aber wie beim klassischen Produktentstehungsprozess um einen sequentiell ablaufenden Prozess, so werden die Auswirkungen einzelner Planungsaktivitäten erst zu einem sehr späten Zeitpunkt erkannt. Kommt es dann immer noch zu einer Änderung, müssen eventuell alle zuvor durchgeführten Aktivitäten überarbeitet werden, wodurch erneut Kosten und Verzögerungen entstehen. Man kann natürlich nicht in allen Aspekten mit einem optimierten Idealprozess für Aktivitäten des Produktentstehungsprozesses rechnen, da diese Vorgehensweise auch beim integrierten Ansatz einen zu hohen Zeitaufwand und zusätzliche Kosten verursacht. Daher ist es das Ziel, ungünstige und kostenintensive Prozesse zu eliminieren, um als Unternehmen am Markt bestehen zu können. Die Ursachen zeitintensiver Prozesse oder schwer zu realisierender Bearbeitungen, die nicht überarbeitet werden, müssen jedoch dokumentiert werden, um einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess in der Produktentwicklung entstehen zu lassen und somit für ungünstige Merkmale auszuschließen. An dieser

Stelle sei jedoch darauf hingewiesen, dass Prozesse auch einem ständigen Verbesserungsprozess unterliegen und daher die Aussagen über kritische Merkmalsausprägungen hinsichtlich Neuerungen geprüft werden müssen. Durch eine starke Parallelisierung von Produktentwicklung und Prozessentwicklung können Auswirkungen von Änderungen für alle Bereiche schnell bewertet werden, wodurch der konservative Haltung von Unternehmen entgegen gewirkt werden kann, da kleine Änderungen meist nur mit geringen Kosten einhergehen. Diese geringen Kosten resultieren aus der Verknüpfung der Modelle der Abteilungen und der vorangetriebenen Methoden, die neuen Potentiale im Bereich der beschleunigten Produktentstehung erschließen lassen.

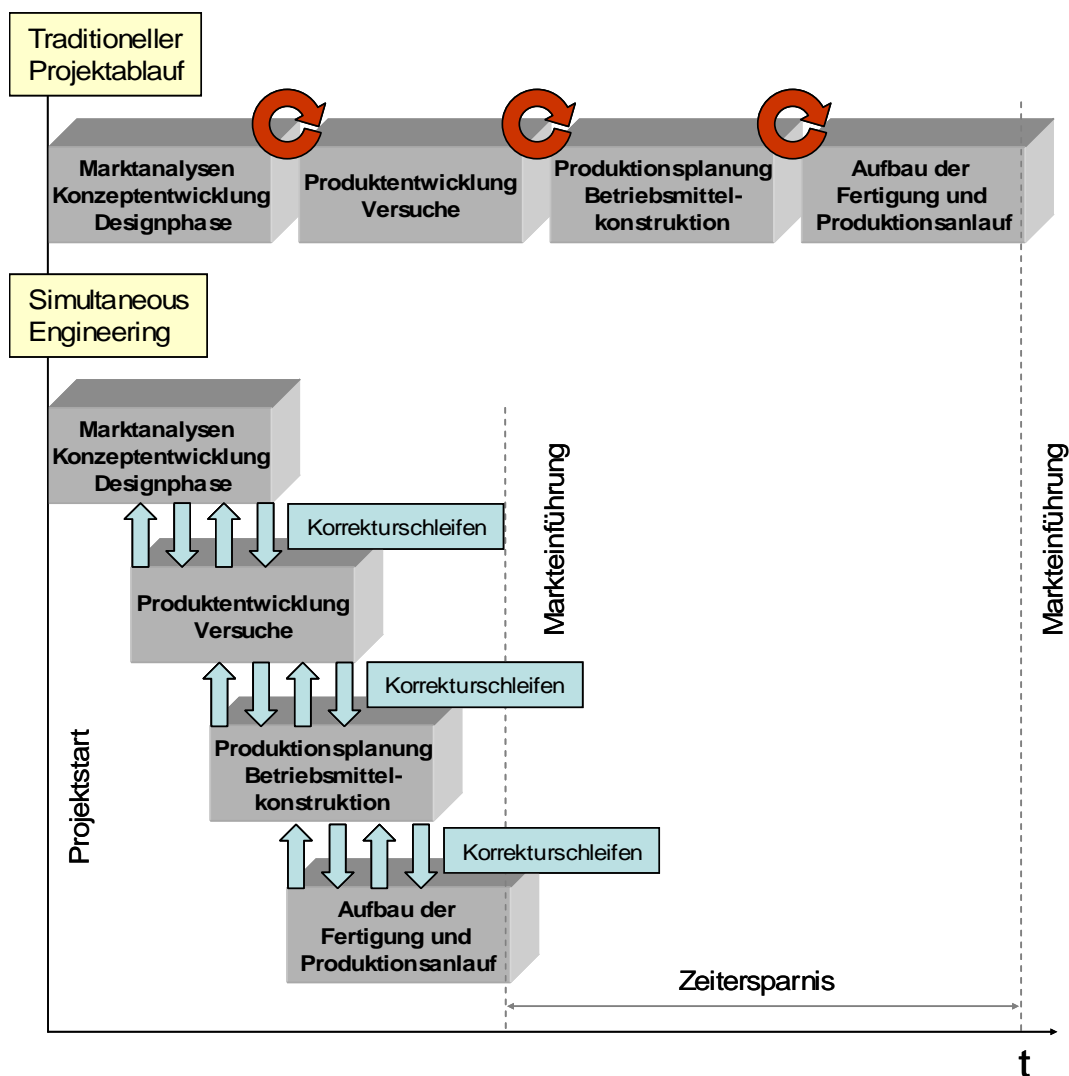


Abbildung 23: Zeitersparnis durch den Simultaneous Engineering Prozess

Je früher eine Konstruktionsänderung vorgenommen wird, desto weniger Kosten fallen in der Regel an. Der schlimmste Fall bei der traditionellen Vorgehensweise tritt ein, wenn das Produkt komplett konstruiert und geplant ist, sich aber nicht herstellen lässt. Dann muss der gesamte Produktentstehungsprozess erneut durchlaufen werden. Simultaneous Engineering hilft

dabei, wie in Abbildung 23 gezeigt, diese Änderungen durch Korrekturschleifen auf einen früheren Zeitpunkt zu verlagern.

Concurrent Engineering wird durch seine wichtigsten Ansätze beschrieben:

1. **Gemeinsame Ziele verfolgen:** Unter gemeinsamen Zielen werden ebenfalls Werte und Visionen verstanden, die die Basis eines Unternehmens bilden und das tägliche Handeln der Mitarbeiter und die zukünftige Richtung des Unternehmens entscheidend beeinflussen.
2. **Parallelität:** Eine Verkürzung der Produktentstehungszeit kann nur erreicht werden, indem entweder die einzelnen Aufgaben schneller erledigt werden oder Aufgaben zeitgleich ausgeführt werden. Parallele Bearbeitung einer oder mehrerer Aufgaben erfordert ein hohes Maß an Planung, da der Gesamtprozess beherrscht sein muss, um ihn in einzelne Teilaufgaben zerlegen zu können.
3. **Kundenorientierung:** Der Kunde ist das Maß aller Dinge, da er über das Bestehen eines Unternehmens bestimmt.
4. **Kontinuierliche Verbesserung:** Der CE-Prozess unterliegt immer wieder ähnlichen Abläufen, wodurch sich Verbesserungsmaßnahmen einleiten lassen. Heute ist es zwingend erforderlich den Entstehungsprozess ständig anzupassen und zu optimieren, um flexibel auf Marktveränderungen reagieren zu können und somit den Anforderungen des Marktes gerecht zu werden.
5. **Arbeit in interdisziplinären Teams:** Durch die Integration aller Abteilungen, sollen alle Aspekte der Produktentstehung Berücksichtigung finden. Daher arbeiten Mitarbeiter aus den Abteilungen Marketing und Vertrieb, Konstruktion und Entwicklung, Arbeitsvorbereitung, Fertigung und Montage, Kundendienst und Controlling gemeinsam, um Problem früher zu erkennen und eliminieren zu können.

Tabelle 5: Ergebnisse von Simulationswerkzeugen über die Produktentwicklung [MeSc03]

Prozessphase	Ergebnis von Simulationen und Tests
Konzeption	Analyse verschiedener Konzeptvarianten, Erkennen und Eliminieren konzeptioneller Schwächen, Visualisierung der Kinematik und Ermittlung von Bauteilkollisionen
Entwurf	Schnittstellen und Übertragungsglieder werden auf Schwachstellen untersucht. Technische Leistungsfähigkeit und Steifigkeit der Bauteile wird überprüft
Detaillierung	Funktionsabsicherung, Verifikationsrechnung der konstruierten Bauteile
Prototypenbau	Während das erste reale Produkt erstellt wird, wird das statische und dynamische Verhalten des Produktes simuliert
Erprobung	Messungen werden mit den Ergebnissen des dynamischen und des statischen Modellverhaltens verglichen
Überarbeitung	Eliminieren von Schwachstellen, Zusatzoptimierung aufgrund von Messergebnissen, Nachrechnen von Änderungen

Neben verbesserten Abläufen ist ein wesentlicher Bestandteil einer schnelleren und effizienteren Entwicklung der Einsatz moderner Simulationstools, die neue Einblicke ermöglichen und durch die Optimierungsansätze evaluiert werden können. Einsatzziele der Simulation in den verschiedenen Phasen der Produktentwicklung werden in Tabelle 5 angegeben.

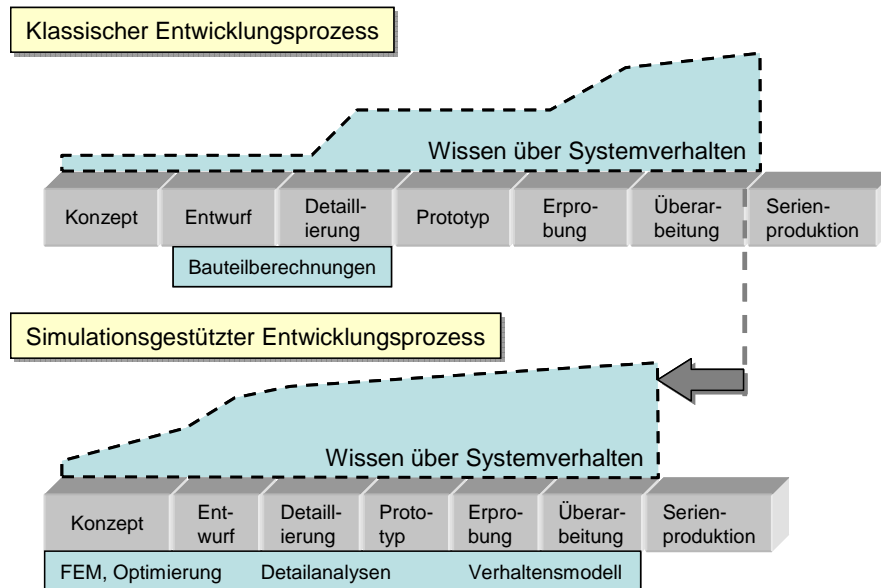


Abbildung 24: klassischer und simulationsgestützter Produktentwicklungsprozess [MeSc03]

Mit zunehmender Konkretisierung des Konzeptes werden die Berechnungsmodelle immer detaillierter, wodurch sie immer stärker das Endprodukt repräsentieren. Mit Einsatz von Simulation wird das Wissen über das Systemverhalten kontinuierlich zum Entwicklungsprozess aufgebaut, der allein aufgrund dieser Tatsache eine Verkürzung, wie in Abbildung 24 gezeigt, erfährt und sich ein höherer Reifegrad der Plandaten erzielen lässt [MeSc03]. Simulationsergebnisse und die Evaluierung der Ergebnisse sind Teil der Produktentstehung und dienen der Freigabe bestimmter Stadien der Produktentwicklung und der Prozessentstehung.

So kann man z.B. durch die Simulation der Produktionsabläufe und deren Steuerung Wissen erzeugen, indem unterschiedliche Einflüsse des Marktes auf die Absatzmengen eines Produktionssystems simuliert werden. Solche Szenarien werden jedoch nur dann simuliert, wenn sich der Aufwand der Simulationserstellung in Grenzen hält. Daher gibt es von Reinhart einen Ansatz zur automatischen Generierung eines Simulationsmodells, welches sich zur Durchführung von Experimenten eignet [ReSe02, Selk05].

3.3 Kritische Betrachtung von Simulationen

Simulationen unterstützen die Produkt- und Prozessentwicklung an vielen Stellen der Produktentstehung. Die große Gefahr besteht jedoch darin, alle Prozesse digital darstellen und

analysieren zu wollen. Simulationen dienen der besseren Veranschaulichung der Prozesse, bevor sie in die Realität umgesetzt werden. Heutzutage werden anhand der Simulationen Optimierungen vorgenommen und Prozesse in kleinste Einheiten zerlegt. Jedoch sollte der Einsatz der Simulation auf sinnvolle Aktivitäten beschränkt werden, da der Aufwand bei der Erstellung der Simulation sehr groß sein kann und somit die Kosten in keinem Verhältnis zum Nutzen stehen können. Daher sollte der Einsatz kritisch hinterfragt werden und zeitsparende statische Verfahren immer noch als Alternative berücksichtigt werden. Für den Einsatz von Simulationen sind dynamische Effekte von entscheidender Bedeutung, denn sie geben den Ausschlag für den Einsatz der Simulationsmethode.

Sind die dynamischen Einflüsse auf das Systemverhalten sehr groß, so lassen sich mit einem statischen Modell zwar Informationen gewinnen, die jedoch nur mit einer gewissen Unsicherheit auf das reale System zu übertragen sind. In diesem Fall ist es sinnvoll, den Aufwand für den Aufbau einer dynamischen Simulation zu betreiben, da die Ergebnisse das Systemverhalten besser oder annähernd genau widerspiegeln. Die Simulationsergebnisse müssen gemäß DIN 3633 durch Experimente mit dem Realsystem verglichen werden, um die Ergebnisse abzusichern.

Bei der Entscheidung für eine dynamische oder statische Abschätzung eines Problems ist es ebenfalls von enormer Bedeutung, wie die Daten weiter verwendet werden. So kann es trotz geringer dynamischer Einflüsse trotzdem sinnvoll sein, ein dynamisches Simulationsmodell zu erstellen, wenn diese Informationen für die Durchgängigkeit der Planung einen Vorteil darstellen. Die Durchgängigkeit wird unterstützt, indem die Modelle erweitert werden oder Informationen erzeugt werden, die für andere Anwendungen und Aufgaben einen Mehrwert bedeuten und somit den Produkt- oder Prozessreifegrad erhöhen.

3.4 Prozessplanung

Der Aufwand für die Prozessplanung und die Planung der Arbeitsabläufe ist im Laufe der Zeit durch die zunehmende Komplexität der Produkte und der Fertigungseinrichtungen gestiegen. So hat sich der Aspekt der Arbeitsvorbereitung, der in Arbeitsplanung und -steuerung unterteilt wird, auf den gesamten Herstellungsprozess ausgedehnt, um vor Inbetriebnahme Strukturen und Abläufe zu erstellen, die einen schnellen Produktionshochlauf gewährleisten. Der Planung von Produktionssystemen und Produktionsabläufen wird ein immer größerer Stellenwert zugesprochen, da sie einen bedeutenden Anteil an der Wirtschaftlichkeit produzierender Unternehmen hat. Planung wird definiert als gedankliche Vorwegnahme zukünftiger Ereignisse [Stie99]. Die geläufigste Differenzierung erfolgt über den Planungshorizont. Man

unterscheidet zwischen operativer, taktischer und strategischer Planung. Die strategische Planung legt die grundlegenden Ziele eines Unternehmens innerhalb eines Zeithorizontes von mehr als fünf Jahren fest. Die taktische Planung legt konkrete operative Ziele zur Erreichung der strategischen Ziele innerhalb eines Zeithorizontes von zwei bis fünf Jahren vor. Konkrete Ressourcen werden selektiert und Maßnahmen festgelegt. Die operative Planung betrachtet quantitativ die wertschöpfenden Prozesse bis zu einem Zeithorizont von 1 Jahr. Im Folgenden werden die Grundlagen der Fertigungs- und der Montageplanung aufgezeigt, da sie in Kombination mit der Ressourcenplanung die Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit darstellen.

3.4.1 Grundlagen der Fertigungsplanung

Fertigungsplanung kann allgemein als Planung von Prozessen und der damit verbundenen Erstellung von Arbeitsplänen (Ressourcenzuweisung, Taktzeitermittlung, Arbeitsanweisungen) zur Realisierung von Bauteilen und Materialeigenschaften bei vorgegebenem Ausgangszustand verstanden werden. Hierbei wird die Planung in der Regel in drei Planungsphasen unterteilt, beginnend mit der Konzeptplanung über Grobplanung bis hin zur Feinplanung. In der Konzeptplanung wird ein grobes Prozesskonzept erarbeitet, welches als Grundlage für die Detaillierung in den folgenden Phasen dient. Weiterhin wird in dieser ersten Planungsphase ein grobes Fertigungskonzept entworfen, welches eine frühe Kostenabschätzung erlaubt. Basierend auf den Ergebnissen der Konzeptplanung werden in der Grobplanung detaillierte Konzepte der Prozesse und Fertigungssysteme erstellt. Des Weiteren werden Betriebsmittel für die Fertigung geplant und Materialflusskonzepte erstellt. Aufgrund der erweiterten Definition des Fertigungssystems und der benötigten Prozesse sind genauere Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen möglich. In der Phase der Feinplanung können beispielsweise Kapazitätsbetrachtungen mit Hilfe von Simulationsmodellen definiert werden. In diesem Bereich werden Simulationsmodelle des Materialflusses und der Kinematik des Fertigungssystems erstellt und zur Optimierung herangezogen. Es werden die Produktions- und Investitionskosten validiert, um eine Vorkalkulation einzuleiten, die nach der Realisierung des Fertigungssystems abgeglichen werden kann.

3.4.2 Grundlagen der Montageplanung

Als Montieren wird der Zusammenbau von geometrisch bestimmten Objekten durch Füge-, Handhabungs-, Justage- und Kontrolloperationen bezeichnet. Die Aufgabe der Montagplanung bezieht sich auf die Schaffung der notwendigen Voraussetzung für eine wirtschaftliche Montagedurchführung sowie auf die Bedarfsermittlung und den gezielten und effizienten Ein-

satz von Personal und Betriebsmitteln. Montage wird definiert als Zusammenfügen oder Zusammensetzen hergestellter Einzelteile zu einer funktionsfähigen Einheit. Innerhalb der Montageplanung unterscheidet man Grob- und Feinplanung, wobei die Grobplanung die Aufgabe besitzt, ein Montagesystem zu entwickeln und einen groben Ablaufplan zu erstellen [Ever97]. Die Feinplanung wird unterteilt in die Konkretisierung des Montagesystems und eine detaillierten Ablaufplanung. Tabelle 6 zeigt den Zusammenhang der einzelnen Aufgaben der Montageplanung sowie deren benötigten Eingangsinformationen und die zu erzielenden Ergebnisse.

Tabelle 6: Aufgaben und Planungsphasen der Montageplanung

	Aufgabe	Eingangsinformationen	Ergebnis
Grobplanung	Montagesystementwicklung		
	<ul style="list-style-type: none"> • Arbeitssystem konzipieren • Systemstrukturen entwickeln • Kapazitäten planen 	<ul style="list-style-type: none"> • Montageaufgabe • Produktionsprogramm • Flächenmaße • Verkettungsprinzip 	<ul style="list-style-type: none"> • Montagestruktur • Groblayout • Kapazitätsbedarf
	<ul style="list-style-type: none"> • Erzeugnis strukturieren • Grob Ablauf planen 	<ul style="list-style-type: none"> • Stückliste • Zeichnungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Vorranggraph • Grob Ablaufstruktur
Feinplanung	Montagesystemkonkretisierung		
	<ul style="list-style-type: none"> • Prinziplösung ausplanen • Arbeitstationen planen • Verkettungsmittel planen 	<ul style="list-style-type: none"> • Stücklisten • Zeichnungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Feinlayout • Arbeitstationen • Verkettungsmittel
	<ul style="list-style-type: none"> • Montageinhalte festlegen • Montageplan und Montageunterlagen erstellen 	<ul style="list-style-type: none"> • Montagestruktur • Groblayout 	<ul style="list-style-type: none"> • Montageplan • Arbeitsanweisungen • Kalkulationsblatt

„Klassische“ Montageplanung: Die Zusammenbaufolge muss durch die Produktanalyse, insbesondere aus geometrischen Beziehungen der Bauteile in der Produktstruktur ermittelt werden. Hierbei wird das Produkt in Einzelteile zerlegt. In manchen Fällen kann die Zusammenbaufolge hinreichend durch die Fügefolge der Bauelemente charakterisiert werden.

Abbildung 25 zeigt den anteiligen Planungsaufwand in der Montage. Für die Bestimmung der Montagefolge zeigen Lotter und Schilling basierend auf den Daten von Nowak, dass 40% der Zeit der Planungsaktivitäten investiert werden, um die Reihenfolge der Komponenten beim Zusammenbau zu ermitteln [LoSc94, Nowa74]. In den letzten Jahren konnte eine gewisse

Aufwandsverschiebung durch einen verstärkten Rechneinsatz registriert werden. Der größte Aufwand liegt noch immer in der Ermittlung der Montagereihenfolge, wodurch diesem Aspekt in der Forschung besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird. Es gibt zahlreiche Ansätze, die beispielsweise basierend auf der Demontagefolge eine geeignete Montagefolge ermitteln lassen. [ELOM99, WoDu91, DuWo95, Lamb99]

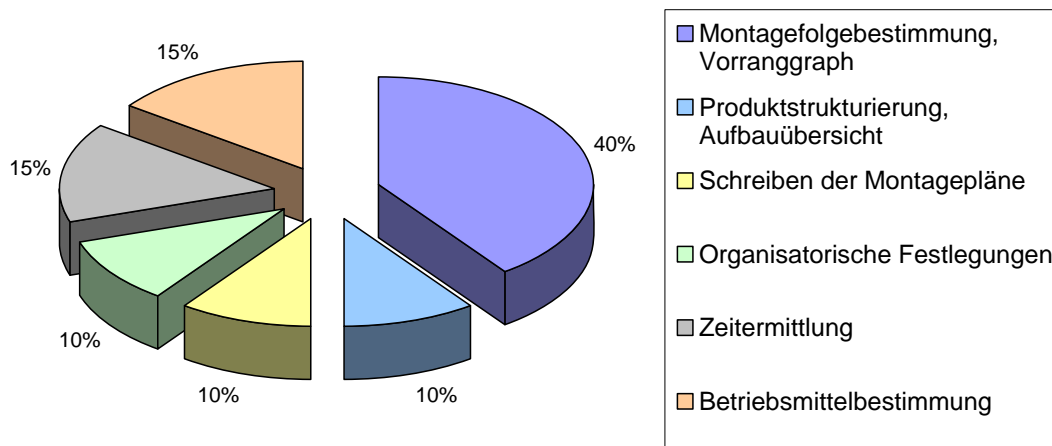


Abbildung 25: Planungs-aufwand in der Montage nach Nowak [Nowa74]

Ein Ergebnis der Montageplanung ist der Montagegraph, der mögliche Montagereihenfolgen in einem Netzplan darstellt. Dieses Netz kann auch als Baumstruktur verstanden werden, wobei die Einzelteile die Blätter bilden, innere Verzweigungen werden als Unterbaugruppen verstanden, die wiederum von komplexeren Verzweigungen aufgenommen werden und schließlich in der Wurzel, dem Basiselement, enden [DrCo95].

3.4.3 Ressourcenplanung

Ein weiterer Schritt in der Prozessplanung bildet die Ressourcenauswahl, da sie die Qualität der Produkte entscheidend beeinflusst. Hierbei muss besonderer Wert auf die Prozessfähigkeit der Ressource bei der Produktion gelegt werden. Die meisten Hersteller von Fertigungseinrichtungen geben aus werbetechnischen Zwecken die maximale Leistung ihrer Produktionseinrichtungen an. Die Merkmale der Ressource in Betriebsleistung sind jedoch nicht verfügbar, wodurch eine Ressourcenauswahl hinsichtlich eines Preis-Leistungs-Verhältnisses im Normalfall nicht möglich ist. Man kann ausschließlich Maximalwerte unterscheiden und zur Unterscheidung heranziehen.

Im Hinblick auf die Teilefertigung sind die von der Konstruktion geforderten Fertigungstoleranzen der entscheidende Faktor, wodurch die Ressourcen grob vorbestimmt werden. Aus Sicht einer wirtschaftlichen Produktion werden die Fertigungsfolgen bestimmt. Bei der Auswahl der Fertigungsverfahren sind jedoch die geplanten Stückzahlen von entscheidender Bedeutung, da sie den Ausschlag über die zu erzielende Taktzeit geben und somit direkt die

Herstellkosten beeinflussen [Ehr195]. Somit geben der Maschinenstundensatz und die erwartete Jahresstückzahl den Ausschlag für den Einsatz einer Fertigungstechnologie zur wirtschaftlichen Produktion. Komplexer wird diese Rechnung, wenn bestehende Fertigungslinien oder Systemkomponenten teilweise genutzt werden können, wodurch sich die Fixkosten aufteilen lassen. Das Ergebnis der Betrachtung ist die Definition der Stückzahlbereiche des Produktes, die die geringsten Stückkosten zur Folge haben.

Wird somit die wirtschaftlichste Fertigungstechnologie ausgewählt, hat man beispielsweise innerhalb der Zerspanungstechnologie die weitere Auswahl zwischen Drehen, Fräsen und Schleifen oder einer beliebigen Kombination der Verfahren zu treffen. So wird für die Herstellung einer Kurbelwelle mit sehr kleiner Stückzahl die Welle aus dem Vollen gedreht, wobei es sich bei der Drehbearbeitung um eine Schrupperoperation handelt, die im Anschluss durch eine Schleifbearbeitung an den Funktionsflächen endbearbeitet wird. Bei der Herstellung von Bauteilen gilt die Faustregel „So fein wie möglich und so genau wie nötig“, damit die Kosten im Rahmen bleiben. Die Auswahl der Fertigungstechnologie beruht meist ausschließlich auf dem Expertenwissen der Planer.

Ebenfalls kann es sein, dass aus wirtschaftlichen Gründen ein Halbzeug durch Gießen oder Schmieden hergestellt wird, welches auf Grund der Fertigungstoleranz der Funktionsbereiche anschließend zerspannt wird. Beispiele hierfür sind die Fertigung eines Pleuels und die Herstellung einer Kurbelwelle in der Automobilindustrie. Nach dem Schmieden der Grobgeometrie des Pleuels werden die Bohrungen spanend bearbeitet und aufgrund der vorgegebenen Fertigungstoleranzen zusätzlich einem Schleifprozess unterzogen.

4 Konzept zur Vernetzung von Produktentwicklung und Prozessentwicklung

Die Kopplung der Produktentwicklung mit der Prozessentwicklung ist eine Aufgabe, die innerhalb der rechnerunterstützten Produktentstehung vollzogen werden muss, um von der Bestellung des Produktes oder einer neuen Produktidee bis zu dessen Auslieferung digitale Modelle zu verwenden, die eine höhere Absicherung hinsichtlich Planung und Konstruktion versprechen.

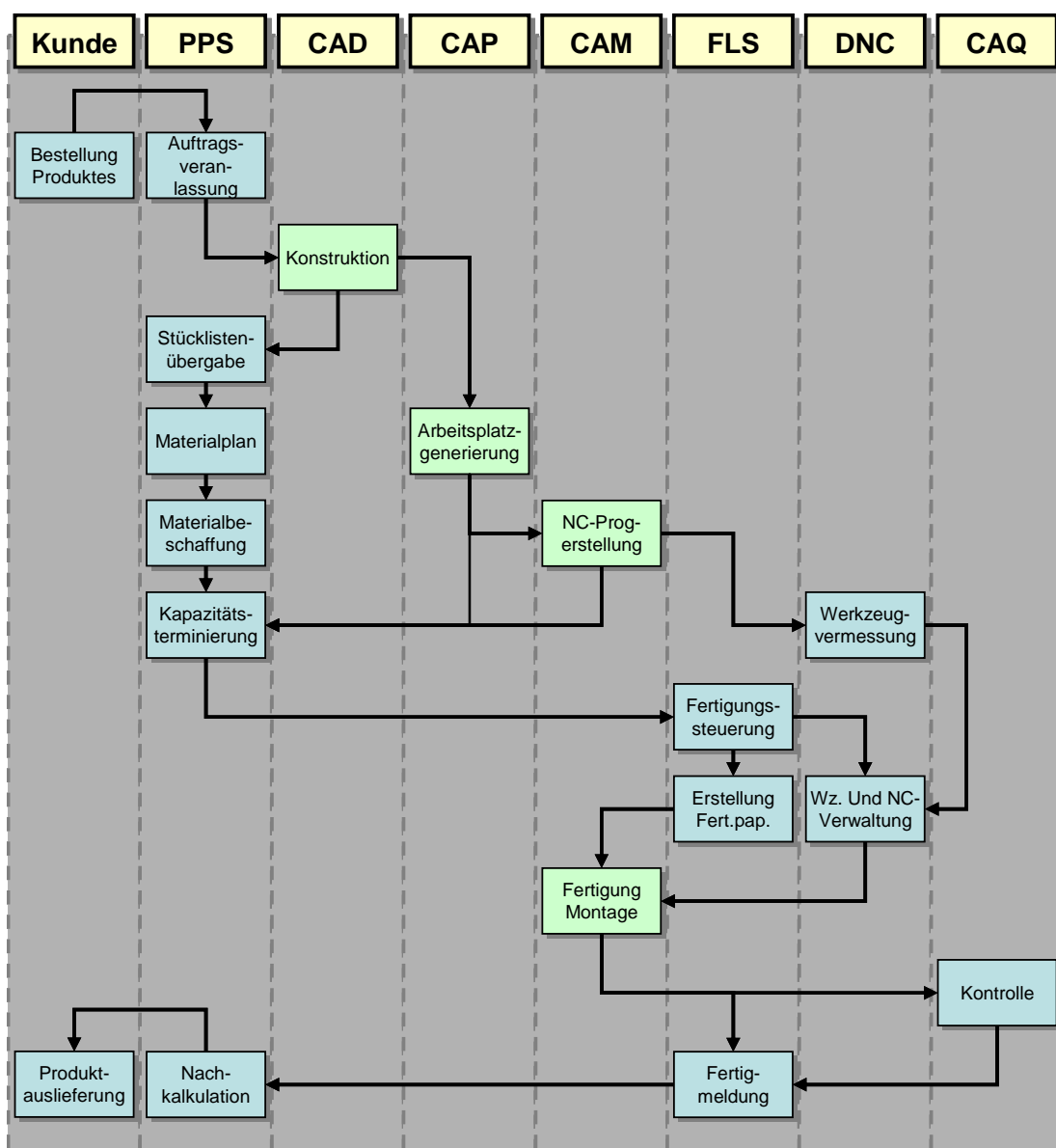


Abbildung 26: Rechnergestützter Auftragsdurchlauf

Abbildung 26 stellt einen rechnerunterstützten Auftragsdurchlauf und die Systeme vor, mit deren Hilfe die Aufgaben der Unternehmensbereiche bearbeitet werden. Die Aufgabengebiete

von CAD, CAP und CAM sind Fokus der vorliegenden Arbeit, da diese sich mit der digitalen Produktentstehung beschäftigen und das Zusammenspiel der CAx-Methoden im Rahmen der Digitalen Fabrik darstellen. Das Ziel ist es, Methoden zu entwickeln, die es ermöglichen, dass die Modelle und die damit verbundenen Daten der verschiedenen Abteilungen effizient transferiert werden können, wodurch eine integrierte Produktentstehung in Anlehnung an die Digitale Fabrik realisiert wird.

4.1 Konzeptübersicht

Damit zeitliche Vorteile erzielt werden können, versucht man, stärkere Parallelisierungen in den Bereichen Produktentwicklung und Produktionsplanung zu erzeugen, um den Ansprüchen immer schnellerer Produktwechsel zu genügen. Ansätze hierfür liefern Concurrent Engineering und Simultaneous Engineering, die versuchen, größtmögliche Überlappungen in den Phasen des Produktentstehungsprozesses zu erzeugen. Hierfür müssen die Arbeitssysteme der Produktentwicklung und der Prozessentwicklung analysiert werden, um die Aufgaben zu konkretisieren und die Ausgabe des einen Systems optimal auf den Eingang des anderen Systems abzustimmen. Dieser Effekt soll jedoch nicht durch einen bedeutenden Mehraufwand eines Arbeitssystems hervorgerufen werden. Ziel ist es, beide Arbeitssysteme zu entlasten und aufeinander abzustimmen, so dass ein reibungsfreier Workflow entsteht.

Die Feature-Technologie fungiert aufgrund der in Kapitel 2.4 aufgezeigten Potentiale als Schnittstelle zwischen Konstruktion und Produktionsplanung. Durch die Potentiale im Bereich der Datenintegration, der Datenspeicherung und der Datenwiedergabe können über Filtertechnologien verschiedene Sichten auf Modelle erstellt werden, was nach Bronsvort et. al. die Grundlage eines Simultaneous Engineering Prozesses bildet [BBDH97]. So wird beispielsweise die Darstellung des zu zerspanenden Volumens als Fertigungssicht bezeichnet, die sich aber auch auf andere Fertigungsverfahren transferieren lässt [KuGu01]. Als Sicht kann man die Aspekte verstehen, die mit einer Aufgabe in der Produktentstehung verbunden sind. Daher werden in der Montageplanung die Informationen der interagierenden Geometriebereiche als Montagesicht ausgewiesen. In der Literatur werden auch Ansätze beschrieben, die sowohl eine Fertigungssicht als auch eine Montagesicht ermöglichen, da sie dem DFMA-Ansatz zuzuordnen sind [NoBr99]. So wird von Bronsvort et. al ein Featurekonzept beschrieben, das Fertigungsabschnittmodelle zeigt und eine Montagesicht auf die Produktstruktur zulässt, wobei die Verbindungen zwischen den Geometrieelementen als zusätzliche Features integriert werden müssen [BBDH97, BKNB02]. Die unterschiedlichen Sichten auf das Produktmodell ermöglichen einen verbesserten Informationsaustausch und einen Wissenszu-

wachs, der die Basis eines schnellen Produktionsanlaufs darstellt. Es müssen, wie in den vorigen Kapiteln beschrieben, Meilensteine definiert werden, durch die der Informationstransfer strukturiert wird.

Basierend auf Meilensteinen oder Gates, die im Laufe der Produktentstehung passiert werden müssen, sind verschiedene Konzepte zur Absicherung der Konstruktion und der Produktionsplanung erarbeitet worden. Cooper und Kleinschmidt haben in den achtziger Jahren das Modell des „Stage-Gate-Process“ entwickelt, um die Prozesssicherheit zu gewährleisten [KlGC96, Coop02]. Hierbei wird der Innovationsprozess ganzheitlich vor dem Hintergrund der Prozessabwicklung im Unternehmen betrachtet. Scharer benutzt ein Modell, das sich in vier Module gliedert: Die Modellierung des Produktentstehungsprozesses, die Zielplanung und Zielmessung von Prozessen, die Absicherung der Ziele durch einen Risikomanagementprozess und die Überprüfung an Quality Gates. Die vier Module werden auf jede Phase und jeden Detaillierungsgrad des Produktentstehungsprozesses angewendet. 1994 wurde durch die drei großen Automobilhersteller (Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation) in Zusammenarbeit mit der Automotive Interest Action Group (AIAG) die Richtlinie für das so genannte Advanced Product Quality Planning (APQP) eingeführt.

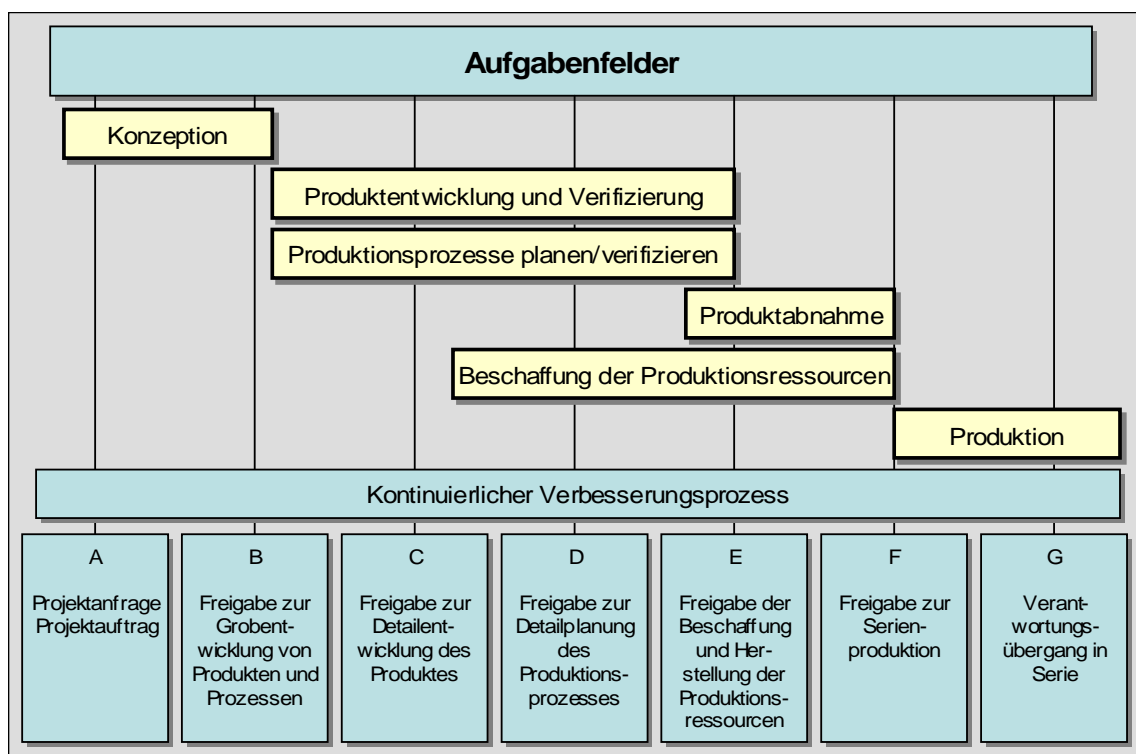


Abbildung 27: Ablaufplan der Produktentwicklung in der Automobilindustrie nach VDA [VDA-4.3]

Ziel ist es, Zertifizierungen, Vereinheitlichungen und Checklisten zu etablieren und für den Prozess des Simultaneous Engineering zur Verfügung zu stellen. Angaben zur Steuerung der

parallel erzeugten Ergebnisse fehlen allerdings. Im Qualitätsmanagement der Automobilindustrie wird eine zeitliche Abfolge der Produktentstehung aufgezeigt, die grob in sieben Meilensteine unterteilt ist.

Über diese Meilensteine werden Inhalte für Reifegrade definiert, um den Produktentstehungsprozess zu strukturieren und abzusichern. Abbildung 27 zeigt in Anlehnung an die VDA „Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz“ Meilensteine von A bis G über den Ablauf der Produktentstehung verteilt. Rechnergestützte Methoden sowie spezialisierte Softwareprodukte für Konstruktion und Planung ermöglichen einen schnelleren Informationsgewinn, wodurch die zur Freigabe benötigten Reifegrade schneller erreicht werden.

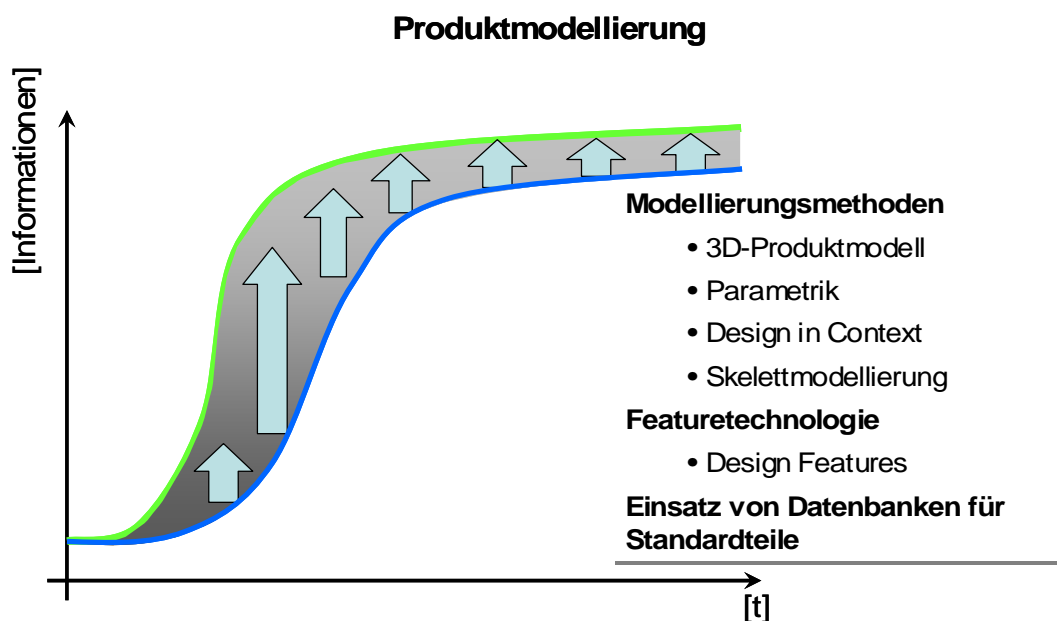


Abbildung 28: Veränderter Informationsgewinn bei der Produktmodellierung

Abbildung 28 zeigt diesen schnelleren Informationsgewinn in der Produktmodellierung, der mittels neuer Modellierungsmethoden und dem Einsatz der Feature-Technologie unter der Verwendung von Wissensmanagement in Form von Datenbanken erreicht werden kann. Die dreidimensionale Modellierung der Produkte sowie der Einsatz von parametrischen Modellierungsansätzen haben einen entscheidenden Schritt in der CAD-Technik gemacht, wodurch eine Effektivitätssteigerung der Produktmodellierung und der damit verbundenen Produktentwicklung erreicht wurde [CuFR96, Webe96, BāHa01, VDI 2218].

Ebenfalls haben sich weitere Modellierungsmethoden durchgesetzt, die eine schnellere digitale Produkterstellung ermöglichen. So kann durch die Modellierungsmethode „Design in Context“ der Positionierungsaufwand beim Zusammenbau des Produktes minimiert werden, da die Produkte in Bauteillage modelliert werden und ein Bezug zu bestehender Bauteilgeometrie hergestellt werden kann. Die Verwendung von Feature-Elementen beschleunigt den Pro-

zess der Modellierung, da Routinetätigkeiten oder Standardelemente durch das Einbringen eines Features durchgeführt werden können. Einen weiteren Vorteil bilden heute Datenbanken von Standardbauteilen, die einerseits von den Lieferanten zur Verfügung gestellt werden oder andererseits von der eigenen Fertigung als Standardprodukte geliefert werden können. Durch den Einsatz von Datenbankelementen wird eine Standardisierung der Produkte vorgenommen, wodurch sich Synergieeffekte bei Bestellungen oder bei der Lagerung der Komponenten ergeben. Diese Synergieeffekte besitzen oftmals eine positive Reaktion auf die Preise der Zukaufteile, da bei größeren Bestellmengen Rabatte gewährt werden oder die eigene Produktion größere Lose herstellen kann, wodurch sich die Fixkosten der Fertigung auf eine größere Anzahl an Produkten verteilen.

Ein schnellerer Fortschritt im Informationsgewinn hat zur Folge, dass der Zeitpunkt zur Datenweitergabe ebenfalls früher eingeleitet werden kann. Daher ist der Informationsgewinn mit dem Reifegrad des Planungsabschnitts gleichzusetzen, wodurch die Freigabe und die Überführung in eine höhere Stufe (Reifegrad) schneller erreicht werden. So ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Aufgaben der Abteilungen aufeinander abgestimmt sind und die Information als höchstes Gut weiter gegeben wird. Geschieht dies nicht, so gibt es im Prozess des Informationsgewinns immer wieder Stillstandzeiten, die mit Verlusten von Marktanteilen gleich zu setzen sind. Diese Stillstandzeiten (Δt), in der kein Informationsfortschritt vollzogen wird, müssen minimiert werden, d.h. $\Delta t \rightarrow 0$, damit ein maximaler Zeitgewinn erzielt werden kann. Die Stagnation im Informationsfortschritt an den Übergängen der Abteilungen ist im Wesentlichen auf den Informationstransfer, die Informationsinterpretation und die Informationsintegration zurückzuführen. Die Forderung $\Delta t=0$ zu setzen ist jedoch nicht realistisch, da beispielsweise die Datenkonvertierung der Schnittstellendatei nicht eliminiert werden können, um sie für weitere Aktivitäten in Prozess- und Ressourcenplanung vorzubereiten. Der Informationsgewinn bei Planungsaktivitäten kann durch den Einsatz von Planungssoftware erzielt werden. In diesen Bereichen haben sich in den letzten Jahren große Fortschritte in der Softwareentwicklung vollzogen, die einen schnelleren digitalen Planungsprozess gewährleisten, der verkürzte Entwicklungszeiten und einen höheren Produktreifegrad hervorgerufen hat. Jedoch handelt es sich bei diesen Softwaretools oft um isolierte Insellösungen, die auf einen Problemfall spezialisiert sind und daher einen hohen Zeitaufwand für die Datenkonvertierung mit sich bringen, bis sie ihr eigentliches Potential ausspielen können. Die Planungsaktivitäten müssen ähnlich der Vorgehensweise des SMEDs (Single Minute of Die) beim Rüsten in verschiedene Aufgabenklassen unterteilt werden. Einerseits werden Aufgaben definiert, die unmittelbar aufeinander erfolgen müssen, andererseits können Aufgaben klassifiziert werden,

die bereits im Vorfeld unabhängig von anderen Aufgaben abgearbeitet werden können. Somit kann wie im Kapitel 3 beschrieben eine Parallelisierung der Prozesse hervorgerufen werden. Hierbei kann ein Zeitgewinn durch eine saubere Gliederung der Planungsaufgaben erzielt werden, indem der zeitkritische Weg ermittelt wird. Unter einem zeitkritischen Weg versteht man die prozessbedingte Zeit, die auf keinen Fall unterschritten werden kann, da zeitoptimiert geplant ist. Einen weiteren Vorteil kann man durch eine bessere Vorbereitung der Abteilungen auf ihre Aufgaben erzielen, indem die angesprochene Schnittstellendatei den Dateninput ermöglicht und somit der Konvertierungsaufwand minimiert wird.

Damit eine Parallelisierung erzielt wird, müssen die Aufgaben der Produkt- und Prozessentwicklung untergliedert werden, um Daten schon während der Bearbeitung zu transferieren. Der Konstruktionsprozess startet standardgemäß mit der Produktidee, geht dann über in die Entwicklung von Funktionsstrukturen, die Lösungsmuster darstellen. In einem weiteren Schritt werden diese Funktionsstrukturen in geometrische Elemente transformiert, die eine grobe Produktgeometrie repräsentieren.

Anhand verschiedener Funktionsstrukturen ist es bereits möglich, Planungsaktivitäten einzuleiten, die mit fortschreitendem Produktdetaillierungsgrad weitere Informationen erhalten. Anhand von Funktionsstrukturen lassen sich Prozesse für die Bereiche der Bauteilfertigung und der Montage ableiten. Darauf aufbauend ist es an dieser Stelle schon möglich, die Ressourcenauswahl einzuschränken und erste Fertigungskonzepte zu erstellen. Hierfür werden Feature-Elemente erarbeitet, die die Produktstruktur standardisieren und die Grundlage eines schnelleren Informationstransfers im Produktentstehungsprozess bilden. Fertigungssimulationen erhalten die benötigten Beziehungen und Parameter über die Bauteilcharakteristik. Den Simulationsmodellen der Fertigung werden in einem weiteren Schritt Ressourcen zugewiesen, die die funktionsgerechte Fertigung gewährleisten. Hierbei müssen die geforderten Toleranzen aus dem Produktmodell eingehalten werden, indem die Prozesse und Ressourcen prozessfähig sind. Eine Toleranzüberprüfung kann jedoch auch nachträglich erfolgen, sobald es der Detaillierungsgrad von Produkt- und Prozessstruktur erlauben.

Neben der Bauteilfertigung sollen die neuen Elemente ebenfalls die Montageplanung unterstützen, da die in ihnen verankerten Informationen ebenfalls Randbedingungen für die Montage darstellen und erste Planungen zulassen. So können beispielsweise die Fügeflächenmatrix, der Fügeflächengraph und erste Montagesimulationen automatisiert, wie in Abschnitt 4.7 beschrieben, erstellt werden. Damit der Zeitaufwand gering gehalten wird, sollen die Planungsaktivitäten und die damit einhergehenden Simulationsmodelle weitestgehend automatisiert erstellt werden, um einem Akzeptanzproblem entgegen zu wirken.

Viele Unternehmen scheuen sich davor, Aufwand zu generieren, der eventuell keinen Nutzen im Fortschritt des Produktreifegrades hervorbringt, und genau dieser Umstand hindert sie daran, einen wirklich parallelen Entwicklungsprozess zu verfolgen. Heute eingesetzte Methoden besitzen nur einen geringen Automatisierungsgrad, der diesen Aufwand minimieren würde, um auf diese Art und Weise das Risiko einer Zeitverschwendung zu eliminieren. Wie auch schon in der Einleitung erwähnt, müssen sich Unternehmen am Markt behaupten und daher auch die Kosten, die bei vermeidbarem Aufwand entstehen, auf ihre Produkte umlegen, um wirtschaftlich zu agieren. Angestrebtes Ziel müssen daher Methoden sein, die das Risiko dieses Aufwands minimieren und den Vorteil der schnelleren Produktentstehung verfolgen, indem Planungsaktivitäten früher eingeleitet und Routinetätigkeiten automatisiert unterstützt werden. Die Ergebnisse der IT-Tools müssen jedoch immer einen manuellen Zugriff erlauben, um sie zu validieren. Aufgrund eines hohen Implementierungsaufwands rechtfertigen sich die Kosten nur dann, wenn langwierige Routinetätigkeiten automatisiert unterstützt werden.

Durch eine solche Herangehensweise ist es möglich, den zuvor beschriebenen Vorteil eines schnelleren Informationsgewinns im Produktentstehungsprozess hervorzurufen, da Zeiten ohne Informationsgewinn minimiert werden und somit einen schnellen Produktionsbeginn zur Folge haben. Durch den Zeitgewinn im Produktentstehungsprozess ist den Unternehmen die Möglichkeit gegeben, die Produkte an DFX-Aspekte anzupassen, um eine bessere Qualität zu einem günstigeren Preis zu produzieren, ohne Marktanteile durch später platzierte Produkte zu verlieren.

Einerseits kann aufgrund der Integration von Regelkreisen, die durch die intensive Kommunikation hervorgerufen werden, davon ausgegangen werden, dass der Wissenszuwachs verlangsamt wird. Andererseits ist die Informationstiefe höher, da die einzelnen Prozesse besser aufeinander abgestimmt sind. Der zu entwickelnde Prozess unterliegt wie alle Tätigkeiten einer Lernkurve, daher werden anfängliche große Abstimmungsschwierigkeiten und aufwändige Regelkreise mit der Zeit immer geringeren Aufwand erzeugen, da die Konstruktion und die Prozessplanung die Folgen ihres Handels durch vorherige Produktentwicklungen besser abschätzen können. Dieses Wissen basiert auf einem ständigen Informationsaustausch zwischen den am Produktentstehungsprozess beteiligten Abteilungen. Abbildung 29 zeigt den Informationsgewinn in den einzelnen Phasen der Produktentstehung, der durch den Einsatz von Simulationswerkzeugen einen höheren Reifegrad der Information hervorruft. Grundsätzlich bildet der strukturierte Umgang mit Informationen und Daten die Möglichkeit eines einfachen Zugriffs sowie einer geordneten Ablage. Mit der Zeit stellen sich durch den Umgang

mit der Methode Lerneffekte ein, wodurch Reibungsverluste und Barrieren im Informationsaustausch weiter minimiert werden können. Neue Konzepte sind Ergebnisse kontinuierlicher Verbesserungsprozesse, die wiederum ihrerseits Verbesserungsprozessen unterliegen.

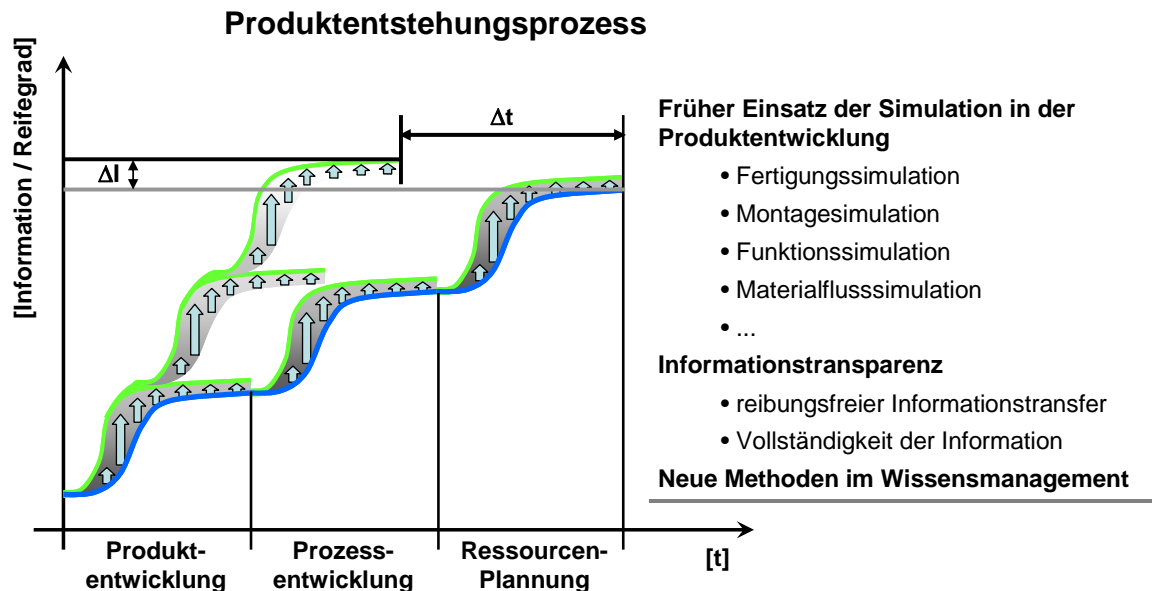


Abbildung 29: Informationsgehalt in der Produktentstehung

In Abbildung 29 ist zu erkennen, dass der Informationsgrad an den Abteilungsgrenzen eine längere Stillstandsphase erfährt. Dieser Stillstand ist auf den Informationstransfer, die Informationsinterpretation und die Informationsintegration zurück zu führen. Bei diesem Informationstransfer gehen oftmals Daten verloren, wodurch der Reifegrad oder Informationsgehalt leidet. Daher muss der Datentransfer reibungslos und unter einem möglichst geringen Informationsverlust vollzogen werden, um den in Abbildung 29 aufgezeigten Zeit- (Δt) und Informationsgewinn (ΔI) zu erzielen. Der frühe Einsatz von Simulationsmodellen in der Produktentstehung ermöglicht einen schnell wachsenden Reifegrad des Prozess- und Produktentwicklungsprozesses und ist daher als unverzichtbares Engineering-Werkzeug der Planer zu sehen [ACHK06]. Innerhalb der Produktmodellierung sind Funktionssimulationen zu nennen, die den Reifegrad aus Sicht der Konstruktion absichern. Zur Absicherung der Fertigung werden Fertigungs- und Montagesimulationen eingesetzt. Um Steuerungen zu evaluieren, haben sich Materialflusssimulationen manifestiert, die dynamisches Verhalten der Fertigungssysteme analysieren lassen. Die Modelle mit den Ergebnissen müssen wie auch schon bei der digitalen Produktmodellierung in geeigneter Form abgelegt werden.

Neben der reinen technischen oder planerischen Aufgabe müssen sich die Abteilungen mit sich häufig ändernden IT-Systemen auseinandersetzen, die auf den Einsatz neuer Tools oder auf unterschiedliche Versionsstände bestehender Softwaretools zurück zu führen sind. Bei

durchgängigen Softwarelösungen soll laut Hersteller ein reibungsfreier Informationsaustausch gewährleistet werden, da die Softwaremodule in der Lage sind, miteinander zu kommunizieren. Die Umsetzung dieser Anforderung ist selbst bei namenhaften Softwareherstellern immer noch nicht vollständig abgeschlossen. Man kann Aktivitäten der Softwarehersteller zur Lösung des Problems des Datenaustausches registrieren, die einen reibungsfreien Informationstransfer ermöglichen sollen. So werden beispielsweise gemeinsame Datenbankkonzepte erarbeitet, die ein teamorientiertes Arbeiten ermöglichen sollen, um den Forderungen der Softwarenutzer nachzukommen. Die größten Potentiale zur Beschleunigung des Produktentstehungsprozesses liegen in der Parallelisierung der Aufgaben. Hierbei wird das Konzept des verteilten Arbeitens innerhalb einer Abteilung vorausgesetzt, wie es schon für den Konstruktionsprozess beschrieben wurde. Ziel ist es nun, auch eine effektive abteilungsübergreifende Parallelisierung hervorrufen zu können. Hierzu müssen die Aufgaben in sinnvolle Aufgabepakete untergliedert werden, um zu bestimmten Zeiten aussagekräftige Daten transferieren zu können. Bei der Entwicklung von physikalischen Produkten bildet das Produktmodell den Ausgangspunkt der Prozessentwicklung. Daher muss bei der Definition des Produktmodells angesetzt werden, um eine möglichst große Überlappung von aufeinander folgenden Prozessen zu erzielen. Der Konstruktionsprozess kann wie in der VDI 2221 beschrieben in Funktionsmodellierung, Grobgestaltung und Detaillierungsmodellierung unterteilt werden. Nachdem das Funktionsmodell erstellt ist, kann ein Datentransfer, wie in Abbildung 30 angedeutet ist, zur Prozessentwicklung stattfinden, um Planungsaktivitäten zu einem früheren Zeitpunkt in der Produktentstehung einzuleiten.

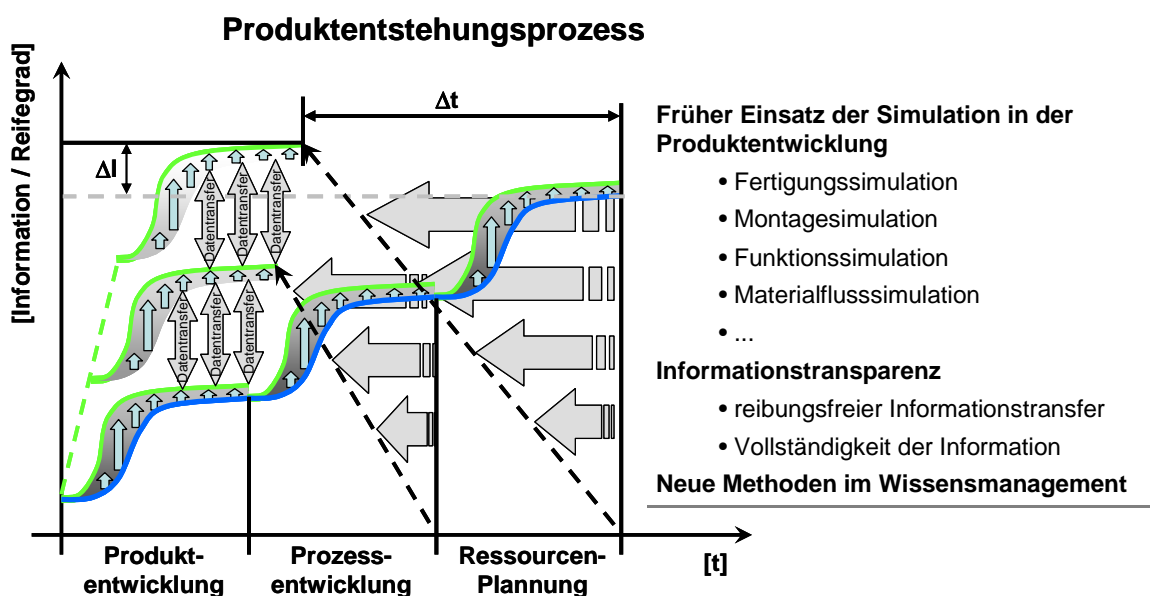


Abbildung 30: Informationszuwachs bei der Parallelisierung der der Produktentstehung

Nach der Erstellung der groben Produktgeometrie findet erneut ein Datentransfer statt, der einen höheren Reifegrad besitzt, wodurch die Planung nach der Integration der Daten ebenfalls einen höheren Reifegrad erreicht. Somit wird der Fertigungsplanung die Möglichkeit gegeben, frühzeitig das Modell hinsichtlich verschiedener Fertigungsaspekte zu untersuchen und Rücksprachen mit der Konstruktion zu halten, wodurch der Reifegrad des Produktentstehungsprozesses steigt. Damit Daten in geeigneter Form transferiert werden, müssen diese in digitaler Form vorhanden sein, wodurch die Forderung nach einer neuen Modellierungstechnik für das Funktionsmodell eines Produktes entsteht. Hierbei soll für die Konstruktionsabteilung kein zusätzlicher Aufwand erzeugt werden, um einem Akzeptanzproblem entgegen zu wirken. Neben einer frühzeitigen Interaktion aller Abteilungen wird ein konsequenter Einsatz von Simulationssystemen gefordert, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen und bessere Einblicke in Prozesse und Prozessabläufe zu erhalten.

4.2 5-Ebenen-Modell der Planung

Mit einer automatisierten Planung sollen verschiedene Produktionsalternativen der Bauteile analysiert werden, um Machbarkeitsaussagen treffen zu können und Produktionskosten zu vergleichen. Im besten Fall werden alle Fertigungstechnologien aus rein technischer Sicht untersucht und die Wirtschaftlichkeit der Produktion unberücksichtigt gelassen, um eine technische Bewertung zu erzielen. Für diese Art der Planung beschreibt ElMaraghy eine Klassifizierung der Prozessplanung in vier Stufen [ElMa06]:

1. Multi-Domain-Process Planning: bildet das höchste Planungslevel, in dem die Technologie zur Produktion der Bauteile und deren Geometriefeatures bestimmt werden. Auf dieser Ebene wird vor allem die Anzahl der zu produzierenden Einheiten berücksichtigt.
2. Macro-Process Planning: Auf dieser Ebene wird basierend auf der ausgewählten Fertigungstechnologie die beste Reihenfolge der einzelnen Fertigungsschritte ermittelt. Hierbei werden einerseits Prozesse zusammenfasst und andererseits eine optimale Reihenfolge der resultierenden Prozesse aufgrund eines genetischen Algorithmus erstellt.
3. Micro-Process Planning: Einzelne Prozessoperationen werden hinsichtlich ihrer Fertigungsparameter detailliert. So werden beispielsweise der Vorschub, die Schnitttiefe und die Werkzeuge des Zerspanprozesses definiert.
4. Detailed-Process Planning: Auf dieser Ebene werden Prozessoperationen in Maschinsprache übersetzt, um diese an das Fertigungssystem weiter geben zu können. Diese Ebene kann aus Sicht der Planung vernachlässigt werden, da es sich hier um die Schnittstelle zu realen Systemen handelt.

Bei dieser Art der Betrachtung wird auf Macro- und Micro-Ebene implizit eine Ressourcenzuweisung getroffen. Die Ressourcenplanung sollte jedoch eine eigene Planungsebene erhalten, welche zwischen der Macro- und der Micro-Ebene platziert wird. Die Ressourcenplanung unterliegt einer ähnlichen Vielfalt, wie die der Prozessplanung, wodurch sie als eigenständige Planungsphase erhalten bleiben soll. Für die Ressourcenplanung stellen Shabaka und ElMaraghy ein Konzept vor, in dem Features des Produktmodells mit einer Anforderungsliste an Maschinenfähigkeiten verknüpft werden, wodurch Ressourcebeschreibungen abgeleitet und definiert werden [ShEl05, ShEl06]. Dieses Konzept wurde auf die Skelettmodelle der Produkt- und Prozessentwicklung übertragen, um eine Interaktion der Modelle zu gewährleisten und einen hohen Grad an Automatisierung zu erzielen.

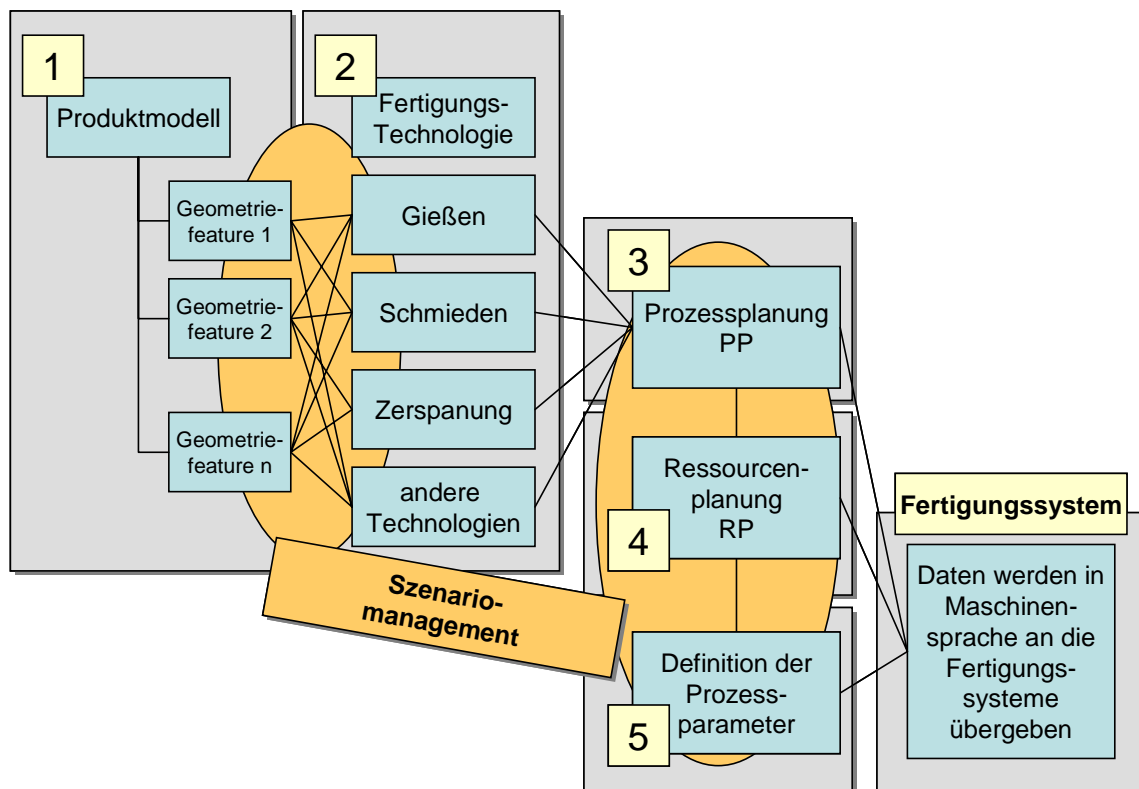


Abbildung 31: Planungsphasen der Fertigung

In Abbildung 31 wird daher eine Erweiterung des 4-Phasenmodells zu einem 5-Ebenen-Modell der Planung gezeigt. Basierend auf der Produktstruktur und den zu realisierenden Geometriefeatures werden unter Zuhilfenahme des Szenariomanagements unterschiedliche Fertigungsstrategien bewertet, die über eine Prozess- und Ressourcenplanung bis zur Definition der Prozessparameter Berücksichtigung finden. Ein Szenariomanagement, das alle fünf Planungsebenen enthalten soll, kann nur mit Rechnerunterstützung realisiert werden. Daher besteht als Hauptanforderung an das zu realisierende Konzept, diese Ebenen automatisiert zu

verknüpfen und somit die Prozessplanung zu unterstützen. Das Szenariomanagement wurde von Gausemeier entwickelt, um mögliche komplexe Zukunftsbilder zu erstellen, wodurch Handlungsstrategien als Reaktion auf Entwicklungen abgeleitet werden. Szenariomanagement erfolgt nach einem fünf Phasenmodell [GaFS96]. Die Aufgaben, die innerhalb der fünf Szenariophasen bearbeitet werden sollen sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: vereinfachte Darstellung des Phasenmodells des Szenariomanagements [GaFS96]

Szenariophase	Aufgaben
1. Szenario-Vorbereitung	Durch die Skelettelemente, die in Abschnitt 4.4 vorgestellt werden, wird eine Vernetzung zu Prozessen ermöglicht.
2. Szenariofeld-Analyse	Neben den Prozessen werden auch Ressourcervarianten abgebildet. Schlüsselfaktoren werden zusammengestellt.
3. Szenario-Prognostik	Zukunftsprojektionen werden für alle Schlüsselfaktoren erstellt (Kosten als der Hauptschlüsselfaktor).
4. Szenario-Bildung	Zukunftsräume und Rohszenarien werden erstellt.
5. Szenario-Transfer	Erarbeitete Szenarien werden evaluiert.

Die Anwendung der Szenariotechnik zur Auswahl geeigneter Fertigungsverfahren kann nur mit abteilungsübergreifenden Vernetzungen realisiert werden. Die Digitale Fabrik zeigt einen solchen Ansatz zur Vernetzung verschiedener rechnergestützter Arbeitsbereiche auf. Es gibt jedoch auch andere wissensbasierte Systeme, die verschiedene Konfigurationen analysieren, bevor eine finale Version des Fertigungssystems erstellt wird. Tönshoff und Schnülle beschreiben einen Ansatz, den sie mit Computer Aided Configuration (CAC) bezeichnen und der auf einem modularen Design-Konzept der Fertigungssysteme basiert [TöSc01].

4.3 Digitale Fabrik

Die zunehmende Komplexität der Planungstätigkeiten sowie die kontinuierliche Verkürzung der zur Verfügung stehenden Planungszeiten lässt sich nur noch durch den durchgängigen Einsatz moderner IT-Technologie bewältigen [WeJR03, Wien02b]. Daher haben heute Unternehmen in allen Branchen und Unternehmensgrößen das Bestreben, moderne Methoden einzusetzen, um ihre Markstellung zu halten oder über die freigesetzten Potentiale zu wachsen. Aufgrund dieser Tatsache gibt es von wissenschaftlicher Seite zahlreiche Veröffentlichungen,

die sich mit neuen Methoden der Digitalen Fabrik beschäftigen und diese für alle Unternehmensgrößen attraktiv gestalten wollen [ZäPF03].

Ein wesentliches Ziel der Digitalen Fabrik besteht in der Überführung von Produkten, Produktionsprozessen und Produktionsanlagen in digitale Modelle, um diese im Rahmen eines Gesamtmodells zu vernetzen [BäHa03]. So wird die Digitale Fabrik als realitätsnahes Abbild der realen Produktionsstätte im Rechner verstanden [DoTB01, GeRe04, Marc04, Schr03, Siem02]. Die anfallenden Datenmengen gilt es zu beherrschen, indem sie intelligent und effizient von einem Datenmanagement verwaltet werden. Hierbei fallen besonders bei der Planung von Prozess- und Ressourcevarianten große Datenmengen an, die es mit Methoden und Konzepten zu beherrschen gilt [BlZe05]. Ein einheitliches Verständnis des Begriffs Digitale Fabrik versucht der VDI mit seiner Richtlinie 4499 zu schaffen.

„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u.a. der Simulation und 3D-Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.“ [VDI4499]

Unter dem Begriff Digitale Fabrik verstehen besonders die Automobilisten, die die Forschungsaktivitäten in diesem Umfeld prägten, als das vollständige Abbild der realen Prozesskette von Produktentwicklung, Planung und Produktion, mit dem Ziel, die Entwicklung von Produktionstechnologien als auch die Planung und Bewertung von Produktionsanlagen effizienter zu gestalten. [Brac02]. Das größte Problem hierbei besteht in der Schnittstellenproblematik und der damit erschwerten praktischen Umsetzung einer globalen und einheitlichen Datenbasis [AbSc04].

Mittel der Digitalen Fabrik ist hierbei eine einheitliche Datenbank, die einen gezielten Datenzugriff über den gesamten Produktlebenszyklus gewährleistet. Die digitalen Modelle im Rechner werden von der Produktidee bis zur Demontage der Anlagen genutzt. Die Produktionsplanung, die - wie aus der Definition der Digitalen Fabrik hervorgeht - den Fokus darstellt, besitzt drei wesentliche Vorteile:

1. Fabrikkonzepte werden besser und anschaulicher entwickelt und schneller umgesetzt,
2. Fertigungsverfahren können früher beurteilt und eingeführt werden,
3. der Produktreifegrad wird transparenter und erhöht so die Planungssicherheit.

Die Digitale Fabrik stellt somit das Bindeglied zwischen Produktentwicklung und Prozessentwicklung dar. Sie verknüpft die Produktdaten der Entwicklung mit den Planungsdaten und

stellt Werkzeuge zur Modellierung und Planung von Fertigungskonzepten sowie Simulationsmethoden zur Verfügung. Neben der Visualisierung wird zusätzlich der Planungsfortschritt dokumentiert, wodurch sich eine verbesserte Transparenz ergibt [Brac02, BIFW00]. Ein weiteres Ziel besteht in der Übertragung der Daten des digitalen Abbildes der Fabrik an das reale System, wodurch ein schnellerer Produktionsstart erreicht wird [KiBB06]. Die Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik bieten folgende Potentiale:

1. **Zeit:** Das virtuelle Konzipieren und Analysieren erfolgt in der digitalen Welt schneller als in der realen Welt. Die Digitale Fabrik unterstützt den Simultaneous Engineering-Prozess und verbessert die Zusammenarbeit von Entwicklung und Produktion sowie die Einbindung von Lieferanten. Planer werden von Routinetätigkeiten entlastet.
2. **Qualität:** Redundanzfreie und aktuelle Daten beschleunigen alle Abläufe und führen zu einer verbesserten Qualität von Produkten und Prozessen. Mittels virtueller Modelle lässt sich der Reifegrad eines Produkts oder eines Prozesses absichern sowie die Kundentauglichkeit sicherstellen.
3. **Kosten:** Digitale Absicherungen verursachen zunächst höhere Planungskosten. Durch die Reduzierung von Fehlern und einer besseren Dimensionierung werden die Mehrkosten wieder eingespart.
4. **Ramp-Up:** Aufgrund der zunehmenden Anzahl von Ramp-Ups in den letzten Jahren gewinnt der Potentialfaktor an Wichtigkeit. Mittels virtueller Modelle lässt sich auch der Produktionsanlauf absichern und schneller die Kammlinie erreichen. Aufgrund der schnelleren Inbetriebnahme wird ein schneller Return on Investment erreicht [GrBi05].

In Anlehnung an die Forderung der Digitalen Fabrik muss die Produktentwicklung mit der Prozessentwicklung in einem ersten Schritt verknüpft werden, um ausgehend von den Produktinformationen Prozesse zu initialisieren, die die Fertigung der Produkte gewährleisten. Daher besteht die Forderung nach einer Vernetzung von Produkt- und Fertigungsmodellen.

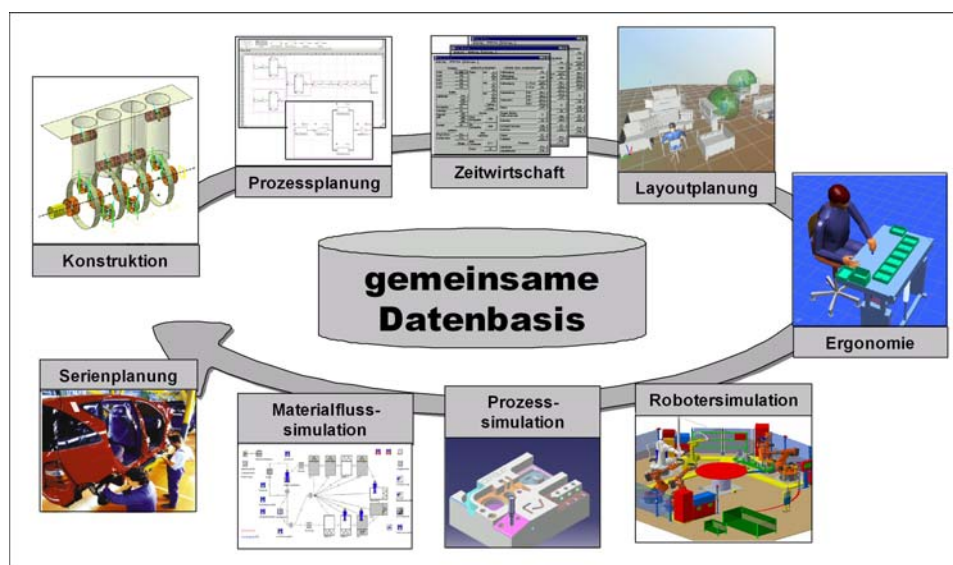


Abbildung 32: Einsatzgebiete der digitalen Fabrik [Zenn06, Linn02]

4.3.1 Virtual Reality, Virtuelle Fabrik

Der Begriff Virtual Reality ist ein Teilbereich der Virtuellen Fabrik oder der Virtuellen Produktion, die oft als Synonyme für die Digitale Fabrik verwendet werden. Jedoch sind nach Reinhart diese beiden Begriffe klar gegeneinander abzutrennen, da man unter Digitaler Fabrik nicht das Modell versteht, welches in der Lage ist, Aussagen über das Systemverhalten zu generieren, sondern vielmehr die Methoden und Softwaretools, durch dessen Hilfe das Modell erstellt werden kann [ReBF02].

Der Begriff „Virtuelle Realität“ bzw. „Virtual Reality (VR)“ bezeichnet die rechnergestützte Generierung eines möglichst perfekten Abbildes der realen oder fiktiven Umwelt [Henn97]. Grundlegende Voraussetzungen für VR-Techniken sind in erster Linie die dreidimensionalen Präsentationstechniken, die spezielle Ausrüstungen wie VR-Software, VR-Brillen, 3D-Leinwände (Caves) benötigen. Virtual Reality-Umgebungen können über ihre Visualisierungsmöglichkeiten zum Training von Bedienungs- und Wartungsaufgaben an komplexen Maschinen und Anlagen eingesetzt werden. Dazu sind die Geometriedaten für die realistische Visualisierung der Maschinen bzw. der Anlage sowie eine Vielzahl nicht sichtbarer Daten erforderlich. Unter nicht sichtbaren Daten sind Informationen zu verstehen, die das Verhalten der Maschine beschreiben oder die Reihenfolge bestimmter Wartungsschritte und anzuwendender Werkzeuge beinhalten. Mit der Komplexität des abzubildenden Anlagenverhaltens und der auszuführenden Trainingsschritte wächst jedoch auch die für ein Trainingsszenario zu verwaltende Informationsmenge. Insbesondere dann, wenn der Auszubildende Interaktionen vornehmen können soll, ist eine genaue Modellierung des Anlagenverhaltens von entscheidender Bedeutung.

Damit die Digitale Fabrik oder die Virtuelle Fabrik realisiert werden können, müssen die Arbeitssysteme der Konstruktion und der Produktionsplanung aufeinander abgestimmt werden, um den Datentransfer einer integrierten Produktentstehungsansatzes zu gewährleisten.

4.3.2 Arbeitssystem Konstruktion

Die Art und Weise der Modellierung ist entscheidend, um die Forderung an das zu entwickelnde Konzept umzusetzen, damit Informationen in geeigneter Form weitergeben werden können. Daher wird der Konstruktionsprozess in Teilprozesse untergliedert, zu denen Daten transferiert werden. Hierbei muss der Output der Konstruktion auf den Input der Produktionsplanung ausgerichtet werden, um der Forderung nach einem reibungsfreien Datentransfer innerhalb des Simultaneous Engineering nachzukommen. Neben dem Informationstransfer sollen auch Informationseingänge aus den verschiedenen Planungsabteilungen vorstrukturiert

werden, um eine Integration zu forcieren und Informationsrückflüsse zeitlich und organisatorisch vorzubereiten. Mit dem Inhalt des Informationsfeedbacks sollen nicht nur Änderungswünsche mitgeteilt werden, sondern auch Erläuterungen und Dokumentationen über Freigaben enthalten sein, um einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess zu erzielen.

4.3.3 Arbeitssystem Produktionsplanung

Mit dem Ziel, eine Kopplung von Produktentwicklung und Produktionsplanung zu realisieren, sind die Eingangsinformationen der Produktionsplanung derart zu gestalten, dass die Daten in brauchbarer Form vorliegen und einen Mehrwert für die Planungsabteilung darstellen. Neben einem veränderten Informationseingang ist es ebenso wichtig, die Werkzeug an die Aufgabe anzupassen, damit Daten und Informationen der Konstruktion mit einem minimalen Konvertierungsaufwand verarbeitet werden können. Weiteres Verbesserungspotential ist im Informationsmanagement zu sehen, da schon viele prozessrelevante Informationen in der Konstruktion festgelegt, jedoch nicht explizit an die Produktionsplanung weiter gegeben werden. Für diese Informationen muss eine geeignete Speicherstelle gefunden werden, auf die die Produktionsplanung zugreifen kann. Informationsmanagement ist ein enorm wichtiges Element geworden, da es die Geschwindigkeit der Produktentwicklung stark beeinflusst. Durch den Verlust von Informationen im Produktentstehungsprozess fallen Arbeiten an, diese Informationen zu rekonstruieren und in geeigneter Form dem anstehenden Arbeitsschritt zur Verfügung zu stellen. Daher müssen Konzepte und Methoden erstellt werden, die eine Durchgängigkeit der Informationen in alle Abteilungen gewährleisten, um einen schnellen Produktentwicklungsprozess entstehen zu lassen. Hierfür stellt sich die Frage nach einer geeigneten Schnittstelle, die für alle am Produktentstehungsprozess beteiligten Abteilungen zugänglich ist. Neben der Schnittstellenproblematik müssen auch Konzepte zur Speicherung dieser Daten erstellt werden, damit der Informationszugriff vollzogen werden kann. Die Integration von Feedbackschleifen oder Reviewprozessen ist als Grundvoraussetzung zu sehen, wodurch ein permanenter Dateneingang und -ausgang zu definierten Zeiten gewährleistet werden muss. Durch den ständigen Datenaustausch steigt auf der einen Seite die zu verarbeitende Datenmenge an, auf der anderen Seite kann jedoch auch von einem höheren Reifegrad in Konstruktion und Planung ausgegangen werden.

4.4 Skelettmodellierung mit Skelett- und Funktionselementen

Damit wie in der Konzeptbeschreibung erwähnt, die Planungsaktivitäten auf dem Funktionsmodell der Konstruktion aufbauen können, muss eine geeignete Form der Funktionsmodellie-

nung erarbeitet werden. Hierzu wird die Skelettmodellierung als Modellierungsprinzip ausgewählt, da es sich um eine grob vorstrukturierte Modellierungsmethode handelt und sich zur Platzierung neuer Elementen eignet. Das Prinzip der Modellierungsmethodik der Skelettmodelle bleibt weitestgehend erhalten. Ein Unterschied besteht in der Parameterübergabe, die nicht direkt im Modell praktiziert wird, sondern über eine externe Datei transferiert wird. Die Geometriereferenzen werden wie in Abschnitt Skelettmodellierung beschrieben behandelt. Die Skelettmodellierung unterliegt einer einheitlichen Herangehensweise, da Parameter und Referenzen von den oberen Hierarchieebenen in niedrigere Hierarchieebenen transferiert werden. Der eigentliche Modellaufbau und die Struktur der Komponenten unterliegen hierbei jedoch keinen festen Regeln. Aufgrund dieses Umstandes kann die Transparenz der Modelle verloren gehen, wodurch die eigentliche Stärke der Variantenmodellierung nicht entfaltet werden kann. Aufgrund dieser Schwäche müssen eindeutige Richtlinien für Modellierungsmethoden erstellt werden, die einem Benutzer, der nicht direkt in den Erstellungsprozess involviert war, die Möglichkeit bieten, das Modell zu modifizieren, indem er es an neue Rahmenbedingungen anpasst. Kann diese Forderung nicht erfüllt werden, so sinkt das Nutzenpotential der Modelle. Gruppierungen von Elementen, Parametern oder Körpern sind daher für die Modelltransparenz von großer Bedeutung. Innerhalb dieser Gruppen können selbst wieder Gruppierungen vorgenommen werden, um transparente Strukturen zu erstellen. So können Parameter bauteilbezogen zusammengefasst oder Gruppierungen aufgrund ihrer Einheiten vorgenommen werden. Durch eine farbliche Kennzeichnung bestimmter Geometrieelemente kann eine zusätzliche Klassifizierung erzielt werden. So kann man beispielsweise über die Farbgebung Bauteilreferenzen kodieren oder Funktionsprinzipien visualisieren.

Basierend auf den genannten Vorteilen hinsichtlich der Struktur der Komponenten und der Modelltransparenz wurden neue Features für die Funktionsmodellierung entwickelt, die den Konstruktionsprozess unterstützen, die Modelle strukturieren und eine einheitliche Herangehensweise ermöglichen.

4.4.1 Funktionselemente

Funktionselemente beschreiben ähnlich der Vorgehensweise des morphologischen Kastens das Funktionsprinzip. Der Aufbau eines Funktionselementes ist gleich dem eines Skelettelementes und kann Abbildung 33 entnommen werden. Ein Funktionselement charakterisiert somit den geometrischen Bereich, der eine bestimmte Funktion erfüllen soll. Wird ein Funktionsprinzip ausgewählt, so wird es durch ein Skelettelement visualisiert, das eine Prinziplösung darstellt. Somit bildet ein Skelettelement gegenüber dem Funktionselement einen höhe-

ren Detaillierungsgrad für die Konstruktion. Ein Funktionselement kann durch ein Skelettelement ersetzt oder erweitert werden, indem eine Feature-Kombination gebildet wird. Die Funktion Kraftübertragung kann beispielsweise durch Reibschluss, Formschluss oder einem Zusatzelement, das eine Verbindung zwischen den beiden Komponenten darstellt, erzeugt werden. Eine Passfeder- oder eine Schraubverbindung sind gängige Lösungen für die Funktion einer Kraftübertragung mittels eines Verbindungselements. Das Verbindungselement wird genauso wie die interagierenden Bauteile als flexible Struktur in das Produktmodell integriert. Somit entsteht ein Funktionsmodell eines Produktes, das über korrespondierende Skelett- und Funktionselemente definiert ist. Die Funktionselemente allein eignen sich nur bedingt für die Produktionsplanung, da der Detaillierungsgrad zur Funktionsrealisierungen eine Fülle an konstruktiven Möglichkeiten offen lässt. Mit einer vorgenommenen Einschränkung der Lösungsprinzipien durch Skelettelemente können erste Planungsaktivitäten eingeleitet werden.

4.4.2 Skelettelemente

Ein Skelettelement kann als Funktionselement verstanden werden, welches zur Funktionsprinzipvisualisierung verwendet wird. Daher werden Skelettelemente als eigenständige Feature-Elemente erstellt, wodurch standardisierte Informationselemente dargestellt werden. Über Datenbanken werden dem Benutzer Feature-Elemente zur Verfügung gestellt, wodurch ein kontinuierliches Arbeiten gewährleistet wird. Ein Skelettelement stellt eine Lösung des Funktionsprinzips eines geometrischen Bereiches dar und wird durch zusätzliche Informationen in Form von Geometrie oder Parametern näher bestimmt. Bei den Skelettelementen handelt es sich um Geometrielemente, die auf Hierarchieebene der Bauteile integriert werden und untereinander verlinkt werden können, wodurch bauteilübergreifende Verbindungen entstehen. Skelettelemente tragen neben dem Namen des Feature-Elementes Informationen, die man grob in die vier in Abbildung 33 gezeigten Gruppen unterteilen kann:

1. **Position und Lage:** Hierbei handelt es sich um Parameter, die durch interne Berechnungen die Position des Instanzierungspunktes ermitteln und über ein Hilfselement die Lage im Raum bestimmen, wodurch die Orientierung als Einheitsvektor im Raum angegeben wird.
2. **Geometrieparameter:** Durch Parameter werden die Dimensionen der einzelnen Geometrielemente beeinflusst, wodurch z.B. die Tiefe oder die Länge einer Tasche definiert wird.
3. **Geometrievisualisierung:** Mit der Hilfe einfacher geometrischer Elemente wird die Funktion des Elementes visualisiert. Diese Geometrie dient zusätzlich als Referenzelement zur Instanzierung anderer Features. So können erste Prozessdefinitionen vorgenommen werden.

4. **Spezielle Informationen:** Zusätzlich können Parameter oder Textinformationen integriert sein, die spezielle Daten über das Funktionsprinzip oder den Fertigungsprozess tragen.

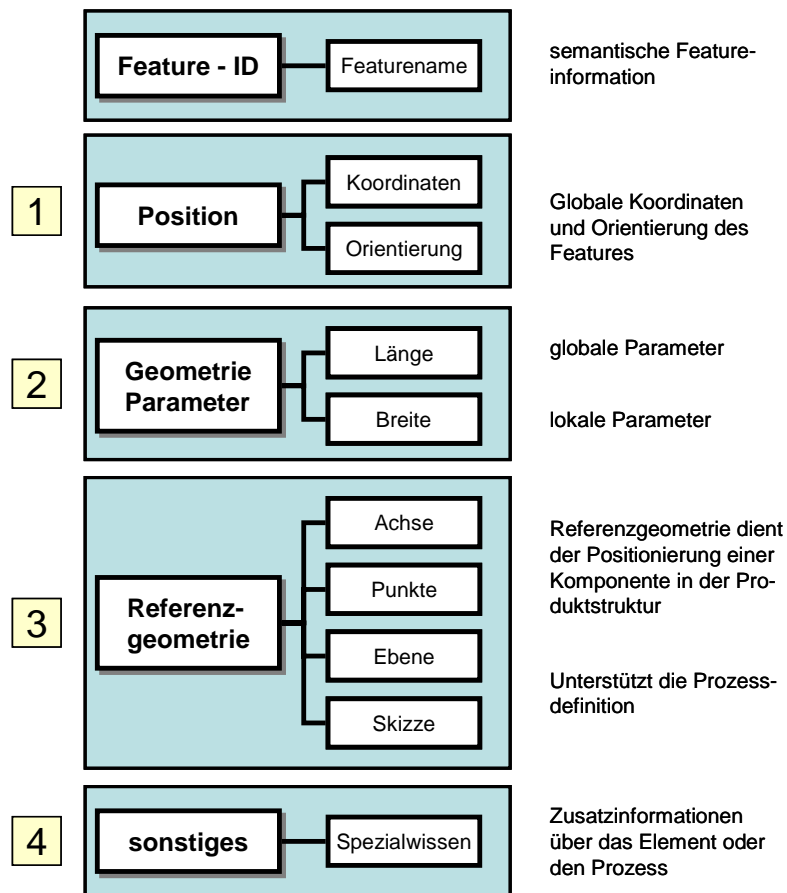


Abbildung 33: Aufbau der Skelett- und Funktionselemente

Mit den Skelettelementen wird eine Standardisierung des Produktmodells erzeugt, die den geforderten Vorteil einer Verkürzung der Planungszeiten im Produktentstehungsprozess hervorruft, indem ein automatisierter oder teilautomatisierter Zugriff auf die Produktmodelldaten ermöglicht wird. Der Zugriff wird durch applizierte Programme gewährleistet, die sich einer VB-Schnittstelle bedienen, um verschiedene Modellmodifikationen und Erweiterungen vornehmen zu können. Dieser Zugriff auf die Produktstruktur ist jedoch nur dann möglich, wenn die Elemente gezielt angesprochen werden können. Daher muss es sich um standardisierte Elemente handeln, wodurch ein Auffinden der Feature-Elemente und der damit verbundenen Daten und Informationen gewährleistet wird.

Die Syntax der eingesetzten Software ist bei jeder vorgestellten Geometrieerzeugung unterschiedlich, wodurch ein automatisierter Zugriff auf die Produktstruktur nicht vollzogen werden kann. Ein weiterer Vorteil der Standardisierung besteht in der verbesserten Transparenz der Modelle, die somit auch durch einen Dritten verändert werden können, da diese Person nach gleichem Standard arbeitet. Ist diese Transparenz nicht vorhanden, ist es in den meisten

Fällen effizienter, das Produktmodell erneut zu erstellen, ohne sich mit der bestehenden Modellstruktur auseinander setzen zu müssen.

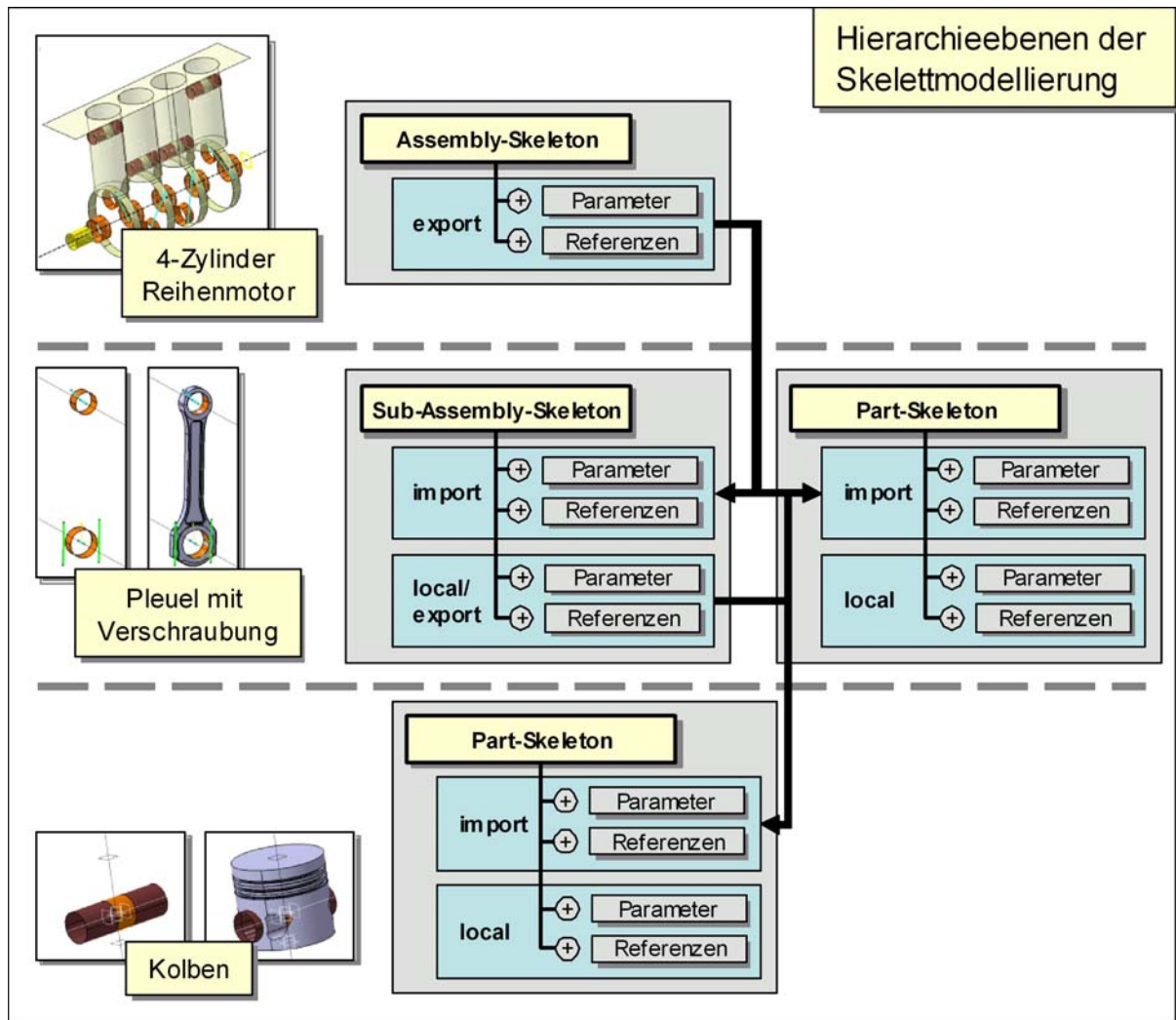


Abbildung 34: Hierarchieebenen der standardisierten Skelettmodelle

In Abbildung 34 wird die standardisierte Skelettmodellierung mit den erarbeiteten Skelettelementen dargestellt. Auf der Ebene des Produktmodells ist ein 4-Zylinder-Reihmotor gezeigt, dessen globale Referenzen, wie Zylinderabstand, Bauraumbeschränkungen von Pleuellagerbolzen und Pleuellagerbolzen an die Bauteil-Skelettmodelle übergeben werden. Die globalen Parameter, wie Pleuellagerbolzen und Pleuellagerbolzen werden ebenfalls an Baugruppen-Skelettmodelle oder Bauteil-Skelettmodell weiter gegeben und als Geometrierestriktionen verarbeitet. So definiert der Pleuellagerbolzen die Geometrie der Pleuellagerbolzenfläche und die des Pleuellagerbolzens. Die Pfeile in Abbildung 34 zeigen den Datentransfer zwischen den verschiedenen Hierarchieebenen der Skelettmodelle.

4.4.3 Aufbau der Skelettelemente

Der Featureaufbau und die Struktur der Informationen sind von entscheidender Bedeutung für das Einsatzpotential eines Skelettelementes. Daher wurden in einem ersten Schritt die Anforderungen an die Features definiert, indem die Kopplung zu verschiedenen Modulen der Software getestet wird. Da die Features in erster Linie aus Flächen und Parametern bestehen, müssen diese so gestaltet sein, dass sie als Referenz für Konstruktions- und Planungsprozess dienen können. Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt bei der Gestaltung der Feature-Elemente ist die Vollständigkeit der Information, die abgebildet werden soll. Hierbei soll jedoch auch keine Verschwendung betrieben werden, indem für jede Aufgabe ein eigenes Feature erstellt wird oder Informationen in redundanter Form abgelegt werden. Daher müssen erforderliche Informationen für einzelne Aufgaben definiert werden, die als Input für die Feature-Gestaltung dienen. Um dieser Forderung Rechnung zu tragen, wurden verschiedene Planungsmodule hinsichtlich des geforderten Input analysiert.

Mit den Referenzen eines Feature-Elements werden unterschiedliche Aufgaben eines Arbeitsbereiches unterstützt. Daher wird die Schnittmenge aller benötigten Eingaben als Gestaltungsrichtlinie für ein Feature-Element gesetzt. Aufgrund dieser Strategie ist es möglich, unterschiedliche Aufgaben mit einem Element zu automatisieren. Neben einer verbesserten Produktstruktur können auf diese Art und Weise die Datenbankelemente und deren Speicheraufwand auf ein Minimum reduziert werden, wodurch die Verwendung der Feature-Elemente vereinfacht wird. Mit der Lokalisierung eines Elementes in der Produktstruktur können unterschiedliche Softwarefeatures integriert werden, die ihrerseits wieder Routinetätigkeiten unterstützen. Bei einer solchen Vorgehensweise kann man jedoch leicht Gefahr laufen, dass die Informationen und Daten eines Elementes überhand nehmen, wodurch die Elemente mit Informationen überladen werden. Stellt die Informationsmenge keine Einschränkung in der Übersichtlichkeit und in der Verwaltung der Produkte dar, können die Features beliebige Größe und Komplexität annehmen. Sonst müssen Einschränkungen vorgenommen werden, um die geforderte Performance einer einfachen Arbeitsweise zu gewährleisten.

Die Erstellung eines Konzeptes mit der Kopplung von Informationen wird mit der Skelettmodellierung ermöglicht. Die Skelettelemente dienen in diesem Fall als Basis-Features, die Referenzen für bestehende oder noch zu entwickelnde Featurekonzepte besitzen. Daher kann das Konzept auch bei sich ändernden Anforderungen an die Produkt- oder die Prozessentwicklung eingesetzt werden, da es beliebig um Zusatzinformationen erweitert werden kann.

Der Fokus der vorgelegten Arbeit liegt auf der Kopplung von Konstruktion mit der NC-Planung (CAD/CAM) und der Montageplanung. Daher werden die Anforderungen für diese beiden Planungsaktivitäten im Folgenden definiert:

1. **NC-Planung:** Die Features müssen Geometrie-Referenzen für die verschiedenen Fräs-, Bohr- und Drehoperationen besitzen, um die Geometrie eindeutig zuordnen zu können. Zusätzlich besteht der Bedarf an Parametern, die die verschiedenen Bereiche näher charakterisieren und somit die Einstellungen für die NC-Technik definieren.
2. **Montageplanung:** Für die Montageplanung ist es von entscheidender Bedeutung, dass der Montageprozess über einen vorbestimmten Montageweg definiert werden kann. Daher erhalten die Features die Anforderung, Elemente zu tragen, die eine Integration einer Kinematiksimulation ermöglichen. Die Fügebewegung wird über eine Kurve definiert, die als Leitstrahl fungiert, um die zu fügende Komponente in Bauteillage zu bringen.
3. **Messplanung:** Zur Erstellung der Messplanung werden Messpunkte auf den Skelettelementen platziert, die über die geforderte Fertigungstoleranz und die entsprechenden Featuregeometrie definiert werden. Daher werden Fertigungstoleranzen implizit oder explizit mit dem Feature-Element verbunden.

Die prototypische Implementierung ist in der Softwareumgebung CATIA V5 von DASSAULT SYSTEMES umgesetzt, daher werden die Module von CATIA V5 untersucht und hinsichtlich ihrer Anforderungen analysiert. Hierfür werden die unterschiedlichen zur Verfügung stehenden Flächenreferenzen getestet, um über die Schnittmenge aller Operationen des NC-Moduls die kleinstmögliche Referenzmenge zu erhalten.

4.4.3.1 Referenzanalyse NC

Die Definition der Referenzen im NC-Modul kann direkt über die Volumengeometrie erfolgen oder über den Weg der Referenzgeometrie der Skelettelemente in Form von Punkten, Linien und Ebenen. Im Rahmen der Referenzanalyse wird im ersten Schritt der Einsatz der NC-Technik an der Volumengeometrie getestet, um die verschiedenen Möglichkeiten der Referenzierung zu ermitteln. Aber auch die Referenzierung auf rudimentäre Geometrieelemente wie Ebenen und Konturzüge sind erfolgreich getestet, wodurch sich beide Alternativen zur Referenzierung eignen. Problematisch bei der Verwendung der Volumengeometrie ist der gezielte Zugriff, da es sich bei den verwendeten Elementen nicht um standardisierte Feature-Elemente handelt, die einen automatisierten Zugriff über die Produktstruktur gewährleisten.

4.4.3.2 Referenzanalyse Kinematik

Ähnlich der Vorgehensweise der Referenzanalyse für die NC-Technik wird auch bei der Referenzanalyse der Kinematik vorgegangen. Die unterschiedlichen Verbindungsarten für Kinematiksimulationen werden analysiert, um eine geradlinige Bewegung einer Komponente von einem beliebigen Anfangspunkt zu einem beliebigen Endpunkt zu realisieren. Die Verbindungslinie kann als Leitlinie verstanden werden, wodurch sich die Testreihe eher auf die Realisierung der Verbindung beschränkt. Somit hat sich die „zylindrische Verbindung“ als die zu erstellende Verbindung herausgestellt, da zwei Linien und zwei Punkte zur Definition ausreichen. Damit die Bewegung simuliert werden kann, muss die Rotation der Achsen durch die Linien repräsentiert zusätzlich eingeschränkt werden, um die Anzahl der Freiheitsgrad auf die lineare Bewegung zwischen den beiden Punkten zu reduzieren. Zur Bewegungsdefinition werden daher wie beschrieben zwei Punkte benötigt, die die Erstellung der Geraden ermöglichen, um einen Bewegungspfad zu erstellen. Daher muss das Feature neben einer Linie auch den Zugriff auf einen Punkt ermöglichen. Somit ist festzuhalten, dass aufgrund der angestrebten Bewegungssimulation mindestens ein Punkt und eine Linie im Skelettelement enthalten sein muss, damit aufgrund der Skelettmodellierung mit Skelettelementen erste Bewegungssimulationen erstellt werden können, die einerseits für die Montagesimulation und andererseits zur Funktionsvisualisierung benötigt werden.

4.5 Skelettmodelle in der Produktionsplanung

Entsprechend dem Modellierungskonzept können auch Skelettmodelle in der Technischen Produktionsplanung Verwendung finden. Hierfür werden verschiedene Hierarchieebenen definiert, die in den unterschiedlichen Planungsphasen angesprochen werden, um Detaillierungen vorzunehmen. Auf Höhe der Ebenen der Produktmodellierung und Produktionsplanung bestehen Verbindungen, die es erlauben, Daten und Informationen zu transferieren, wodurch Wissen über die Zusammenhänge erzeugt wird.

4.5.1 Hierarchieebenen der Skelettmodelle der Produktionsplanung

Wie bei den Skelettmodellen der Konstruktion existieren drei Hierarchieebenen. Diese Ebenen kommunizieren einerseits untereinander und andererseits mit den verschiedenen Hierarchieebenen der Produkt-Skelettmodelle. Auf Ebene der Skelettelemente der Konstruktion werden Verknüpfungen zu den Prozess- und Ressource-Elementen, den Basiselementen der Prozessplanung, aufgebaut. Die Kombination von Prozess- und Ressource-Elemente definie-

ren die Prozess-Skelettmodelle, die ihrerseits in einem Produktions-Skelettmodell zusammengefasst werden.

4.5.1.1 Prozess- und Ressource-Element

Auf der untersten Ebene der Skelettmodelle der Produktionsplanung befindet sich der einzelne Prozess, der einen speziellen Bereich des Produktmodells bearbeitet. Jede Tasche, die zu Fräsen ist, oder jede Bohrung, die geräumt werden muss, wird als einzelnes Element betrachtet und aktiviert einen Teilprozess mit einem Prozess- und Ressource-Element. Die geometrischen Referenzen des Produktmodells werden zur Beschreibung eines flexiblen Prozessmodells herangezogen. Das Prozess- und Ressource-Element hat in erster Linie die Aufgabe, den Teilprozess anzuzeigen. In zweiter Linie wird der Prozess mit einer Ressource aus einer Datenbank verknüpft. Somit kann eine erste Kostenrechnung erstellt werden, die eine Absicherung im Produktentstehungsprozess darstellt, da die Produktionskosten im Allgemeinen den Ausschlag für eine Fertigungstechnologie geben.

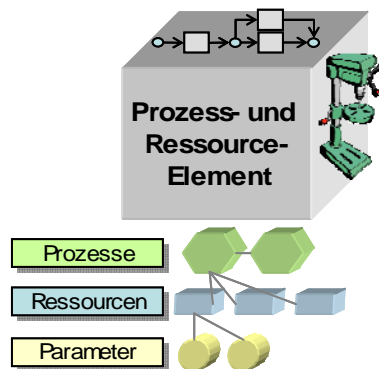


Abbildung 35: Prozess- und Ressource-Element

Ein Prozess- und Ressource-Elemente ist exemplarisch in Abbildung 35 gezeigt. Auf Basis der fünf Planungsphasen müssen Prozesse, Ressourcen und Parameter für die Fertigung ermittelt werden. Ein Prozess- und Ressource-Element repräsentiert somit den zweiten Bereich der in Abbildung 31 vorgestellten Planungsphasen. Dieses Element ist auf die Auswahl der Fertigungstechnologie angewiesen, wodurch grobe Prozessstrukturen mit der Unterstützung von Wissensmanagement erzeugt werden können. Ein Prozess- und Ressource-Element besteht daher nicht zwingend aus einem Prozess, sondern repräsentiert einen Fertigungsschritt, der aus mehreren Arbeitsschritten bestehen kann. So kann die Realisierung eines Funktions- oder Skelettelements mehrere Prozess- und Ressource-Elemente erfordern oder verschiedene Prozesse gleicher Technologie beinhalten. Die Erstellung eines Lagersitzes einer Welle kann ausgehend von dem Rohmaterial verschiedene Prozesse erfordern. Geht man von einer Welle als Rohmaterial aus, so beinhaltet das Prozess und Ressource- Skelett die Prozess- und Res-

source-Elemente Schruppen, Feindreihen und Schleifen. Wenn von einem Schmiederohling ausgegangen wird, so existieren zwei Prozess- und Ressource-Elemente: eines für den Schmiedeprozess und ein zweites für den Zerspanvorgang, der Feindreihen und Schleifen beinhaltet. Diese Herangehensweise unterstützt daher die angestrebte Szenariotechnik für die Prozessplanung.

4.5.1.2 Prozess- und Ressource-Skelettmodell (Prozess-Skelettmodell)

Die zweite Ebene des Skelettmodells der Produktionsplanung besteht aus der Zusammenfassung der Teilprozesse der Fertigung zu einem Prozess-Skelettmodell oder Prozessgraphen, der alle Fertigungsschritte beinhaltet. Bei der Erstellung des Prozess-Skelettmodells werden Prozess- und Ressource-Elemente gleicher Fertigungstechnologie zusammengefasst, wenn diese mit ein und demselben Werkzeug realisiert werden können. Ein Beispiel hierfür wird in Abbildung 37 gegeben. Auf dieser Ebene des Planungsskelettmodells wird die eigentliche Werkzeugauswahl vollzogen. Beispielsweise werden Werkzeuge definiert, die unter Berücksichtigung von zeitaufwändigen Werkzeugwechseln den Gesamtprozess optimieren. So kann sich für eine einzelne Tasche eine höhere Taktzeit ergeben, da sie mit einem kleineren Werkzeug erstellt wird, wobei beispielsweise eine weitere Tasche mit dem gleichen Werkzeug erzeugt werden kann, ohne einen Werkzeugwechsel zu erfordern. Zur Optimierung werden unterschiedliche Steuerungsstrategien analysiert, bei der verschiedene Werkzeugkombinationen zum Einsatz kommen. Basierend auf den Ergebnissen der einzelnen Ebenen werden Simulationsmodelle, die die Prozesse in unterschiedlicher Reihenfolge integrieren, um alternative Fertigungsprozesssimulation zur Analyse erstellt.

4.5.1.3 Produktions-Skelettmodell

Oberhalb der Prozess-Skelettmodelle existiert das Produktions-Skelettmodell, welches alle Prozess-Skelettmodelle beinhaltet und vereint. Die kombinierte Berücksichtigung aller Bauteilfertigungen und der anschließenden Montage mit der einhergehenden Qualitätssicherung zielt auf eine ganzheitliche Optimierung der Produktion ab. So können Konstruktionsänderungen einer Komponente zwar deren Fertigung preisgünstiger gestalten, wodurch jedoch bei der Montage ein ungünstiger Prozess hervorgerufen wird, der das Endprodukt eventuell verteuert. Auf Bauteilebene hätte man zwar eine Optimierung erzielt, die aber auf Produktebene zusätzlichen Kosten erzeugt. Ein Beispiel hierfür sind Arretierungen oder Anschläge von Bauteilen, die eine automatisierte Montage bei der Positionierung unterstützen, die Komponentenkosten aber zusätzlich belasten. Ziel ist es daher, mit dem Produktions-Skelettmodell eine Gesamtsicht auf die Herstellung der Produkte zu erzeugen und diese zu optimieren.

4.5.2 Flexible Fertigungsmodelle

Die direkte Kopplung von Prozesssimulation und Produktmodell ermöglicht es, durch die Variantendarstellung der Produkte auch Varianten in der Prozessplanung zu erstellen. In diesem Bereich passen sich die Simulationen den neuen Gegebenheiten an, indem die Simulationsparameter sich automatisch an die neuen geometrischen Referenzen anpassen. Die Flexibilität beruht auf der dynamischen Verbindung zwischen den CAD- und CAP-Modellen, die zwar nur in eine Richtung zu sehen ist, aber keine Einschränkung darstellt, da der Master durch das CAD-Modell abgebildet wird und die CAP-Modelle auf Änderungen reagieren und sich dementsprechend anpassen.

4.5.3 Schnittstellenkonzept

Die Kommunikation der verschiedenen Skelettmodelle basiert auf der Feature-Technologie, die auf unterster Ebene eine Verknüpfung ermöglicht. Hier werden Feature-Elemente der Konstruktion mit Feature-Elementen der Produktionsplanung verbunden. Grundlegende Informationen sind als Datensätze im Feature-Element der Konstruktion enthalten. Andere Informationen werden über die Semantik der Elemente erstellt, welche erst in Kombination mit Prozessen aus Wissensmanagementsystemen ausgelesen werden. Somit enthalten die Feature-Elemente nur die grundlegenden Daten, die für erste Grundkonzepte benötigt werden.

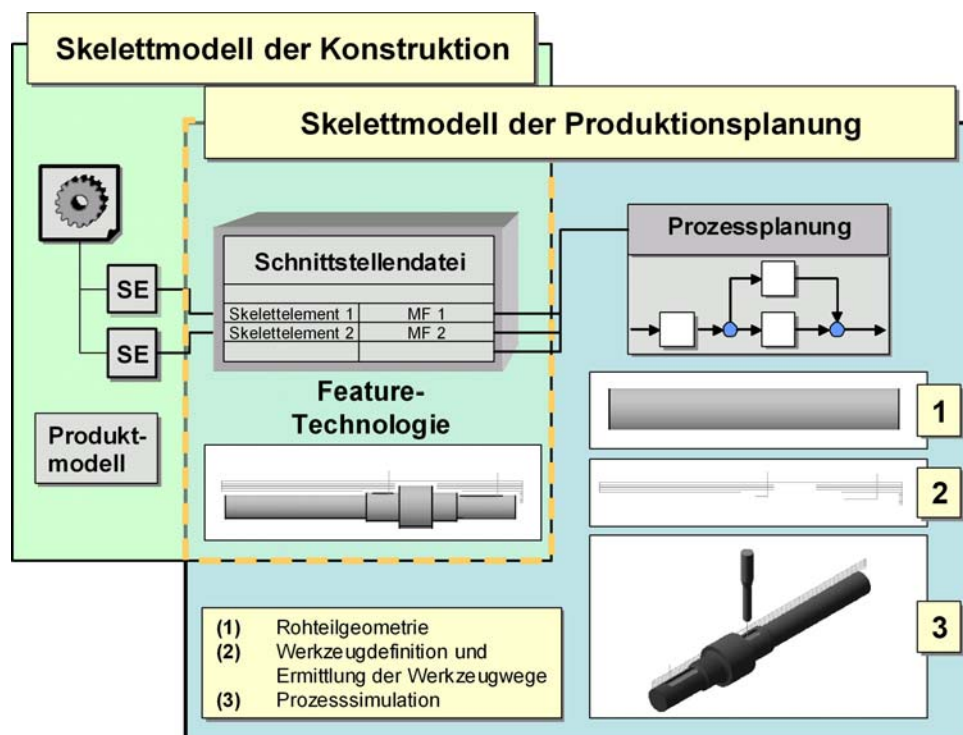


Abbildung 36 Feature-Technologie als Schnittstelle zwischen Konstruktion und Produktionsplanung

Das Ergebnis der Schnittstelle gewährleistet somit einen Datenaustausch zwischen dem Skelettmodell der Konstruktion und dem Skelettmodell der Produktionsplanung, wobei höherwertiges Wissen durch die Interpretation der gesamten Verbindung entsteht. Durch eine Interpretation von kombinierten Feature-Elementen ist es möglich, im Rahmen des Szenario-management Alternativen automatisiert erzeugen zu lassen, um diese im Anschluss bewerten zu können. In Abbildung 36 wird die Realisierung der Schnittstelle für den Bereich CAD-CAM-Kopplung exemplarisch dargestellt. Die Skelettelemente des Produktmodells werden mit Hilfe des in Abschnitt 4.6 vorgestellten Interpreters in Bearbeitungs-Features interpretiert, wodurch grobe Prozessstrukturen erstellt werden. Innerhalb der Prozessplanung wird in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens die Rohteilgeometrie bestimmt. In einem zweiten Schritt werden die Werkzeug und die damit verbundenen Werkzeugwege definiert. Diese Informationen werden dann zur Erstellung einer Prozesssimulation verarbeitet, die zum Zeitpunkt des Funktionsmodells erste Aussagen über Taktzeiten zulässt. Die Vorgehensweise sowie die einzelnen Konzeptschritte werden in den nächsten beiden Abschnitten detailliert beschrieben.

4.5.3.1 Schnittstellendatei

Mit der Schnittstellendatei werden alle Parameter des Produktions-Skelettmodells verwaltet. Bei der eingesetzten Software hat sich die EXCEL-Schnittstelle als geeignet herausgestellt, da sie vom CAD-System unterstützt wird. EXCEL-Tabellen besitzen verschiedene Tabellenblätter, die es ermöglichen, Daten strukturiert abzulegen. Die Daten der verschiedenen Sichten auf das Produktmodell werden in unterschiedlichen Tabellenblättern gespeichert. Auf den ersten Tabellenblättern sind die Produktinformationen gespeichert, auf den folgenden Blättern werden die Prozessparameter der Montage und der Fertigung aufgeführt. Die entsprechenden Daten werden über Makros ausgelesen und in die Schnittstellendatei übertragen, die eine dynamische Verbindung zu den verschiedenen Skelettmodellen besitzt. Die Parameter der Bauteile, Baugruppen und des Produktes repräsentieren die Produktinformationen, die auch innerhalb der Schnittstellendatei miteinander verlinkt sein können. Wird das Zusammenspiel der Parameter über Regeln und Funktionen in der Schnittstellendatei definiert, so ist sie auch Träger der Modellintelligenz. Die Modellintelligenz kann somit sowohl im Produktmodell als auch in der Schnittstellendatei integriert sein. Die Parameter der Prozessdefinition werden ebenfalls in einer anderen oder der gleichen Schnittstellendatei verwaltet, um die Daten für die Integration in andere Tools vorzubereiten und diese in übersichtlicher Form abzulegen. Neben den Parametern werden auch Simulationsergebnisse gespeichert. Ein solches Ergebnis ist z.B. die Taktzeit eines Zerspanprozesses in Kombination mit den gesetzten Zerspanparametern. Bei der Montageplanung werden die Fügeflächenmatrix, die korrelierenden Fea-

ture-Elemente und die resultierenden Montagereihenfolgen in EXCEL verwaltet. Somit trägt die Schnittstellendatei alle Informationen, die zwischen den Abteilungen ausgetauscht werden, wodurch die verschiedenen Sichten auf das Produktionsmodell in indirekter Form in der Schnittstelle vorhanden sind. Die Schnittstelle stellt lediglich den Speicherort für Parameter und Information dar. Die Informationen sind jedoch ohne die Skelettmodellstrukturen der Konstruktion und der Produktionsplanung nur bedingt nutzbar, da Modifikationen Simulationsergebnisse beeinflussen, deren Ergebnisse nur in Verbindung mit den Prozessskelettmodellen den aktuellen Status der Prozessparameter repräsentieren können. Bestes Beispiel bildet die Taktzeit der Prozesse, die erst nach erfolgreicher Simulation im Modell vorhanden ist und daher erst im Anschluss an die Simulation in die Schnittstellendatei übertragen wird.

4.5.3.2 Produktdatenmanagement

Im Abschnitt Digitale Fabrik (4.3) wird von unabhängigen Softwarelösungen für einzelne Probleme gesprochen, die miteinander vernetzt werden müssen, damit ein strukturierter Workflow erstellt werden kann. In den meisten Fällen kombinieren Unternehmen Softwarelösungen von verschiedenen Anbietern, um einerseits die Vorteile der jeweiligen Software zu nutzen und andererseits das Abhängigkeitsverhältnis zu einem Anbieter zu reduzieren.

Das Ziel der Unternehmen besteht daher darin, die heterogene Softwarelandschaft in ein Produktdatenmanagementsystem (PDM-System) zu integrieren, wodurch ein Datenaustausch ermöglicht wird. Hierbei werden drei grundsätzliche Ziele verfolgt, die der Motivation der Arbeit zu entnehmen sind:

1. Erhöhung der Produktqualität
2. Reduzierung der Produktenstehungskosten
3. Verringerung der Produktentstehungszeit

Eine der Grundfunktionen von PDM-Systemen soll daher das Speichern und Verwalten von Produkt- und Entwicklungsinformationen sein. Hierbei kann es sich sowohl um produktspezifische Informationen als auch um firmenspezifisches Wissen oder allgemein verfügbare Daten handeln. Unter die Rubrik der produktspezifischen Informationen fallen:

- 3D-CAD-Modelle
- 2D-Zeichnungen
- Stücklisten
- FEM-Modelle
- NC-Daten
- Analysen
- Berechnungsergebnisse
- Arbeitspläne
- Fertigungshinweise
- Technische Dokumentation
- Varianteninformationen
- Angebotstexte
- Referenzen auf konventionell erstellte Daten

Explizites Firmenwissen wird unter folgenden Informationen zusammengefasst:

- Wiederholteile
- Gestaltungsvorschriften
- Maschinen- und Werkzeugdaten
- Termin- und Kapazitätsdaten
- Kosteninformationen
- Organisatorische Daten

Weiter existieren darüber hinaus noch allgemeine Informationen die dem Unternehmen zur Verfügung stehen:

- Norm- und Katalogteile
- Technologische Daten
- Physikalische Daten

Die Bedeutung der Verwaltungsfunktion resultiert insbesondere aus der stark gestiegenen Informationsvielfalt, welche vor allem auf den verstärkten Einsatz von CAx-Systemen zurückzuführen ist. Zudem weisen viele Daten Beziehungen untereinander auf, wobei diese sogar dynamischen Änderungen unterliegen können. Eine Datenhaltung in übersichtlicher Form, bei der auch Beziehungen zwischen Objekten berücksichtigt werden, ist daher ein wichtiges Einsatzziel von technischen Informationssystemen. Dieser Aspekt ist besonders dann von Bedeutung, wenn zusätzlich eine entwicklungsbegleitende Verwaltung von Varianten- und Entwicklungszuständen gefordert ist.

Durch die Verwaltung von Beziehungen kann der Forderung nach Vermeidung von redundanten Daten Folge geleistet werden. Eine weitere Aufgabe besteht in der Konsistenzsicherung von Daten. Dieses Problem tritt dann auf, wenn innerhalb des Unternehmens mehrere getrennte Datenbanken zur Datenhaltung verwendet werden, die sich jedoch auf das gleiche Produkt beziehen (Geometriemodell, Zeichnungen, Stücklisten etc.).

Neben der Forderung einer optimierten Verwaltung von Produktdaten sollte auch auf die Zugriffsmöglichkeiten eingegangen werden. In diesem Bereich besteht der Bedarf an Kommunikationstechniken, die es dem Benutzer erlauben, auf einfache Weise Daten aus der Datenbank zu entnehmen und neue Datensätze abzulegen. Heute im Einsatz befindliche PDM-Systeme erlauben es dem Benutzer, gezielt über Kriterien nach archivierten Daten zu suchen. Klassifizierungen, Sachmerkmalelisten nach DIN 4000 sowie effiziente Suchalgorithmen bilden die Grundlage für diese Anforderung. Zur Gewährleistung der Sicherheit, dass nur ein gezielter Personenkreis bestimmte Datensätze manipulieren kann, besteht ähnlich wie bei PC-Netzwerken die Möglichkeit, Gruppen anzulegen, die für bestimmte Aktivitäten autorisiert sind oder Freigaben erhalten.

Das Konzept einer integrierten Produktentstehung kann nur dann gewinnbringend eingesetzt werden, wenn die Rahmenbedingungen der Softwaresysteme den oben genannten Aspekten entsprechen. Werden Anforderungen an die PDM-Systeme nicht erfüllt, kann der integrierte

Ansatz nur unter Einschränkungen umgesetzt werden, da Barrieren bestehen, die den Datentransfer hemmen und einen Konvertierungsaufwand verursachen. Somit können keine redundanzfreien Modelle, die dynamisch miteinander verknüpft sind, erstellt werden, wodurch Beschleunigungseffekte mit Einschränkungen zu erwarten sind und somit nur einen geringeren Marktvorteil bedeuten.

4.5.4 Ableiten der Volumengeometrie

Damit verschiedene Prozesse digital abgebildet werden können, müssen eine grobe Geometriemodellierung des Produktes und des Rohteils erstellt werden. Daher stellt die Umsetzung der Volumengeometrie einen wichtigen Schritt zur Parallelisierung der Aufgaben dar. Damit sich keine Verzögerungen einstellen, wird das digitale Volumenmodell basierend auf den Referenzen und Parametern der Skelettelemente automatisiert erstellt.

Die automatisierte Geometrieerzeugung kann verschiedenen Herangehensweisen unterliegen, die über Programme (Makros) abgebildet werden [Ziet03]:

1. Die Geometrie wird vollständig über das Makro erzeugt.
2. Die Geometrie wird mit der Hilfe von Datenbanken erzeugt, indem eine Hilfsgeometrie geladen wird, die sich an die entsprechende Parameterkonfiguration anpasst.
3. Die vollständige Volumengeometrie wird aus der Datenbank mit dem zugehörigen Bauteil geladen und an die entsprechenden Parameter angepasst.

Diese unterschiedlichen Strategien der Produkterzeugung müssen hinsichtlich der eingesetzten Modellierungsmethode abgewogen werden. Wenn man davon ausgehen kann, dass Modifikationen vorzunehmen sind, welche auf der Hilfsgeometrie beruhen, so ist Alternative 1 zu bevorzugen da die Geometrieerstellung im Produktbaum repräsentiert und modifiziert werden kann. Vorteil von Alternative 2 und 3 gegenüber der vollständigen Geometrieerstellung ist ein reduzierter Programmieraufwand. Der reduzierte Aufwand bei der Programmierung beruht auf der Tatsache, dass vorgefertigte Geometrieelemente als Datenbankelement geladen werden, welche bei der Instanziierung die Parameter des Feature-Elementes erhalten, wodurch die Geometrie definiert wird.

Die Ordnerstruktur der Datenbankelemente ist bei dieser Herangehensweise von enormer Bedeutung, da die Programme auf diese Strukturen zugreifen müssen. Der Unterschied zwischen Alternative 2 und 3 besteht darin, dass bei Alternative 2 eine Hilfsgeometrie aus einer Datenbank geladen wird, die in einem zweiten Schritt noch zu modifizieren ist. Bei der Alternative 3 wird ein vollständiger Volumenkörper geladen, der nur in Spezialfällen angepasst werden muss.

4.6 Automatisierte Fertigungsplanung

Basierend auf dem groben Volumenmodell kann die Fertigungsplanung teilautomatisiert erstellt werden, indem alle Skelettelemente eines Bauteilskelettmodells separiert werden und in Form von Prozessen interpretiert werden.

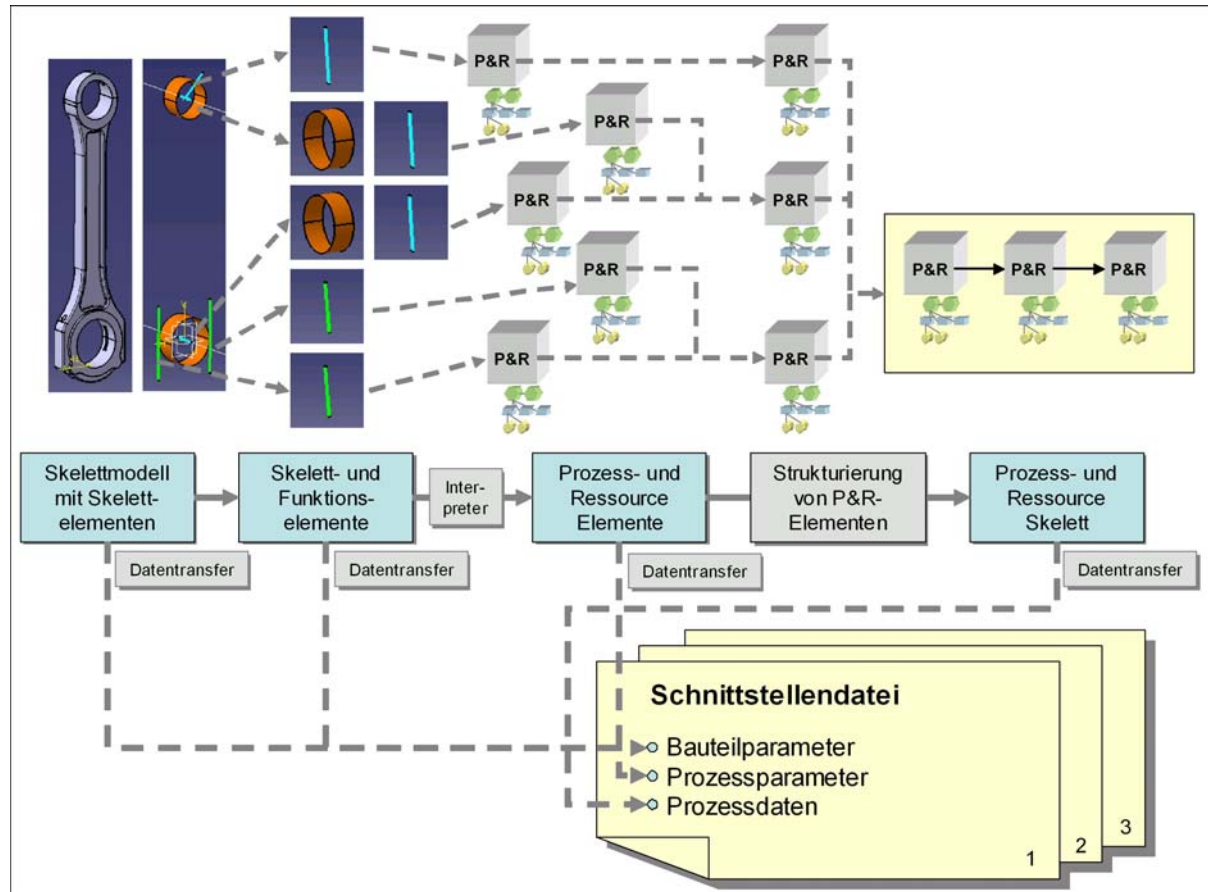


Abbildung 37: Erstellung des Prozess- und Ressource-Skeletts aus dem Produktskelettmodell

Diese Interpretation von Featureinformationen in Prozessen kann von der technischen Produktionsplanung überarbeitet werden, falls andere Prozessstrukturen erforderlich sind. Ist dieser Ablauf für alle Elemente vollzogen, kann automatisch ein Simulationsmodell der Fertigung abgeleitet werden. Um einer Fertigungsstrategie gerecht zu werden, müssen die Geometrielemente entsprechend der Fertigungsfolge schrittweise zusammengefasst werden, um ein sogenanntes Fertigungsabschnittsmodell (In Process Model (IPM)) zu erzeugen. Die Fertigungsabschnittsmodelle werden aus den einzelnen Geometrielementen als eigenständiger Körper erzeugt, um den Simulationsaufbau zu automatisieren. Ist jedoch die Fertigungsstrategie noch nicht definiert, so können keine Volumenelemente zu einem Fertigungsabschnittsmodell zusammengefasst werden. Dieser Schritt erfolgt erst nach der Festlegung der Fertigungstechnologien und der daraus resultierenden Fertigungsstrategie. Sollen jedoch verschie-

dene Fertigungstechnologien hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit verglichen werden, müssen auch die unterschiedlichen Fertigungsstrategien durch den Aufbau des Produktions-Skelettmodells unterstützt werden.

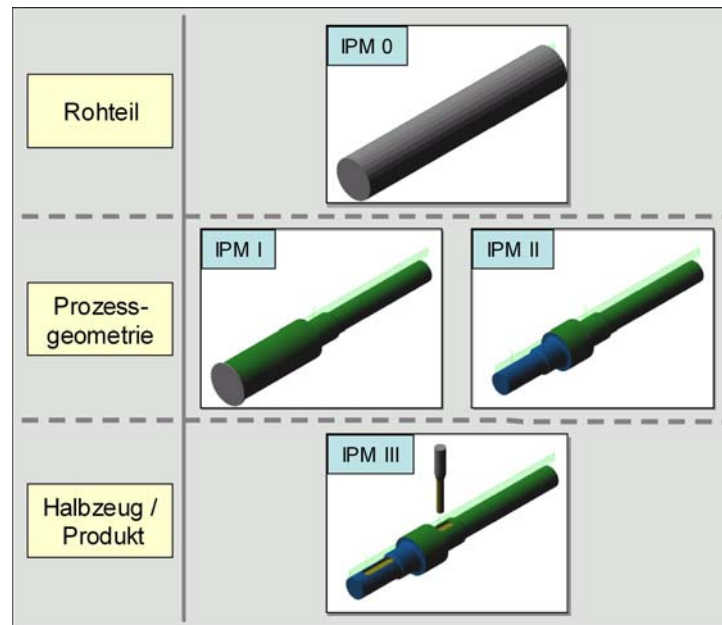


Abbildung 38: Fertigungsabschnittsmodelle einer Welle

Die Fertigungsabschnittsmodelle einer Welle sind in Abbildung 38 dargestellt. Die Rohteilgeometrie stellt das IPM 0 dar. IPM I bis IPM III zeigen die Geometrie der Komponente nach gewissen Arbeitsschritten. So repräsentiert IPM I das Fertigungsabschnittsmodell nach der ersten Schruppoperation durch Drehen von der rechten Seite. Die Komponente nach der Drehbearbeitung wird mit IPM II dargestellt, welches als Eingangsgeometrie für den Fräsprozess dient. Die so gefertigte Komponente kann weitere Bearbeitungsschritte erfahren, wodurch diese Geometrie des Bauteils als Halbzeug betrachtet werden kann. Sind die erforderlichen Toleranzen realisiert, so handelt es sich um das Endprodukt der Fertigung.

Die Rohteilgeometrie richtet sich ebenfalls nach der eingesetzten Technologie. So können beispielsweise Zahnräder sowohl durch Wälzfräsen als auch durch Fließpressen erzeugt werden. Ein weiteres Beispiel bilden Kurbelwellen, die ab einer bestimmten Jahresstückzahl wirtschaftlicher zu gießen als zu schmieden sind, wodurch natürlich ebenfalls unterschiedliche Produktstadien und Fertigungsabschnittmodelle erzeugt werden.

Die wirtschaftlichen Aspekte der Produktion beeinflussen die einzusetzende Fertigungstechnologie maßgeblich, da die Kosten der Produktion in manchen Branchen den größten Anteil an den Produktkosten tragen. Die Interpretation der Skelettelemente richtet sich nach der eingesetzten Fertigungstechnologie, die von System vorgeschlagen wird und zuvor durch den Planer bestätigt wird. So wird eine Tasche des Produktmodells bei der Zerspanung direkt mit

dem Fräser in Verbindung gebracht. Handelt es sich bei der eingesetzten Technologie um einen Schmiedevorgang, wird die Tasche mit seinem Pendant im Schmiedegesenk verbunden, welches die Negativform der Tasche abbildet. Beim Gießen mit einer Dauerform ist die Gestalt der Tasche von Bedeutung, da sie Einfluss auf die Entformung besitzt. So dürfen beispielsweise keine Hinterschneidungen vorhanden sein, die eine Entformung behindern würden. Ebenfalls müssen die Kanten des Produktmodells abgerundet sein, um die Entnahme des Gussteils zu gewährleisten. In dieser Richtung gibt es weitere Gestaltungsrichtlinien für Gusskonstruktionen, die eingehalten werden müssen, um eine Prozesssicherheit zu gewährleisten. Falls es sich bei der Tasche um eine Passfedernut und somit um Funktionsgeometrie handelt, wird aufgrund der geforderten Toleranzklasse ein Schleifprozess nachgeschaltet, um die geforderte Fertigungsgenauigkeit zu erzielen.

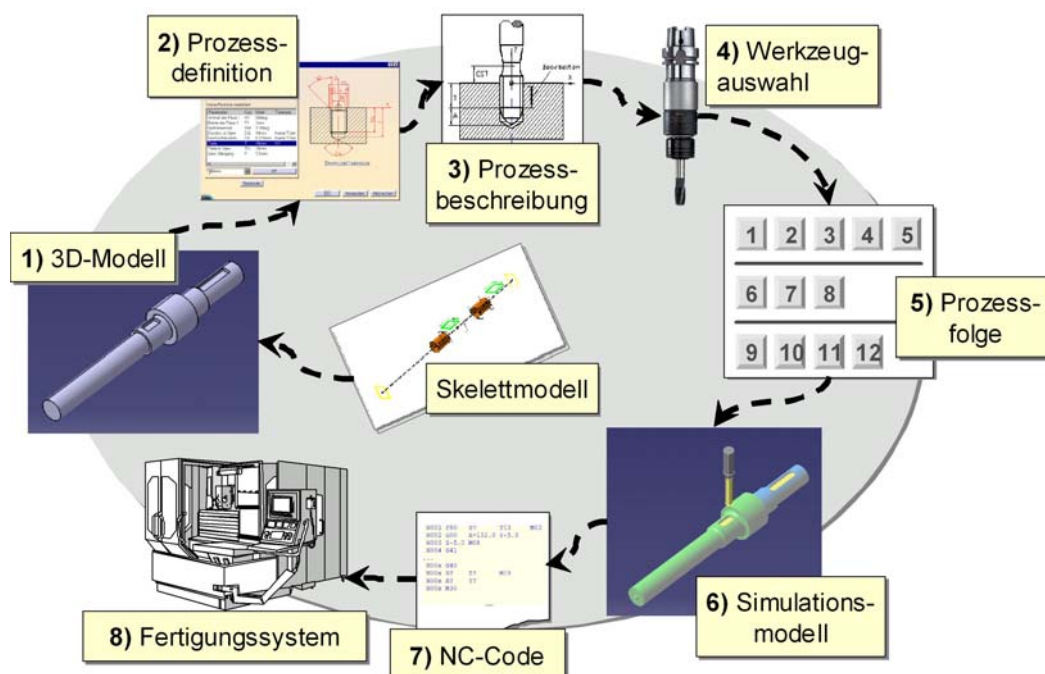


Abbildung 39: flexible CAD-CAM-Kopplung [BIBZ04]

In Abbildung 39 ist die flexible CAD-CAM-Kopplung gezeigt. Basierend auf dem Produktskelettmodell findet eine Prozessbeschreibung und Prozessdefinition unter Berücksichtigung der Volumengeometrie statt. Über die Prozessbeschreibung werden mögliche Werkzeuge in Kombination mit unterschiedlichen Prozessfolgen analysiert. Das Ergebnis ist ein Simulationsmodell mit dessen Hilfe der NC-Code erstellt wird, der an das Fertigungssystem übergeben wird. Die Skelettelemente sind nicht fertigungsspezifisch ausgelegt. Die Anforderungen an die Produktgeometrie basierend auf der eingesetzten Fertigungstechnologie kann auf zwei Arten erzeugt werden:

1. Die Anforderungen an Skelettelemente aus Sicht der einzelnen Fertigungstechnologien werden auf Basis von Datenbankwissen automatisiert bestimmt, wodurch dieses Wissen nur als indirekte Information im Produkt-Prozess-Modell enthalten ist.
2. Die Klasse der Feature-Elemente wird um weitere UDFs erweitert, die zusätzliche „Design for X“-Informationen beinhalten. Diese Vorgehensweise integriert alle benötigten Daten hinsichtlich der Fertigungstechnologie, wodurch das Modell einen hohen Grad an Transparenz besitzt, aber auch den Speicherplatzbedarf stark in Anspruch nimmt.

4.6.1 Erstellung des Prozessplans

Auf eine vollautomatische Erstellung des Prozessplans wird verzichtet, da der Planer immer noch Eingriff haben muss, um den Fertigungsplan zu evaluieren und gegebenenfalls Änderungen einfließen zu lassen, die einen robusteren Prozess gewährleisten. Der Planer erhält somit Arbeitsplanvorschläge, die auf der Szenariotechnik basieren und von ihm überarbeitet werden. Nach der Überarbeitung geht der Arbeitsplan in eine höhere Stufe über, da er nun als Master für die Prozesssimulation dient. Der Arbeitsplan wird mit der Verknüpfung zu den Teilsimulationen für die verschiedenen Fertigungsschritte in eine Einheit überführt, in der alle Prozesse einer Fertigungsstufe in eine Gesamtbetrachtung integriert sind.

4.6.2 Automatisierte Verknüpfung der einzelnen Hierarchieebenen

Ausgehend von den Skelettmodellen und der ersten groben Volumengeometrie des Produktes und seiner Komponenten kann auf Komponentenebene die Planung der Teilefertigung eingeleitet werden. Hierbei werden die Referenzen des Bauteilskelettmodells über einen Interpreter mit den Features des Moduls der NC-Planung verbunden, indem basierend auf den semantisch interpretierbaren Informationen der geometrischen Bereiche eine direkte Verbindung zu den Softwarefeatures oder für diesen Bereich eigens erstellten benutzerspezifischen Features hergestellt wird. Die Geometrieelemente der Skelettelemente sind so gewählt, dass sie als Referenz für die Fertigungsfeatures dienen können. Über die Feature-Erkennung werden die Geometriereferenzen angesprochen und Fertigungsfeatures integriert. Nachdem so mit allen Feature-Elementen des Konstruktionsskelettmodells verfahren worden ist, sind die Prozess- und Ressource-Elemente vordefiniert. Diese Elemente sind grob in Fertigungsklassen zusammengefasst, wodurch ein erster Prozessplan entsteht. Dieser noch sehr grobe Plan wird von der Produktionsplanung überarbeitet und optimiert. Die Ergebnisse werden für erste grobe Kostenabschätzungen im Rahmen eines Freigabemanagements herangezogen. Die Basis hierfür bilden die simulierten Taktzeiten, die anhand der hinterlegten Maschinenkosten Produktionskosten abgeleitet werden können. Diese Kosten werden mit den Zielkosten vergli-

chen, wodurch abgeschätzt werden kann, ob die Zielkosten mit der ausgewählten Technologie eingehalten werden können oder andere Technologien und Strategien zum Einsatz kommen müssen.

Die Gruppentechnologie ermöglicht es, die Produktionskosten zu verringern, indem Fertigungsgruppen oder Fertigungsfamilien zusammengefasst werden, die mit einem Produktionssystem gefertigt werden können, wodurch die Fixkosten auf eine größere Anzahl an Produkten verteilt werden können.

Bei der Erstellung von Produktvarianten werden die Prozesse automatisiert an die Produktreferenzen angepasst, da sie sich aufgrund von Geometriemodifikationen verändern. Die Prozesse werden hinsichtlich der Geometrie und Position der Skelettelemente und somit des Produktmodells modifiziert. Dieses Produkt-Prozess-Skelettmodell ist die Basis für Produktmodifikationen, da aus fertigungstechnischer Sicht das Produkt analysiert wird, wobei neben den technischen Aspekten auch die wirtschaftliche Sicht beleuchtet wird. Dies beruht auf der simulierten Taktzeit, die sich ebenfalls aufgrund der Geometriemodifikation verändert. Somit können zum Zeitpunkt des Funktionsmodells erste Freigaben für Komponenten erteilt werden, die im Laufe der Produkt- und Prozessentwicklung mit der einhergehenden Detaillierung immer wieder neu betrachtet werden müssen, um weitere Freigabestufen auf dem Weg zur Produktion zu überwinden.

4.6.3 Erstellung von Arbeitsplänen

Durch die Gestaltung der Arbeitspläne wird die Entscheidung über die Art der Fertigung getroffen. Ein Arbeitsplan definiert unter anderem die Prozessfolge und ermöglicht es, mit einem Produktionsplanungsprogramm Fertigungstermine zu bestimmen und Kostenrechnungen zu erstellen.

In Arbeitsplänen sind daher folgende Daten hinterlegt:

- Auftragsdaten
- Zeichnungen und der Konstruktionsstücklisten aus dem CAD
- Bearbeitungsverfahren
- Ausgangsmaterials
- Arbeitsvorgangsfolgen
- Maschinenauswahl
- Mitarbeiter-Qualifikation
- Kosten
- Beschreibung der Arbeitsvorgänge
- Werkzeuge, Vorrichtungen und Prüfmittel
- Werkzeugwege
- Schnittwerte
- Rüst- und Bearbeitungszeiten
- Festlegung der Verwaltungsdaten, z.B. Kostenstellen

Es existieren diverse CAP-Software Systeme, die eine Unterstützung der zuvor aufgelisteten Aufgaben darstellen. Durch die Feature-Technologie kann gerade im Bereich von Routinetätigkeiten Einsparpotential genutzt werden; so können z.B. Fräswerkzeuge basierend auf der zu bearbeitenden Geometrie ausgewählt werden. Hierfür werden die in Kapitel 2.4.6 angesprochenen Regeln herangezogen, die es ermöglichen, Bedingungen zu erstellen, über die eine Werkzeugauswahl unterstützt wird. Durch die Zusammenfassung gleicher Fertigungsprozesse sowie der Clusterung von Fertigungsprozessen, die mit dem gleichen Werkzeug bearbeitet werden können, werden erste Optimierungen automatisiert eingeleitet. Die Arbeitsfolge der Prozesse orientiert sich am gespeicherten Wissen. So werden Prozessfolgen vorbestimmt, die eine technologische Reihenfolge bestimmter Funktionsgeometrien oder einer Kombinationen zu fertigender Geometrien darstellen. Hierbei handelt es sich einerseits um Expertenwissen aus der Produktion, welches implizit in bestehenden Fertigungssystemen realisiert ist, oder um Datenbankenwissen, worauf explizit zugegriffen werden kann. Über die Simulation des Prozesses und der gesamten Prozessfolge werden grobe Takt- und Rüstzeiten bestimmt. Das Ergebnis ist somit eine Beschreibung der Arbeitsprozesse in digitaler Form. Zur Realisierung der CAD-CAM-Prozesskette wird das Simulationsmodell zur Erstellung des NC-Steuercodes herangezogen, das durch einen maschinenspezifischen Interpreter an die Werkzeugmaschine übertragen werden kann. Mit der Feature-Technologie wird der Planer vor allem bei Routinetätigkeiten unterstützt, wobei die Feinplanung durch den Menschen erfolgen soll, damit einerseits die Transparenz der Modelle gewahrt wird, Innovationen und situationsgemäße Entscheidungen getroffen werden können und andererseits die Akzeptanz bezüglich der ablaufenden Algorithmen erhöht wird.

4.7 Automatisierte Montageplanung

Die Montageplanung stellt einen entscheidenden Bereich für die Kostenentstehung bei der Produktion dar, daher besteht in der aktuellen Forschung das Bestreben, das Produkt aus Sicht der Montage abzusichern und frühzeitig in die Produktentwicklung zu integrieren [Frie89]. Damit eine montagegerechte Gestaltung [BuWR89] erzielt werden kann, müssen das Produkt und die Fertigungseinrichtungen aufeinander abgestimmt werden. Um Produktmodelle unter den genannten Gesichtspunkten zu analysieren und das Produktmodell oder die Betriebsmittelkonstruktion mit montagerelevanten Informationen zu versorgen, gibt es Gestaltungsrichtlinien für eine montagegerechte Konstruktion, die sich neben der eigentlichen Montage auch mit der Automatisierbarkeit des Montageprozesses beschäftigen. Eine automatisierte Montageplanung beschleunigt den Planungsprozess in gleicher Weise wie eine automatisierte Ferti-

gungsplanung, indem Unstimmigkeiten früh lokalisiert werden können und somit Änderungen an der Produktstruktur oder der Betriebsmittelkonstruktion vorgenommen werden können. Werden Unstimmigkeiten erst zu einem späten Zeitpunkt im Produktentstehungsprozess entdeckt, sind bereits Freigaben hinsichtlich der Produktstruktur erteilt worden, wodurch Änderungen mit hohen Kosten einhergehen. Dementsprechend werden aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten meist keine konstruktiven Änderungen durchgeführt, sondern Prozessanpassungen vorgenommen. So müssen Fertigungssystemplaner eventuell aufwändige und kostenintensive Prozesse erstellen, die das Produkt kostenmäßig belasten und möglicherweise die Ausbringung des Fertigungssystems durch erhöhte Taktzeiten reduzieren. Daher besteht das Bestreben, auch den Montageprozess durch Simulationen und andere neue Methoden zu unterstützen, um wirtschaftliche und qualitativ hochwertige Prozesse zu erstellen und Produkte erzeugen zu können. Wie bereits in Kapitel 2.3.2.5 angesprochen, besteht die Forderung nach montagerechter Gestaltung der Produkte, damit diese einfach zu montieren sind [MiOh86, Boot94]. Die Pioniere waren Boothroyd und Dewhurst, deren Technik über die Jahre in verschiedenen Variationen weiter entwickelt wurde. Neben der Bewertung der Geometrie fokussierten sich Forschungsarbeiten auf die Erstellung möglicher Montage- und Demontagereihenfolgen [FaWh87, KhMa89, WoDu91, SuCC01, KaTa96]. Es gibt Ansätze, die die Montagereihenfolge durch die Umkehrung der Demontagefolge eines Produktes zu erzeugen versuchen [Lee92]. Dieser Ansatz kann für die meisten Verbindungen zwischen zwei Bauteilen oder geometrischen Bereichen Anwendung finden. Ausnahmen bilden beispielsweise Klipp- oder Spreizverbindungen, die eine einfache translatorische Montagebewegung besitzen und bei der Demontage zusätzlich eine Verformung erfahren müssen, um diese zu ermöglichen. Die Betrachtung der Demontagereihenfolge hat ebenfalls das Ziel, die Demontage zu optimieren und zu überprüfen, ob die Produkte recyclinggerecht konstruiert sind oder Teile wieder verwendet werden können [TaSa05, ShRC00, LeGa96, Lamb97]. Im Rahmen der Sequenzplanung kommt oft die Graphentheorie zum Einsatz. Neben dem AND/OR-Graphen [ChMG05, SuCC01] wurden für spezielle Anwendungen weitere Graphen entwickelt. So verwenden Huang und Lee eine Kombination aus einem so genannten „Feature Mating Operation Graph“ (FMOG) und dem „Geometric Mating Graph“ (GMG), um die Montage eines Produktes darstellen zu können. Grundsätzlich konzentriert man sich auf die Kostenminimierung [MiGW94] beim eigentlichen Montageprozess, wobei die Demontage mit dem Hintergrund einer recyclinggerechten Konstruktion [Navi91, Navi93] nicht außer Acht gelassen werden darf, da sie heute ebenfalls die Kaufentscheidung des Kunden beeinflusst. Ein weiteres Forschungsgebiet besteht in der Planung von Roboterbewegungen bei der Montage

[Carr95, PaCh93], die es ermöglicht, über Algorithmen nahezu optimale Bewegungsabläufe zu erstellen, um eine möglichst kurze Taktzeit zu erhalten. Neben den Ressourcen müssen ebenfalls die Betriebsmittel auf die zu erfüllende Aufgabe abgestimmt sein; daher muss die Zugänglichkeit abgesichert werden, indem Produkt und Betriebsmittel auf Kollisionen geprüft werden [Gupt94, StHR97, ChPe05]. Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt ist die Interaktion von Fertigungs- und Montageplanung, die basierend auf der gefertigten Geometrie den funktionsgerechten Zusammenbau der Komponente sicherstellen muss [LuWF06].

4.7.1 DMU

Der Trend in der Montageplanung, verstärkt Simulationen zur Unterstützung heranzuziehen, ist weit verbreitet. Beispielhaft ist Digital Mock-up (DMU) zu nennen, das eine realistische Computersimulation eines Produktes darstellt. Sie wird für die Visualisierung der Funktion in der Konstruktion genutzt sowie für die Produktionsunterstützung oder den Service, der mit dem Produkt verbunden ist. DMU ersetzt das aufwändigere Physical Mock-up (PMU), welches ebenfalls als Kommunikations- und Entscheidungsplattform zur Verfügung steht. Mock-up bezeichnet generell ein Modell in Originalgröße und ist ein erstes Abbild des späteren Produktes. Der Begriff kommt aus der Automobil- und der Luftfahrtindustrie und geht auf den Begriff Physical Mock-up zurück, ein Entwurfsmodell aus Holz, Stahl oder Kunststoff, das zur Überprüfung der Funktion, Einbaukollision und der Montierbarkeit dient. Ein Ableger ist das Sales Mock-up oder auch Design Mock-up. Der Schwerpunkt liegt bei beiden Verfahren auf der Veranschaulichung von Form-, Raum- und Lichteffekten mittels realer Modelle aus Kunststoffen. Dabei wird meist auf Funktion und kinematische Zusammenhänge verzichtet. Sales Mock-ups sind im Interieur-Bereich Bestandteil der Design-Verifikationen die dazu verwendet werden, dem Designer und dem Kunden einen ersten Eindruck zu vermitteln. DMU steht für digital im Rechner erstellte Prototypen. Sie basieren auf 3D-CAD-Daten und stehen schon in einem frühen Entwicklungsstadium zur Verfügung. Diese Arbeitsweise wird auch Virtuelles Prototyping genannt. Das Virtual Mock-up (VMU) ist eine spezielle Ausprägung des DMU, bei dem die bestehenden 3D-Repräsentationen mit Charakteristiken der Virtual Reality verknüpft werden, um einen realeren Eindruck zu vermitteln. So können beispielsweise unterschiedliche Lichteffekte simuliert werden, um eine Designstudie vornehmen zu können. Die Basis für ein DMU sind mittels CAD generierte 3D-Modelle (Parts) und Baugruppen (Assemblies), der Repräsentation und funktionsgetreue Abbildung im Vordergrund stehen. Nach dem virtuellen Zusammenbau kann mittels Simulationen, Animationen und Interaktionen mit Umgebungsgeometrien des Endprodukts evaluiert und verifiziert werden.

4.7.2 IT in der Montageplanung

Das im Folgenden vorgestellte Konzept der digitalen Montageplanung basiert auf der Fügeflächenmatrix, dem Fügeflächengraphen und den daraus abgeleiteten Montagevorranggraphen des Produktes. In einem weiteren Schritt werden Montagesimulationen erstellt, die sukzessive erweitert werden, bis ein Abbild des gesamten Fertigungssystems erstellt ist. Der Ausgangspunkt sind die abgeleiteten Forderungen für die Assembly-Feature die in Kapitel 2.4.3.2 beschrieben sind und den Planungsaktivitäten, die unterstützt werden sollen.

4.7.3 Fügeflächenmatrix

Bei der Fügeflächenmatrix handelt es sich um eine Matrix mit symmetrischen horizontalen und vertikalen Achseinträgen der Produkte. Der Kontakt zwischen den Bauteilen wird durch eine „1“ als Tabelleneintrag symbolisiert. Es bestehen Ansätze, die Fügeflächenmatrix in die verschiedenen Hauptachsen aufzuspalten, um mögliche Montagereihenfolgen zu ermitteln [Gair81].

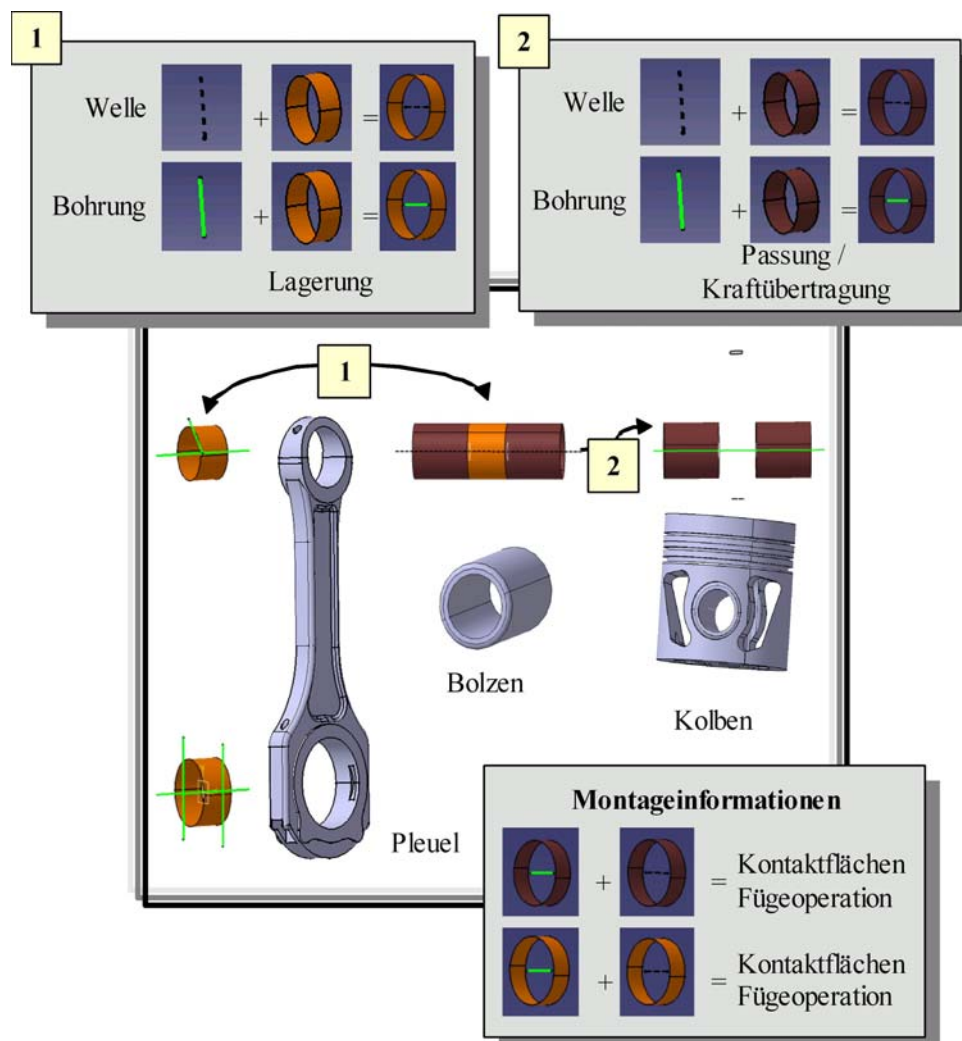


Abbildung 40: Interpretation der Skelettelemente in Fügeflächen und Montageprozesse [BIBo05]

Mit dem vorgestellten Konzept der Skelettmodellierung wird die Fügeflächenmatrix automatisiert aus dem Produktmodell abgeleitet, indem die Position, Orientierung und der Elementtyp ausgelesen und miteinander verglichen werden. Der Abgleich sucht nach Elementen, die entgegengesetzten Charakter besitzen und somit ein Funktionspaar repräsentieren, welches einen Fügeprozess ableiten lässt.

In Abbildung 40 werden die Fügeflächen der Pleuel-Bolzen-Kolben-Verbindung durch einen Positionsabgleich der Feature-Elemente exemplarisch dargestellt. Verbindung 1 stellt eine Lagerverbindung zwischen einer Welle und einer Bohrung dar. Bei der Verbindung 2 handelt es sich um eine Kraftübertragung, die über eine Presspassung zwischen Bolzen und Kolben hergestellt wird.

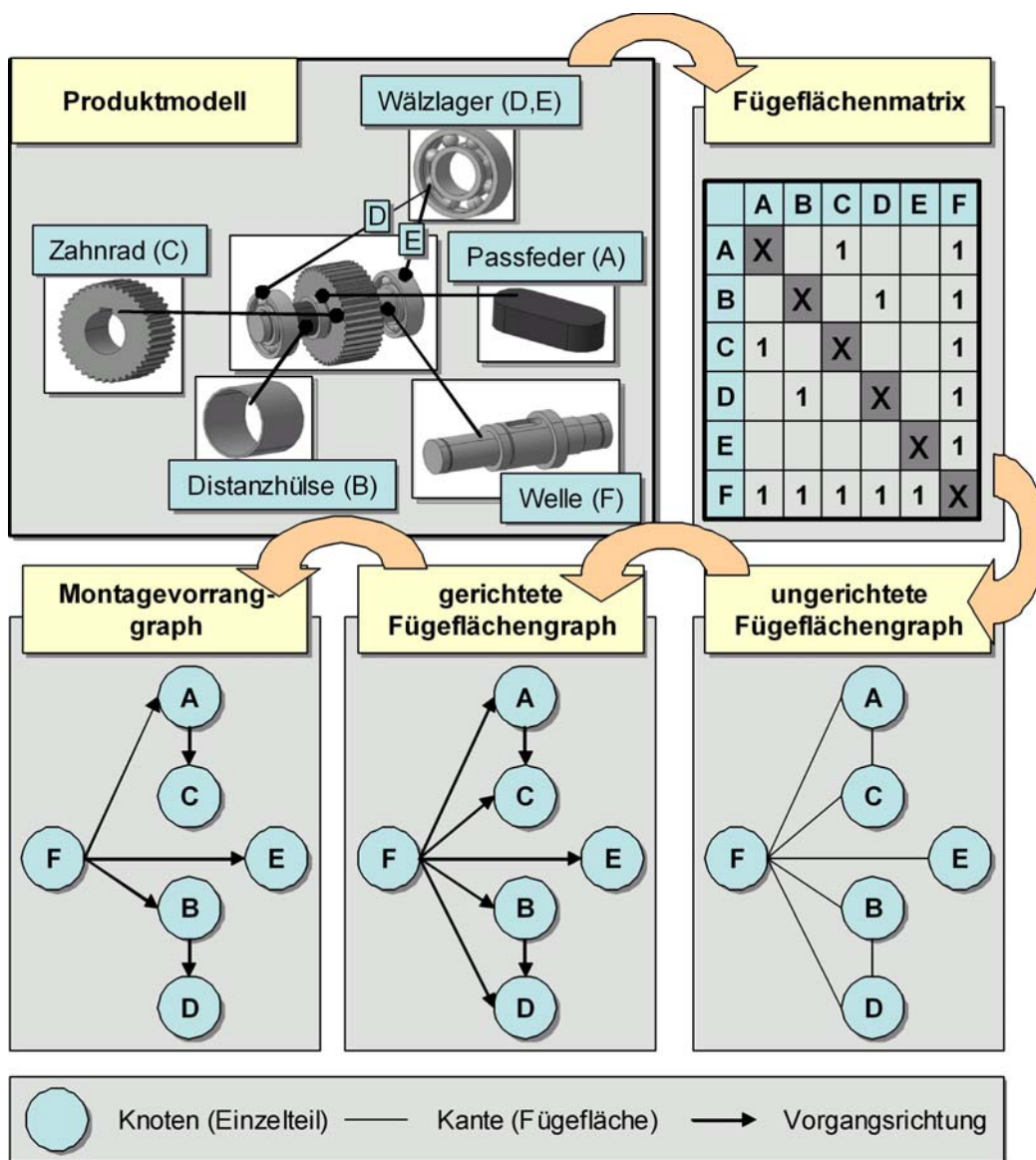


Abbildung 41: Ablauf der Montagevorranggrapherstellung

Es können so neben der Lokalisierung der Fügeflächen auch Flüchtigkeitsfehler aufdeckt werden, bei denen es sich beispielsweise um den Durchmesser einer Bohrung handelt. Die Bohrung steht in diesem Fall zwar mit der Position und der Richtung der Schraube im Einklang, kann jedoch nicht gefügt werden, da der Durchmesser zu klein dimensioniert wurde. Somit kann mit der Feature-Erkennung der Modellreifegrad erhöht oder abgesichert werden. Das beschriebene Konzept kommt der Forderung aus Kapitel 2.4.3.2 nach, ein Featurekonzept zu entwickeln, das mit einer minimalen Anzahl an Zusatzelementen auskommt.

Das Assembly-Featurekonzept besitzt die in Abbildung 42 gezeigten Bausteine. Die Skelettelemente werden wie bereits beschrieben über eine Schnittstellendatei miteinander verbunden. Die Schnittstellendatei bildet eine neutrale Beschreibung der Featureinformationen, die mit Hilfe von Datenbanken und Wissensmanagement in prozessrelevante Daten überführt werden. Die Schnittstellendatei ermöglicht die Kommunikation mit anderen CAx-Systemen, wodurch ein beschleunigter Informationsfluss erzielt wird.

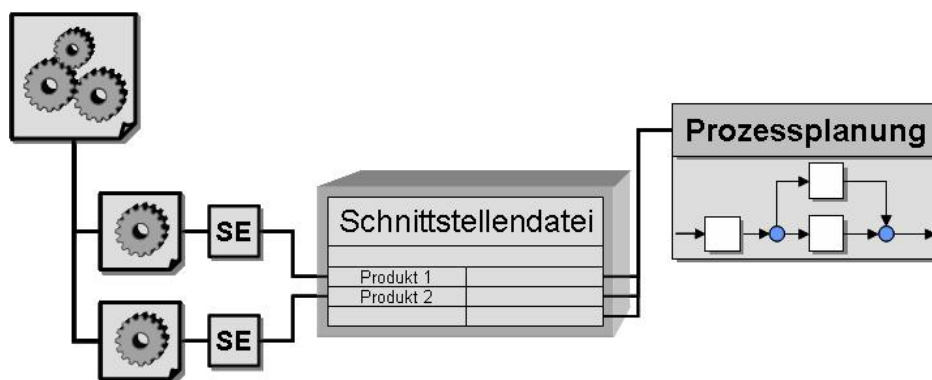


Abbildung 42: Feature-basierte Prozessplanung über ein „neutrales“ Format

Die Schnittstellendatei ist das Basiselement der Verbindung zwischen den Skelettmodellen der Konstruktion und der Produktionsplanung. Über die Interaktion von Skelettelementen und der Schnittstellendatei wird die Montageinformation indirekt verwaltet, wodurch eine Art Assembly Feature oder besser ein Assembly Informationskomplex entsteht, ohne ein zusätzliches Element in die Produktstruktur einzubringen. Die Darstellung der Parameter und Daten der Bauteile und Komponenten, die miteinander in Verbindung stehen, erhöht die Transparenz der Funktion und der Bauteilsicherheit besonders bei Änderungen der Bauteilstruktur. Ein weiterer Vorteil, Verbindungen von Elementen über eine Tabelle darstellen zu können, die bestenfalls mit dem Modell direkt verbunden ist, besteht darin, Parameter miteinander zu verknüpfen. Von dem aufwändigen Konzept des Datentransfers innerhalb der Skelettmodellierung kann leicht abgewichen werden, indem die Methodik durch Beziehungen innerhalb der Tabelle repräsentiert wird. Es findet an dieser Stelle eine Verlagerung des Aufwands statt.

Diese Verlagerung muss abhängig von der eingesetzten Software bewertet werden. Falls die Software keine bauteilübergreifende Verbindungen verwalten kann, stellt die Tabelle eine Möglichkeit dar, die Modellierungsmethode abzubilden.

4.7.4 Fügeflächengraph

Aus der Fügeflächenmatrix kann der Fügeflächengraph erstellt werden. Hierbei handelt es sich um eine Darstellung der Komponenten in Form eines Netzwerks, wobei die Fügeflächen mit einer Verbindungslinie zwischen den Komponenten visualisiert werden. Man unterscheidet zwischen dem gerichteten und dem ungerichteten Fügeflächengraph. Der Unterschied besteht in der Art der Verbindungsdarstellung, die beim ungerichteten Fügeflächengraph durch einfache Linien und beim gerichteten Fügeflächengraph durch Pfeile repräsentiert wird. Die Spitze des Pfeils beschreibt hierbei die zu montierende Komponente, während die Komponente mit der Pfeilbasis diese aufnimmt.

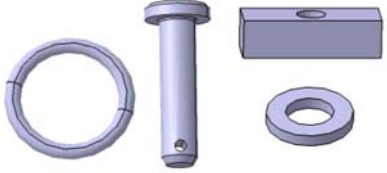
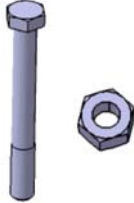

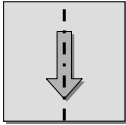
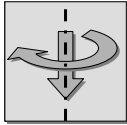
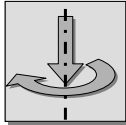
4.7.5 Montagevorranggraph

Der Montagevorranggraph stellt den Prozess der Montage graphisch dar. Er wird auf Basis der Fügeflächenmatrix und des Fügeflächengraphen erstellt, die erste Zwangsbedingungen einer Montage sichtbar machen. Der Fügeflächengraph wird um Prozessinformationen erweitert und in Ebenen gegliedert, die Zwangsfolgen im Montageprozess darstellen. Durch die Analyse von Montagevorranggraphen können sinnvolle Baugruppen ermittelt werden, um Module zu erstellen, die vor der Montage am Produkt geprüft werden können. Ferner können durch eine Modularisierung der Produkte die Montageprozesse strukturiert werden, wodurch eine Austaktung der Montageprozesse erfolgen kann.

4.7.6 Dynamische Analyse des Montageprozesses zur Ermittlung der Montagereihenfolge

Basis der automatisierten Montageplanung sind vordefinierte Montagebewegungen der zu fügenden Komponenten. Die Fügebewegung vieler Standardkomponenten ist klar definiert; hierbei handelt es sich um translatorische oder um translatorisch-rotatorische überlagerte Bewegungen, die in einer bestimmten Position einen definierten Drehwinkel erfahren. Bei Bajonetverbindungen wird beispielsweise während der Totpunktlage eine Druckkraft ausgeübt, die eine Arretierung der Verbindung nach Vollenden der Drehung über eine Rückstellung bewirkt. In Tabelle 8 werden Komponenten mit deren produktspezifischen Fügebewegungen gezeigt.

Tabelle 8: klassische Verbindungen mit spezifischen Fügebewegungen

O-Ring, Zylinderstift, Bolzen, Passfeder, Scheibe	Schraube, Mutter	Bajonettverbindung
		
		
Lineare Fügebewegung Kraft und Dehnung	Translatorisch-rotatorische Fügebewegung	Definierte Rotation nach bestimmter Translation

Ausgehend von den Bewegungen, die in den Komponenten und den zugehörigen Skelettelementen gespeichert sind oder über die Semantik erstellt werden, lassen sich erste Montageprozesse erstellen. Ähnlich der vorgestellten Konzepte der Montageplanung basierend auf der Umkehrung der Demontage wird auch an dieser Stelle eine Umkehrung der Sequenz vorgenommen. Die Komponenten werden in Translationsrichtung von der Basiskomponente, die zuvor definiert werden muss, platziert. Aber auch schon bei den gezeigten Standardkomponenten ist ersichtlich, dass neben der Logik über die Bewegung beim Fügevorgang auch bauteilübergreifende Aspekte berücksichtigt werden müssen. So besitzt bei der Montage zweier Bleche mittels einer Schrauben-Mutter-Verbindung sowohl die Schraube als auch die Mutter die Informationen über ihre Bewegungsmöglichkeiten beim Montageprozess. Die Schraube ist bei der Montage in ihrer Bewegung am Schluss der Montage auf eine Translation eingeschränkt, wobei die Mutter unter allen Winkellagen zum Zielort geführt werden kann. Der eigentliche Prozess des Verschraubens unterliegt verschiedenen Möglichkeiten.

So kann die Schraube oder die Mutter als feststehendes Element betrachtet werden. Es ist jedoch auch denkbar, dass die Schraube entgegengesetzt zur Mutter rotiert wird, um den Anziehvorgang zu beschleunigen. Hilfreich ist an der Stelle, die Ressourcenzugänglichkeit zu betrachten, wodurch sich eventuell Prozesseinschränkungen ergeben. Werden keine Einschränkungen durch die Produktgeometrie oder die Betriebsmittelkonstruktion festgelegt, so kann aus Sicht der Automatisierbarkeit argumentiert werden, dass die Schraube mit ihrem Kopf und der größeren Geometrie für die Handhabungen der Montagebewegung und der Greifaktivitäten besser geeignet ist. Neben den eigentlichen Fügevorgängen können in die

Bewegungssimulation auch Werkzeuge und Ressourcen integriert werden, die entweder als Hüllgeometrie oder als digitales Abbild in die Betrachtungen mit einfließen. Die zusätzliche Analyse der Werkzeuggeometrie stellt eine weitere Montageabsicherung dar, die einerseits die Kollisionen der Werkzeuge mit dem Bauteil anzeigt, andererseits auch Kollisionen der Werkzeuge oder der Ressourcen miteinander beim Fügevorgang der Bauteile untersucht. Das Produkt wird hierzu um Greifflächen für die Werkzeuge und Ressourcen erweitert. Daher kann definiert auf diese Elemente zugegriffen werden, um eine Ressourcenauswahl zu unterstützen. Erfolgreich abgesicherte Montagesequenzen der Komponenten werden mit dem direkten Ressourcen (Greifer, Formnester, usw.) wiederholt und auf Kollision überprüft. Falls keine Durchdringungen von Geometrielementen lokalisiert werden, wird die Montageplanung in einen höheren Reifegrad überführt, wo kollisionsfreie Simulationen um die zugehörigen Ressourcen des Fertigungssystems, die keinen direkten Kontakt zu den Komponenten besitzen, erweitert und erneut überprüft werden. Neben der Absicherung in Bezug auf Kollisionen werden Layoutoptimierungen vorgenommen, indem die Auswirkungen auf die Taktzeit an unterschiedlichen Standorten der Ressourcen ermittelt werden. Die vorgestellte Systematik wird mit dem drei Ebenenmodell der Montageabsicherung, das in Abbildung 43 dargestellt ist, umgesetzt.

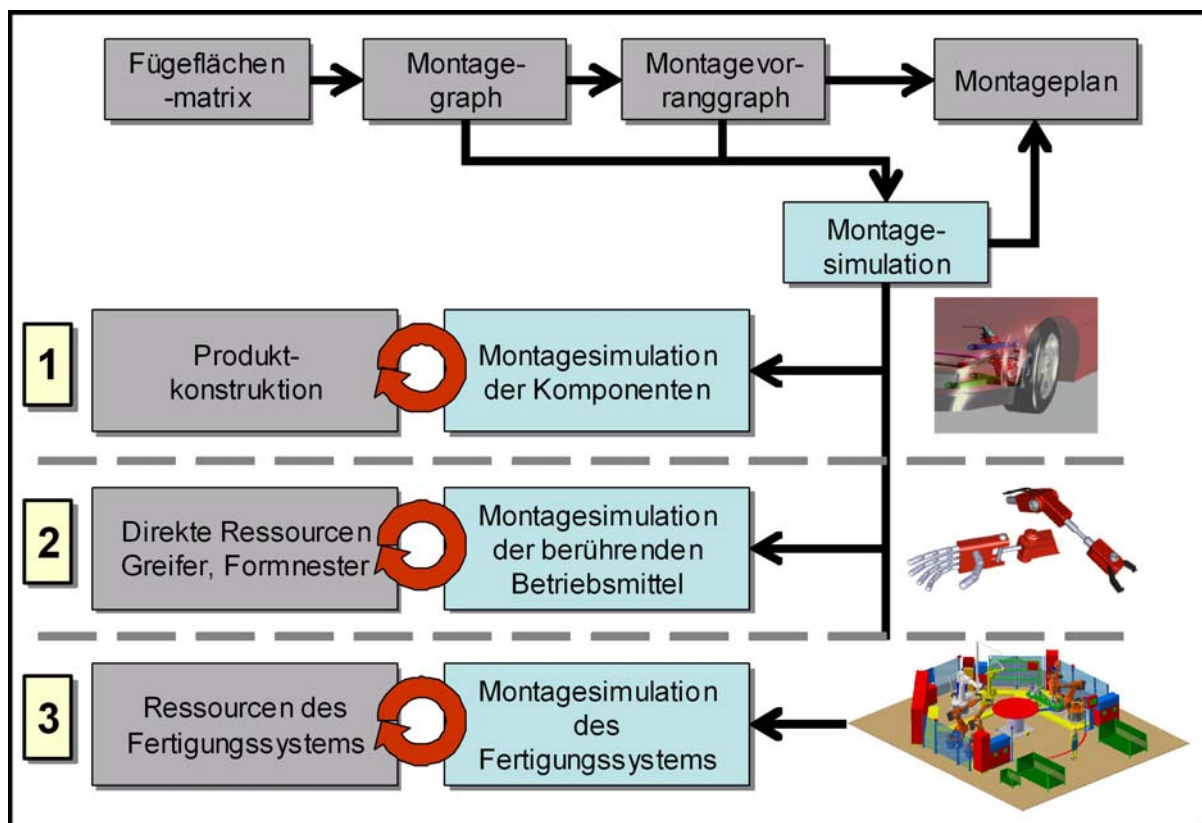


Abbildung 43: Absicherungsstufen der Montagesimulation mit Rückkopplung zur Konstruktion und Prozessplanung [BIBo06b]

Auf der obersten Ebene werden die Komponenten des zu montierenden Produktes auf Kollisionen bei der Montagebewegung überprüft. Für die Ermittlung möglicher Montagereihenfolgen müssen Sequenzen simuliert werden. Wird eine Kollision zwischen zwei Komponenten angezeigt, können alle Montagereihenfolgen, die diese Sequenz als direkte oder indirekte Folge besitzen, eliminiert werden. Die Simulationsergebnisse der Komponentenebenen werden als mögliche Sequenzen für die zweite Ebene in Betracht gezogen. Die zweite Ebene der Montageplanung überprüft Kollisionen von Komponenten mit direkt in Verbindung stehenden Ressourcen wie Greifern oder Formnestern sowie der Ressourcen untereinander. Somit reduziert sich die Anzahl der möglichen Montagesequenzen erneut. Auf der dritten Ebene der Montageabsicherung werden neben den direkten Ressourcen auch die Komponenten des Produktionssystems berücksichtigt. Hierbei soll gewährleistet werden, dass die Ressourcen sich bei der Montage nicht gegenseitig behindern.

Bei der kinematischen Simulation des Fertigungssystems können ungünstige Prozesse lokalisiert werden. So ist es möglich, Bewegungsabläufe zu simulieren, die sowohl die Taktzeit als auch die Machbarkeit ermitteln, wodurch simulierte Kosten mit den Zielkosten verglichen werden können. Werden in den einzelnen Ebenen keine kollisionsfreien Sequenzen gefunden, so ist die Produktkonstruktion angehalten, Kollisionen zu eliminieren, indem die Geometrie der Komponenten überarbeitet wird. Kommt es zu Kollisionen in der zweiten Ebene der Montageabsicherung, hat man die Möglichkeit, die Komponenten oder die Betriebsmittel zu überarbeiten. Im Bereich der Betriebsmittel kann neben einer Geometriemodifikation auch eine Veränderung der Position angedacht werden. Auf der dritten Ebene kann es neben Kollisionen, die durch Standortmodifikationen der Ressourcen behoben werden können, zu Abweichungen von den Plankosten als Folge zu hoher Taktzeiten kommen. Daher können Ressourcernalternativen weiter eingeschränkt oder neue Steuerungsstrategien erforderlich werden.

4.7.7 Bewertung der Automatisierbarkeit von Montageoperationen

In vielen Unternehmen werden Montagetätigkeiten von Hand ausgeführt. Hierbei werden zwischen 25-50% der Produktionskosten erzeugt. In der Elektronikindustrie spricht man sogar von Werten zwischen 40-60%, die für die Löhne der Montagearbeiter gezahlt werden [Klap92]. Dieser Umstand zwingt Unternehmen häufig, Fertigungseinrichtungen in Billiglohnländer zu verlagern, um Produkte mit konkurrenzfähigen Preisen anbieten zu können. Bei dem zuvor beschriebenen Konzept der automatisierten Montageprozessplanung wird die Montagesequenz hinsichtlich der Anzahl geradliniger Fügeoperationen optimiert, da sie die geringste Taktzeit für eine automatisierte Montage zur Folge haben, sodass auch in Ländern

mit hohen Lohnkosten preisgünstiger produziert werden kann. Die Bewertung für eine automatisierte Montage ist ähnlich einer Prozess-FMEA. Es wird komponentenweise überprüft, ob eine Zugänglichkeit möglich ist. Das Zugänglichkeitskriterium bezieht sich auf die Montagebewegung, die Möglichkeit des Werkzeughandlings und die Wiederholgenauigkeit der Ressource, die zum Einsatz kommen. Die Montagebewegung wird hinsichtlich eines Kollisionsrisikos analysiert, indem der Abstand zu anderen Komponenten oder Ressourcen überprüft wird. Das Werkzeughandling wird in der Simulation der Montage mit den Volumenkörpern der Werkzeuge getestet und bewertet. Ein weiteres Risiko der Montage stellt die Wiederholgenauigkeit der Ressourcen gepaart mit den Toleranzfeldern der Bauteile dar, da diese bei ungünstiger Konstellation eine Montage hemmen oder sogar blockieren kann. Daher ist es ebenfalls von enormer Bedeutung, die statistisch verteilten Fehler der Komponenten und der Fertigung in die Simulation des Produktionsprozesses einfließen zu lassen, um einen möglichst realen Produktionsprozess abzubilden. Bei den Bauteilen kann die Fertigungstoleranz als Hüllgeometrie eingebracht werden, die dann wiederum als Maß für die Kollisionsprüfung herangezogen wird und das Handling der Ressourcen beeinflusst.

4.7.8 Statische Analyse des Montageprozesses zur Ermittlung der Montagereihenfolge

Die Problematik der dynamischen Analyse des Montageprozesses besteht darin, dass die eingesetzte Software nur den statischen Fall berücksichtigt und somit bei der Prüfung der Montagereihenfolge nur eine Kollision in einem Simulationslauf ermittelt werden kann. Hierbei wird vorausgesetzt, dass das zusammengesetzte Produktmodell überschneidungsfrei konstruiert ist. Zur Realisierung der statischen Analyse des Montageprozesses wird die Bewegung beim Fügen als weitere Komponente in das Produktmodell integriert. Hierfür wird ein so genanntes Transformationsvolumen (TfV) erstellt, das den Bewegungsraum, den die Komponenten während des Fügeprozesses einnehmen, beschreibt. Aufgrund der Kollisionen von Komponenten und TfVs können Restriktionen für die Montagefolge abgeleitet werden, über die kollisionsfreie Montagereihenfolgen erstellt werden.

4.7.8.1 Transformationsvolumen (TfV)-Einsatz in der Montageplanung

Das Ableiten der Montagereihenfolge auf Basis der Transformationsvolumina (TfV) eines Produktmodells repräsentiert ein statisches Verfahren in der Montageplanung. Bei den Fügebewegungen handelt es sich wie bei dem 3-Ebenen-Modell der Montageabsicherung standardmäßig um Linear-Bewegungen, wobei die Komponenten alternativ auch über Trajekto-

rien geführt werden können. Hierbei sind die in Abbildung 44 gezeigten Kollisionsarten eines TfVs möglich:

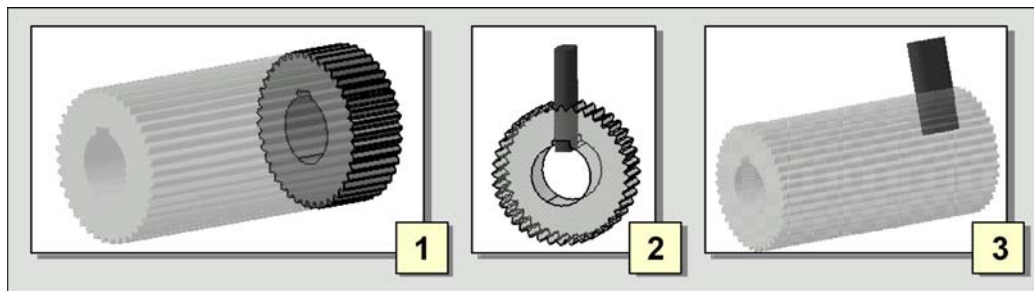


Abbildung 44: Kollisionsarten eines TfVs

1. Eine Kollision mit dem eigenen bewegten Bauteil, das die Basis für das TfV darstellt, ist immer vorhanden und daher zu vernachlässigen.
2. Die Kollision mit einem anderen Bauteil in Montigelage: aufgrund dieser Kollision wird die Montagereihenfolge ausgeschlossen, da der Montageweg nicht kollisionsfrei erfolgen kann. Aufgrund dieser Kenntnis kann die Bedingung abgeleitet werden, dass das Bauteil des TfV vor der Komponente, die mit dem TfV kollidiert, montiert werden muss oder eine andere Fügebewegung realisiert werden muss, um die Kollision zu vermeiden. Abbildung 44 zeigt in Bild 2 die Kollision des Zahnrades in Bauteillage mit dem TfV der Passfeder. Aufgrund dieser Tatsache wird die Bedingung abgeleitet, dass die Passfeder vor dem Zahnrad zu fügen ist.
3. Eine Kollision mit einem TfV einer anderen Komponente: Sie legt nur in Kombination mit Aussage 2 eine Reihenfolge fest. Die Kollision von TfV ist von Interesse bei der Erarbeitung von Möglichkeiten der parallelen Montage von Komponenten.

Liegt das Bauteil A im TfV von B, so muss B vor A montiert werden. Aus dieser Bedingung lassen sich zwei allgemeingültige Verfahren ableiten, die die Montagereihenfolge festlegen:

1. Das Verfahren sagt, dass die Komponenten, die keine Kollision mit einem TfV eines anderen Körpers besitzen, zuerst montiert werden. Im nächsten Schritt werden die TfV des montierten Bauteiles ausgeblendet oder gelöscht, um ein nächstes Bauteil zu finden, das keine Kollision mit einem TfV außer dem eigenen hat. Diese Methode wird sukzessive verfolgt, bis alle TfV aus dem Gesamtmodell eliminiert worden sind und die Montagereihenfolge erstellt ist. Dieser Sachverhalt ist noch einmal in Abbildung 45 dargestellt.
2. Alle Montagerestriktionen des Produktmodells werden in einem Schritt erfasst und dienen der Filterung aller möglichen Montagereihenfolgen. Basierend auf der Anzahl der zu fügenden Komponenten werden die $n!$ möglichen Reihenfolgen erstellt. Im zweiten Schritt werden die Bedingungen aus der Kollisionsanalyse abgearbeitet, indem alle erzeugten Reihenfolgen untersucht werden. So werden z.B. durch die Bedingung „Komponente B vor Komponente A“ alle Reihenfolgen eliminiert, die dieser Anforderung nicht entsprechen. Auf diese Weise resultieren nach der Interpretation aller Bedingungen die verbleibenden möglichen Montagereihenfolgen.

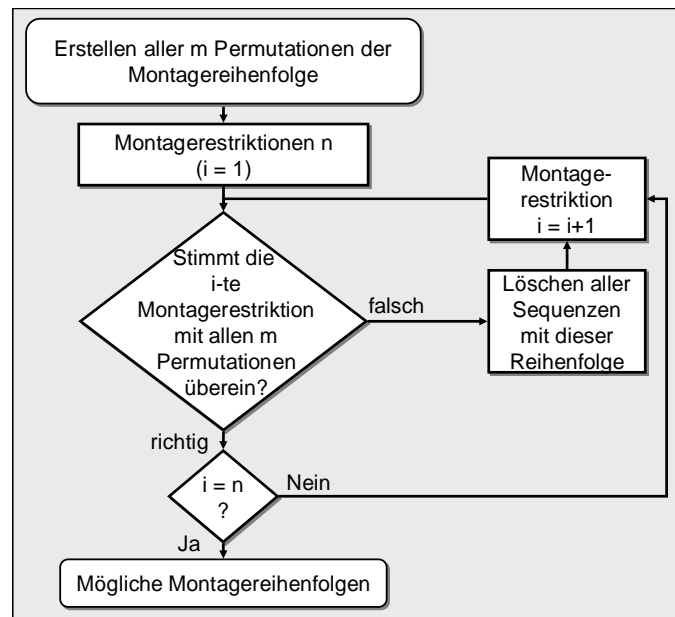


Abbildung 45: Flussdiagramm der Ablauflogik bei der Ermittlung der Montagereihenfolge

Zusätzlich zur Überprüfung auf kollisionsfreie Montagebewegungen können auch Bedingungen von modifizierten Produkten miteinander verglichen werden. Wird durch die Veränderung einer Komponente keine zusätzliche Montage-Bedingung erstellt oder verlieren die bestehenden Montage-Bedingungen ihre Gültigkeit nicht, so hat die Geometriemodifikation des Bauteils keine Auswirkung auf die Montagereihenfolge aus Sicht der Komponentenreihenfolge. Werden ebenfalls keine Einschränkungen für Greifer oder sonstige Werkzeuge festgestellt, kann auch hier von einem abgesicherten Zustand ausgegangen werden. Wird jedoch eine dieser Aussagen verletzt, müssen die Planungsebenen der Montage erneut abgesichert werden, wodurch Folgestufen ebenfalls einer erneuten Absicherung bedürfen. Diese Aussagen können aufgrund des statischen Modells erstellt werden, da es die Basis der Bedingungen darstellt. Bei der Verwendung von dynamischen Analysen ist der Aufwand bei Produktmodifikationen sehr hoch, da das Produkt erneut für alle Absicherungsphasen analysiert werden muss. Nachdem kollisionsfreie Montagereihenfolgen ermittelt worden sind, werden diese zur Visualisierung als Simulation wiedergegeben. Die schon für die Erstellung des TfV benötigte Simulation der Bewegung der einzelnen Komponenten wird als Einzelelement in eine Sequenzsimulation integriert. Die Hintereinanderreihung der einzelnen Simulationssequenz resultiert in einer Gesamtsimulation des Montageprozesses. Die Montagesimulation wird für alle möglichen Montagereihenfolgen erstellt, wodurch die Montagesschritte visuell unterstützt bewertet werden können. Durch die Möglichkeit der Erzeugung von TfV können die Montagebewegungen statisch dargestellt werden. Dieser Ansatz zeigt ein universell einsetzbares Konzept auf, Montagebewegungen zu analysieren. Neben den eigentlichen Kollisionen kann

auch der Raum bei der Montagebewegung bewertet werden. Durch eine Erweiterung der TfV der Bauteile um die TfV der Montageressourcen werden die Räume bestimmt, die bei der Montagebewegung in Anspruch genommen werden.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass das statische Bild der Bewegung einfacher analysiert werden kann, da der Prozess in einem Modell aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden kann. Bei Bewegungsanimationen besteht sonst der Aufwand, die Simulation aus verschiedenen Blickwinkeln immer wieder ablaufen zu lassen und den Bewegungsverlauf zu bewerten. Unter Zuhilfenahme des Körpers der Bewegung kann die Planungsabteilung leichter den in Anspruch genommenen Raum bei der Bewegung hinsichtlich Kollisionen untersuchen. Neben der Bewegung der einzelnen Komponenten und deren Montageressourcen können nun auch die Bewegungsabläufe aller Bauteile und deren Montageressourcen bewertet werden. Dies ermöglicht es den Planern, eine optimierte Montagesteuerung zu erstellen, die Parallelbearbeitung und Montagebewegungen aufeinander abstimmt. Kommt es zu Kollisionen zwischen zwei TfV, wird der Planer darauf hingewiesen, dass eine Abhängigkeit besteht und der Montageprozess nicht uneingeschränkt parallel vollzogen werden kann.

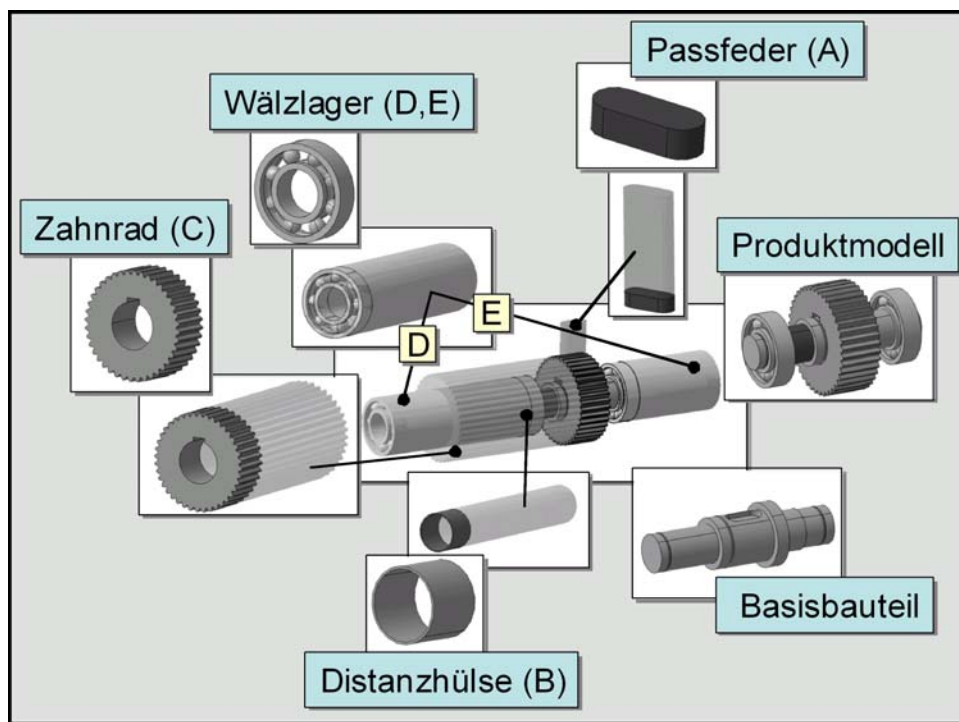


Abbildung 46: TfV-Modell eines Getriebes

An dieser Stelle können Optimierungen der Werkzeugbewegungen durchgeführt werden, wodurch ein Folgeprozess bereits dann den Arbeitsraum einnehmen kann, wenn die Ressource des Vorgängerprozesses diesen verlässt. Durch diese Vorgehensweise wird eine kollisionsfreie Montage gewährleistet. Um einen solchen Ansatz zu realisieren, werden zusätzliche

Hilfselemente mit einem Makro erzeugt. Es wird ein weiterer Körper erstellt, der die Montagebewegungen der Komponenten beinhaltet. Diese Bewegungen werden durch Polygonzüge repräsentiert, die aus mehreren Punkten bestehen, um einen komplexen Bewegungsablauf simulieren zu können. Über diese Punkte kann die Montagebewegung auch nachträglich modifiziert werden, indem die Koordinaten verändert werden. Diese Modifikation wird nur dann in Anspruch genommen, wenn die Komponenten nicht linear gefügt werden können. Hierbei wird der Bewegungsablauf bei der Demontage herangezogen, um eine kollisionsfrei Bewegungsrichtung zu lokalisieren. Bei der Umsetzung in CATIA V5 muss für die Erzeugung des TfV eine Wiedergabe für die Bewegungssimulation erstellt werden. Diese wiederum basiert auf regelgesteuerten Simulationen der Körper, die sich auf definierten Bahnkurven bewegen. Ausgehend von dieser Bewegungssimulation wird das TfV einer Komponente, einer Baugruppe oder der Ressource erstellt.

In Abbildung 46 ist exemplarisch das TfV-Modell eines Getriebes aufgezeigt, das aus den Komponenten Distanzhülse, Passfeder, Zahnrad, Lager (D, E) sowie der Welle als Basisbauteil besteht. Die Sicherungsringe, die die Fixierung auf der Welle gewährleisten, sind nicht visualisiert, da sie durch ihr geringes Volumen nicht ausreichend dargestellt würden und die Konzeptbeschreibung durch die Abwesenheit nicht leidet.

In einem ersten Schritt wird die Welle als Basisbauteil identifiziert. Die Auswahl der Basis Komponente unterliegt hierbei der Regel, dass es sich um das Bauteil mit den meisten Kontaktflächen zu den anderen Komponenten besitzt. Die Bestimmung der Basis Komponente kann auch durch andere Kriterien erfolgen. Der zweite Schritt dient der Ableitung von Zwangsbedingungen der Montage, die aufgrund der Geometrie und der Fügebewegung entstehen. Basierend auf den Zwangsbedingungen werden die Montagereihenfolgen eliminiert, die den Bedingungen nicht entsprechen. Das Ergebnis sind alle möglichen Montagereihenfolgen, die sich für die Realisierung des Produkts eignen. Über einen weiteren Auswahlmechanismus wird aus den verbleibenden Sequenzen ein Montageebenenmodell erstellt, welches eine erweiterte Darstellung des Montagevorranggraphen bildet, wobei die Sequenzen spaltenweise analysiert werden. So bilden alle Komponenten, die in der ersten Spalte stehen, auch die erste Montageebene, da ihre Reihenfolge untereinander unabhängig ist. Ausnahmen bilden Komponenten, die an allen Positionen der möglichen Montagefolgen vorkommen. Diese Komponenten werden in einer separaten „unabhängigen Montage-Ebene“ platziert, da sie keinen Zwangsbedingungen unterliegen. Dann werden die Einträge der Elemente der ersten Montageebene aus den verbleibenden Spalten gelöscht. Mit der nächsten Spalte wird nach dem gleichen Verfahren bearbeitet. Das Resultat dieser Vorgehensweise ist ein Ebenen-Modell der

Montage, welches durch die auch schon aus dem Montagevorranggraphen bekannten Pfeile erweitert wird, um direkte Beziehungen anzeigen zu können. Die maximale Anzahl der Beziehungen zu einer Komponente gibt die Anzahl der Strukturebenen wieder. Eine Strukturebene repräsentiert Bedingungen, die die Bauteile untereinander besitzen. Innerhalb einer Strukturebene können Komponenten die Montageebene wechseln, wenn diese eine freie Stelle aufweist. Ist dies der Fall, besteht keine Zwangsbedingung in dieser Strukturebene zwischen den Montageebenen. Die Verschiebung von Bauteilen innerhalb einer Strukturebene kann zur Optimierung des Montageprozesses herangezogen werden. Abbildung 47 zeigt in einer Darstellung zwei Montagegraphen, die aus den beiden Platzierungsmöglichkeiten der Komponente B resultieren. Optimierungen können einerseits technischen oder wirtschaftlichen Charakter besitzen. So kann beispielsweise die gezeigte Montage eines Zahnrades über eine zuvor montierte Hülse unpraktisch sein, da es sich bei der Hülse um ein bewegliches Objekt handelt. In der Prozess-Ebene wird die Parallelmontage der Komponenten Hülse und Zahnrad ausgeschlossen, da zwei Werkzeuge in ein und demselben Bewegungsraum operieren müssten.

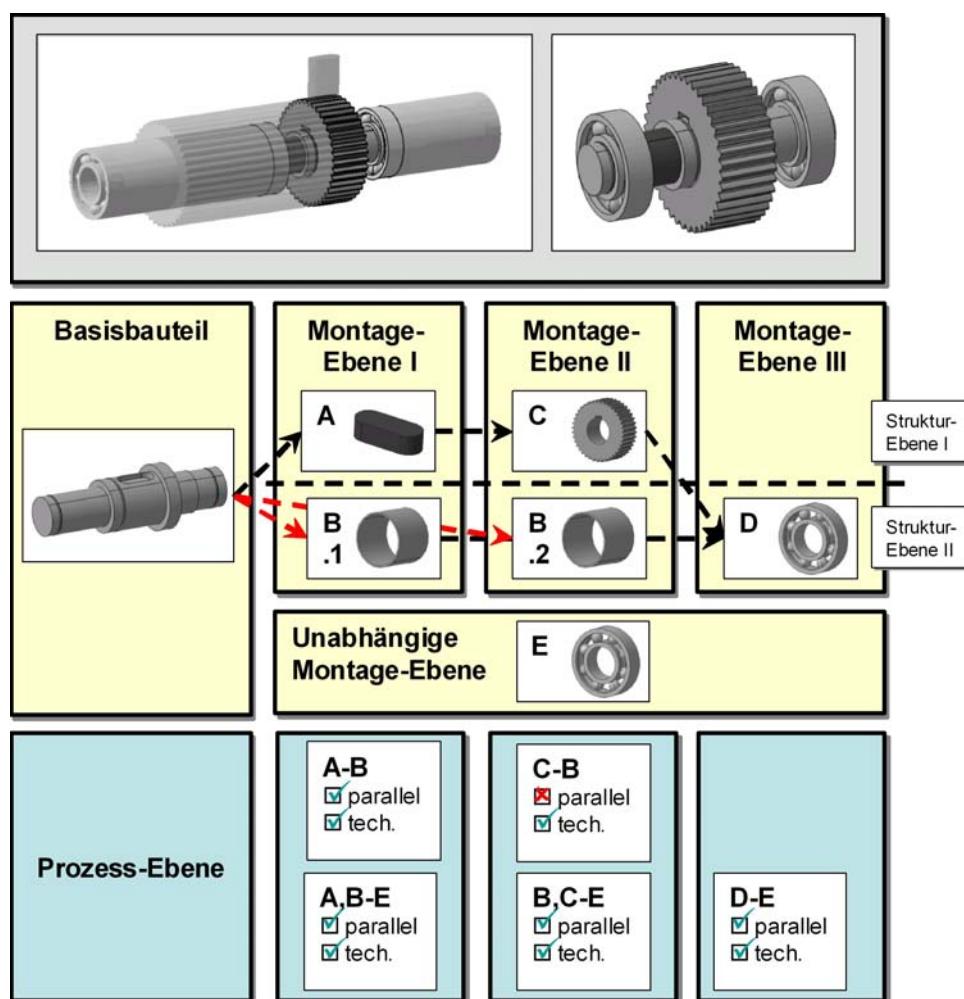


Abbildung 47: Montageebenenmodell des Getriebes mit zwei Modifikationen (B.1/B.2)

Die Montage der Distanzhülse parallel zur Passfeder bei Variante B.1 ist nicht ausgeschlossen, wodurch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten die Anzahl der Prozessschritte reduziert werden kann. An dieser Stelle muss nun entschieden werden, ob die wirtschaftlichen Vorteile die möglicherweise technologisch ungünstige Konstellation ausgleichen oder sogar überwiegen. Um weiche Kriterien sichtbar zu machen, werden die Bauteile in den Montageebenen und den Strukturebenen mit zusätzlichen Informationen erweitert, die sich einerseits auf die Möglichkeit einer Parallelmontage, andererseits auf die Montagereihenfolge bezüglich den eingesetzten Montagetechnologien in einer Montageebene beziehen. Unter weichen Kriterien der Montageplanung werden technologische Aspekte verstanden, die weitere Bedingungen und Einschränkungen für die Montageplanung darstellen, wodurch Sequenzen, die eine kollisionsfreie Montagefolge repräsentieren, weiter reduziert werden.

Mögliche Parallel-Bearbeitungen berücksichtigen nur den geometrischen Aspekt der Komponenten und deren Montagebewegung. Sind keine Kollisionen zwischen zwei TfV zu lokalisieren, können diese parallel montiert werden. Am Beispiel des einfachen Getriebemodells kann man in Abbildung 48 Bild 1 erkennen, dass eine Montage der Passfeder parallel zur Hülse erfolgen kann.

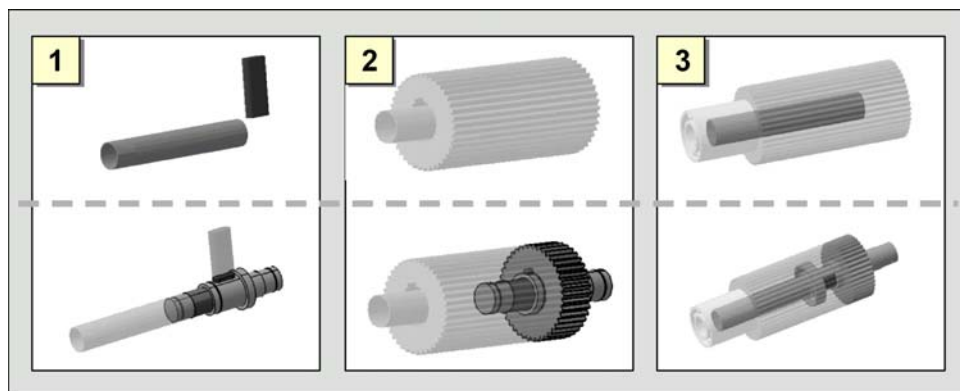


Abbildung 48: TFV zur Planungsunterstützung parallel ausführbarer Montageschritte

Abbildung 48 zeigt in der oberen Ebene die Bewegungen der Komponenten und in der unteren Ebene die Bewegungen der Komponenten als auch die bereits montierten Bauteile. Besitzen mehrere Bauteile den gleichen Bewegungsraum, so sind sie nicht uneingeschränkt parallel montierbar. Ebenso kann der Einsatz zweier Ressourcen, die in den gleichen Raum eingreifen, nicht uneingeschränkt kollisionsfrei vollzogen werden. Es besteht jedoch die Möglichkeit, mehrere Komponenten durch eine Ressource zu platzieren, wodurch eine parallele Montage wieder als Alternative betrachtet werden kann. Die Komponenten müssen hierzu die gleiche Fügerichtung und einen ähnlichen Fügeweg bei der Montage zurücklegen. Der Raum der Fügebewegung wird in Abbildung 48 gezeigt. Im Fall von Spalte 2 und 3 in Abbildung 48

besteht die Möglichkeit zwei oder sogar drei Komponenten mit einer Fügebewegung zu platzieren. Das Werkzeug für die Montage nimmt im Fall von Spalte 2 die Komponenten Distanzhülse und Zahnrad auf und schiebt die beiden Komponenten auf die Welle. Die beiden TfVs besitzen keine Kollision. Im Fall von Bild 3 besteht eine Kollision zwischen der Hülse und dem Lager D, sowie eine Kollision zwischen dem Zahnrad und dem Lager D, wodurch eine Zwangsfolge abgebildet wird. Diese Zwangsfolge wird bei einer parallelen Montage aller Komponenten ebenfalls eingehalten und somit indirekt bei der Montage mit einem Werkzeug und einer Montagebewegung berücksichtigt.

In der Prozess-Ebene des Montageebenenmodells werden auch technische Restriktionen, die in Abbildung 47 mit „tech.“ bezeichnet werden. Unter Technologie- oder Technik-Restriktionen versteht man die Einschränkung basierend auf nicht kombinierbaren technologischen Fertigungsprozessen. Die Fertigungsprozesse Schweißen und Fügen durch Kleben sind bei einer räumlichen Nähe nur schwer zu kombinieren, da die Erwärmung der Komponente Auswirkungen auf die Klebestelle hat und somit die Festigkeit der Klebnaht beeinflussen kann. Neben der Erwärmung muss beim Kleben ebenfalls die Reinheit der technischen Oberfläche gewährleistet werden, wodurch die Parallelisierung von Schweißen und Kleben ohnehin ausgeschlossen werden muss. Damit die Qualität einer Klebnaht gewährleistet werden kann, muss die Reinheit der Oberfläche bestenfalls unmittelbar vor dem eigentlichen Klebprozess geprüft werden [Bern01, Fisc05, BIFO06]. Dieser technologische Sachverhalt kann dargestellt und kann somit bei der Sequenzplanung berücksichtigt werden.

Die Reihenfolge der Montageebenen beschreibt Zwangsfolgen der Montage. Die Elemente einer Montageebene hingegen sind jedoch an keine Reihenfolge gebunden und können daher in beliebiger Reihenfolge montiert werden. Die Anzahl aller kollisionsfreien Montagesequenzen ermittelt sich somit aus der Summe aller Permutationen der Montageebenen. Das Konzept der Montageebenen ist eine verbesserte Darstellung des Montagevorranggraphen, da durch die Ordnung der Komponenten innerhalb der Ebenen „weiche“ geometrische und technologische Bedingungen berücksichtigt werden können.

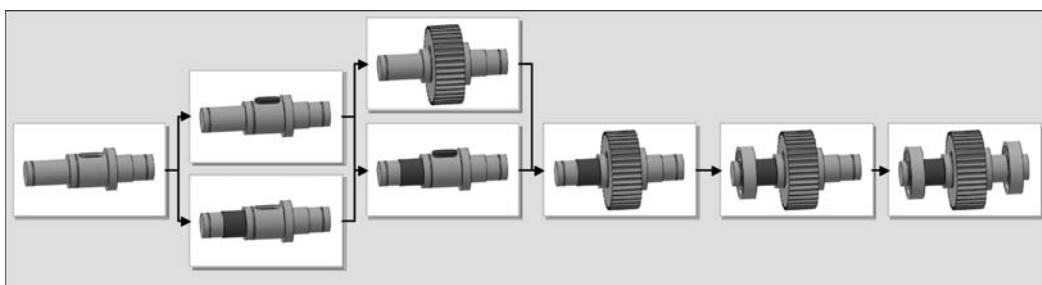


Abbildung 49: Mögliche Montagesequenzen eines vereinfachten Getriebemodells

Aus dem Montageebenenmodell werden mögliche Montagesequenzen abgeleitet. Abbildung 49 zeigt kollisionsfreie Montagesequenzen, wobei die unabhängige Montage-Ebene als vierte Montageebene betrachtet werden kann.

Das Montageebenenmodell kann als Eingabeinformation für weitere Planungsaktivitäten dienen. Basierend auf den Montageebenen und den Strukturebenen können Taktzeitoptimierungen vorgenommen werden, indem verschiedene Alternativen der Montagereihenfolge, die die Restriktionen nicht verletzen, analysiert und bewertet werden. Das Ergebnis ist ein hinsichtlich der Taktzeit „ausbalancierter“ Montageprozess [Amen01] mit einer wirtschaftlichen und technologisch abgesicherten Montagesequenz. Das Montageebenenmodell kann als Dokument der Qualitätstechnik dienen, indem Bewertungsaspekte hinterlegt werden, die zur Verbesserung der Produktion und der Qualität der Produkte beitragen. Die Prozessdokumentation in Form des Montageebenenmodells kann auch zur Analyse der Prozessfähigkeit und einer Risikoabschätzung dienen, da die Restriktionen der Planung auf einer fundierten Datengrundlage basieren, indem Sicherheitsabstände in die Betrachtung der Montage einfließen.

Wird die Erstellung des TfV in der eingesetzten CAD-Software nicht unterstützt, so kann auf die Alternative „Simulationsstopp bei Kollision“ zurückgegriffen werden, um die verschiedenen Alternativen der Montagereihenfolge durchzuspielen und zu analysieren. Bei der Ermittlung der Montagereihenfolge durch Kollisionsprüfung der TfV handelt es sich um einen systematischen Ansatz, der einfach zu interpretieren ist und eine hohe Aussagekraft besitzt.

Ein weiterer Vorteil des Konzeptes besteht in der Umsetzung in einem einzigen CAD-System, wodurch die Schnittstellenproblematik umgangen wird und die Softwarekosten reduziert werden, da Schulungen, Lizenzgebühren und Datenaustauschplattformen entfallen.

4.7.8.2 Absicherung der Planung

Ein Vorteil der integrierten Produktentstehung besteht in der Stabilität und Absicherung der Planung. Unkritisch ist die CAD-CAM-Kopplung von bestehender Funktionsgeometrie, da die Modelle über die dynamische Kopplung zeitnah Konstruktionsänderungen an die Fertigungsplanung übertragen. Sind jedoch konzeptionelle Änderungen im Bereich der Funktionsgeometrie vorzunehmen, so muss das Makro der automatisierten Verknüpfung erneut ausgeführt werden, um das Prozessmodell zu erstellen. Die Produktvarianten oder Produktalternativen können unter verschiedenen Versionsnummern in der zentralen Datenbank abgelegt werden, um alternative Produkte und Prozesse wirtschaftlich und technologisch bewerten zu können. Im Bereich der Montageplanung wird der Reifegrad der Produktentstehung basierend auf dem 3-Ebenen-Konzept der Montageabsicherung überprüft. Produktänderungen müssen hinsichtlich aller drei Ebenen neu bewertet werden, indem sie entweder den kompletten Pla-

nungszyklus erneut durchlaufen oder der bestehende Prozessplan modifiziert wird. Innerhalb der Montageplanung zielt die Prozesssicherheit auf die Absicherung der Montagereihenfolge ab, die die Grundlage des Prozessplans darstellt. Daher muss bei Konstruktionsänderungen überprüft werden, ob die Modifikationen Änderungen in der Montagefolge erfordern. Die Montagefolgen werden unter Berücksichtigung von Translationsvolumina nur dann weiter eingeschränkt, wenn zusätzliche Montagerestriktionen aufgrund von Kollisionen erforderlich werden. Ist dies nicht der Fall, besitzt der zuvor erstellte Prozessgraph immer noch seine Gültigkeit. Es kann jedoch bei Produktmodifikationen vorkommen, dass Bedingungen hinsichtlich der Reihenfolge entfallen und sich somit zusätzliche kollisionsfreie Montagereihenfolgen ergeben. Dieser Umstand kann durch Designreviews forciert werden, wenn die Montageplanung mit den zur Verfügung stehenden Montagereihenfolgen keine automatisierte Montage innerhalb der angestrebten Zielkosten gewährleisten kann.

4.7.8.3 Sicherheitsbereiche

Neben den eigentlichen Bauteilkollisionen können auch Bereiche von besonderem Interesse abgebildet werden. So besteht beispielsweise die Möglichkeit aus Sicht des Qualitätswesens, Funktionsgeometrie bei der Montage mit besonderer Vorsicht zu behandeln. Der Forderung könnte durch einen vergrößerten Sicherheitsabstand nachgekommen werden, indem dieser Bereich durch ein um den Sicherheitsabstand vergrößertes Volumen beaufschlagt wird. Die Information über den Sicherheitsabstand sollte im Feature hinterlegt sein, damit eine zusätzliche Geometrie automatisiert erzeugt werden kann. An dieser Stelle gibt es zwei Möglichkeiten dieses Volumen zu integrieren:

1. Durch eine zusätzliche Komponente: platziert auf dem Bauteil, wodurch eine Kombination der beiden Bauteile entsteht.
2. Erweiterung der bestehenden Geometrie: die Geometrie wird explizit dem Bauteil zugeordnet und ist Teil der Bauteilgeometrie, die je nach Bedarf aktiviert wird.

Diese Modellerweiterungen erhöhen somit die Wissensrepräsentation der Modelle, da über die Geometrie Prozessrestriktionen visualisiert werden. Durch eine solche Integration von Qualitätsaspekten in das Produktmodell können besonders gekennzeichnete Bereiche automatisiert in der Montageplanung berücksichtigt werden.

4.7.8.4 Konzeptunabhängigkeit

Das vorgestellte Konzept der Montageplanung kann auch unabhängig von der Verwendung der Feature-Technologie eingesetzt werden. Die erstellten Programme sind daher unabhängig von der Skelettmodellierung in der Lage, basierend auf anderen Steuerelementen, die den Komponenten zugewiesen werden müssen, eine automatisierte Weggenerierung zu ermögli-

chen. So besteht die Möglichkeit, einen strukturierten Montagevorranggraphen mit der Unterteilung in Montageebenen und Strukturebenen zu erstellen. Ebenso kann die automatisierte CAD-CAM-Kopplung basierend auf der Feature-Technologie unabhängig von den anderen Modulen der Planungsunterstützung eingesetzt werden. Jedoch spielt das Konzept seine Stärke nur in Kombination aller vorgestellter Module aus. Ziel ist es, weitere Module zu integrieren, um weitere Automatisierungen von Aufgaben zu erzielen. Durch die Möglichkeit zur Bildung von Feature-Kombinationen können weitere Abteilungen integriert werden.

4.8 Fügen durch Schweißen

Neben der Ermittlung der Montagereihenfolge besteht ebenfalls die Möglichkeit, den Schweißprozess ausgehend von der Skelettmodellierung zu unterstützen. In diesem Kapitel wird exemplarisch der Punktschweißprozess über Feature-Elemente abgebildet. Bei der Füge-technologie werden zwei Blechkomponenten miteinander verbunden, daher müssen die beiden Komponenten über das Feature-Element verknüpft werden. Neben den zu fügenden Bauteilen stellt die Schweißzone den Bereich von besonderem Interesse dar, da dieser die Qualität des Zusammenhaltes bestimmt. Um die Schweißzone charakterisieren zu können, müssen die Prozessparameter definiert werden. Die Ausprägung der Schweißzone wird einerseits durch die Dicke der Bleche und andererseits durch die Schweiß-Stromstärke bestimmt. Damit von einer guten Schweißung ausgegangen werden kann, besitzt die Schweißlinse eine geometrische Ausprägung, die in Abhängigkeit von der kleinsten Blechdicke der zu fügenden Komponente, definiert wird.

Wird die Schweißzone als eigenständiger Volumenkörper modelliert, so können aufgrund einer Kollisionsprüfung, alle Verbindungspartner ermittelt werden. Zusätzlich besteht der Vorteil einer dreidimensionalen Darstellung der Schweißzone bei der Visualisierung der Schmelzzone, deren Dimension entscheidend die Festigkeit und Haltbarkeit der Verbindung beeinflusst. Das Feature-Element „Schweißlinse“ wird auf dem Feature-Element „Schweißpunkt“ platziert, der durch den Initialisierungspunkt und die Richtung der Schweißzangen beschrieben wird. Bei der Integration der „Schweißlinse“ werden die Parameter der Blechdicken der zu fügenden Bleche übertragen und die Prozessparameter entweder manuell oder automatisiert aus dem Prozessmodell übernommen. Nach Merkblatt 823 „Schweißen von Edelstahl Rostfrei“ wird für hochlegierte, rostfreie und austenitische Stähle mit der Blechdicke s eine Schweißlinse mit definierten Linsendurchmesser platziert und die Prozessparameter wie Stromstärke, Intensität und Schweißzeit als Richtwerte hinterlegt [823] Somit stehen die

Prozessparameter für die Prozessplanung zur Verfügung, wodurch die Prozesszeit grob abgeschätzt werden kann, die zur ersten Kostenkalkulation dient.

Das Punktschweißen ist hier exemplarisch aufgeführt, um die Potentiale der Feature-Technologie für den Bereich der Fügeoperationen aufzuzeigen. Für weitere Standard- oder Sonderverfahren können bestehende Strukturen verwendet oder neue Elemente entwickelt werden. Die Visualisierung des Schweißpunktes als Volumenelement, wie Abbildung 50 zu sehen ist, hat bei der Bauteilauslegung den Vorteil, dass die Schweißlinse als eigenständiger Körper dargestellt und berechnet wird.

Daher kann die Schweißverbindung unter realitätsnahen Bedingungen in einer FEM-Simulation berechnet werden. Der Schweißpunkt wird nicht, wie es in manchen FEM-Tools möglich ist, als Knotenverbindung dargestellt, sondern besitzt eine Kontaktzone, die als starre Verbindung mit dem Blech gesetzt wird. Die Bleche werden zur Vorbereitung auf die Schweißlinsenverbindung um das Volumen der Schweißlinse reduziert, damit eine Verbindungsdefinition vollzogen werden kann. Zusammenfassend kann man sagen, dass die Darstellung der Schweißzone als Volumenelement verschiedene Aspekte der Produktabsicherung beeinflusst. Einerseits kann die Montageplanung unterstützt werden, indem aufgrund einer Kollisionsprüfung die zu verknüpfenden Bauteile lokalisiert werden. Andererseits können in der Produktentwicklung die Strukturfestigkeiten von Schweißverbindungen mit FEM-Simulationen exakter berechnet werden.

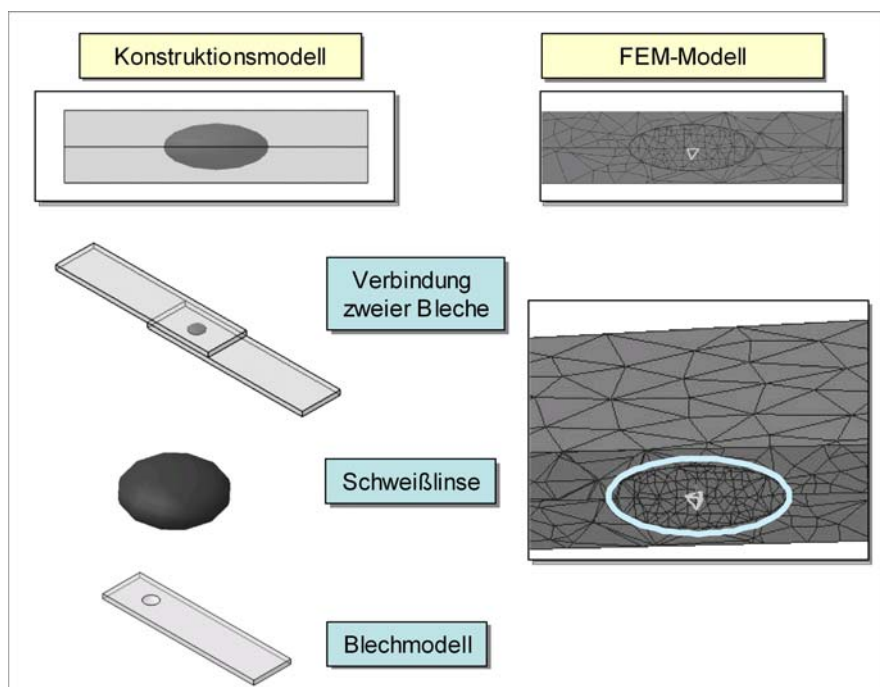


Abbildung 50: Konstruktionsmodell und FEM-Modell einer Schweißlinse

4.9 Potentiale von Feature-Kombinationen

Durch die Verwendung der Grundreferenzen der Skelettelemente können Features aus anderen Abteilungen integriert und verknüpft werden, die zusätzliche Informationen tragen, wodurch Routinetätigkeiten automatisiert ablaufen können. Die Bildung von Feature-Kombinationen lässt verschiedene Sichten auf ein Modell oder einen geometrischen Bereich des Modells zu. Es werden verschiedene Feature-Kombinationen basierend auf dem Funktionsmodell vorgestellt. Hierbei handelt es sich z.B. um eine Veränderung des Detaillierungsgrades des Modells vom Funktionsmodell zum Prinzipmodell. Feature-Kombinationen können auch abteilungsübergreifend gebildet werden. Beispiel hierfür sind die Skelettelemente gepaart mit den Feature-Elementen der Zerspanung oder anderer Fertigungsverfahren. Diese Kombination bildet die Basis des Szenariomanagements, wodurch verschiedene Prozessvarianten bewertet werden können. Eine weitere Art der Feature-Kombinationen bilden Kombinationen der gleichen Feature-Elementklassen, die komponentenübergreifend interpretiert werden können. Beispiel hierfür bilden die Skelettelemente, die als Assembly Feature interpretiert werden können.

4.9.1 Kopplung zu weiteren CAx-Anwendungen

Neben der in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Vernetzung der Produktentwicklung mit der Fertigungs- und der Montageplanung gibt es auch Möglichkeiten, dieses Konzept auf andere Bereiche zu erweitern. Die digitalen Produktentstehungswerkzeuge wie Toleranzanalyse und FEM-Simulation können mit Hilfe der Feature-Technologie ebenfalls unterstützt werden, indem die Skelettelemente und Funktionselemente um Informationen erweitert werden oder neue Featureverknüpfungen erzeugt werden, die für die entsprechenden Aufgaben benötigt werden. So wird beispielsweise die Kraft, die auf eine Verbindungen unter Last wirkt, als Parameter eingetragen, der im Anwendungsfall aktiviert wird. Die Zone, auf die die Belastung wirkt, ist durch einen Funktionsbereich beschrieben, wodurch die Rahmenbedingungen für die meisten FEM-Systeme über die Skelett- und Funktionselemente definiert werden können.

Die Einbindung einer Toleranzanalyse in das vorgestellte Konzept beinhaltet enormes Potential in der Bauteilabsicherung, da Hüllkurven der Toleranzbereiche bei der Montage zu berücksichtigen sind und somit die verschiedensten Kombinationen beim Zusammenbau analysiert werden können. Bei der Darstellung der Toleranzbereiche als Volumenkörper kommt es jedoch immer zu Durchdringungen der Komponenten, die gefügt werden sollen. Daher müssen für diesen Bereich neue Konzepte erarbeitet werden, die weiteren Aufschluss über die

Montierbarkeit der Komponenten geben und somit einen weiteren wichtigen Schritt in Richtung robuster Produktion und Produktionsplanung ermöglichen.

4.9.2 Skelettelemente als Basisfeature

Die Skelettelemente bilden Grundreferenzen, um andere Features zu platzieren. Daher ist es sehr bedeutend, diese Elemente so allgemein wie möglich zu halten, um sie nicht mit unnötigen Informationen zu beladen. Wichtig hierbei ist, dass eine eindeutige Formatierung der Features vorliegt, um sie gezielt im Produktbaum ansprechen zu können.

Ein Skelettelement dient somit beispielsweise als Basiselement für Fertigungs-Features, wie bereits in Kapitel 4.6 vorgestellt. In diesem Fall werden Informationen über die Bildung von Feature-Kombinationen erzeugt. Somit werden Daten in expliziter Form im Produktmodell platziert, wodurch sie jederzeit ausgelesen und interpretiert werden können. Ebenso können Informationen durch die Interpretation bestehender Elemente erzeugt werden, wodurch eine semantische Information entsteht, die als Planungsbasis herangezogen wird. Diese Information kann als semantische Information bestehen bleiben oder nach der Interpretation als explizites Wissen integriert werden. So kann beispielsweise ein Montage-Feature nach der Interpretation der korrespondierenden Skelettelemente in Form eines Informations-Features integriert werden. Auf diese Art können ebenfalls Simulationsergebnisse im Produktmodell hinterlegt werden. Mess-Features stellen sinnvolle Ergänzungsfeatures dar, um die Prozessplanung mit Informationen zu unterstützen und die Digitale Fabrik um die Aspekte der Qualitätssicherung zu erweitern.

4.9.3 Mess-Feature

Unter dem Begriff Mess-Feature versteht man je nach Qualitätssicherungsverfahren ein Geometrielement oder ein Geometriebereich, die auf zu definierende Eigenschaften hin untersucht werden. So besitzt das Feature-Element bei taktilen Messverfahren einen Punkt oder eine Linie, deren Koordinaten zu überprüfen sind. Die Mess-Features bilden das Ziel des Tastsystems und werden über die Koordinaten der Punkte im Produktmodell beschrieben. Im Mess-Feature ist zusätzlich die Flächennormale des Geometriebereiches enthalten, um die Orientierung des Tasters zu definieren. Die Gesamtheit aller Punkte und Linien wird an die Messmaschine übertragen und bildet die Grundlage einer automatisierten Planung der Qualitätssicherung. Für andere Messverfahren müssen die Daten der Feature-Elemente angepasst werden, so dass sie als Eingangsinformationen für die Messtechnik verarbeitet werden können.

4.9.4 Weitere Features

Neben den Mess-Features kann das Produktmodell um beliebige Features erweitert werden, die für Spezialaufgaben konzipiert werden und somit wichtige Informationen für Prozesse beinhalten. Diese Features sollten so konstruiert werden, dass sie mit den gegebenen Grundreferenzen der Skelettelemente in das Produktmodell integriert werden können. Falls dies jedoch nicht möglich ist, kann eine Art Verbindungsfeature zwischengeschaltet werden, das die Referenzen der Skelettelemente nutzt, um instanziiert zu werden, und weitere Referenzen für komplexere Feature abbildet, die dann das eigentliche Feature aufnehmen. Diese Strategie scheint bei erster Betrachtung unnötig kompliziert, unterstützt jedoch den Gedanken einer Automatisierung von Routinetätigkeiten.

5 Produktions-Skelettmodelle im Marktzyklus des Produktes

Neben dem Begriff Marktzyklus existiert die geläufigere Bezeichnung Produktlebenszyklus. Der Produktlebenszyklus besitzt jedoch zwei gängige Interpretationen, wodurch keine eindeutige Zuordnung erfolgen kann. Die Produktentwickler definieren Produktlebenszyklus als den Ablauf von der Produktidee über die Produktrealisierung bis zum Vertrieb und anschließenden Recycling der Produkte, was mit der Definition von Produktentwicklung nach Ehrlenspiel gleichzusetzen ist [Ehr198]. Aus Sicht der Produktionsplanung oder der Betriebswirtschaft beschreibt der Produktlebenszyklus den mengenmäßigen Absatz eines Produktes über den gesamten Zeitraum, in dem sich das Produkt am Markt befindet [Fisc01]. Im Folgenden wird daher der Begriff Marktzyklus verwendet, um Zweideutigkeiten zu vermeiden. Auf die klassischen Phasen des Marktzyklus aus Sicht der Produktionsplanung wird im Kapitel 5.1 detailliert eingegangen.

Hierbei bieten Produktions-Skelettmodelle neue Möglichkeiten für die Planung von Fertigungseinrichtungen und Produktlebenszyklen.

5.1 Marktzyklus

Bei einer Marktzykluskurve oder auch Produktlebenszykluskurve (PLC) handelt es sich um eine sehr flexible Kurve, mit unterschiedlichen Steigungsverläufen. Diese PLC ist für das Marketing ein wichtiges Hilfsmittel, indem die Wettbewerbsdynamik des Produktes ermittelt werden kann. In der heutigen Zeit, in der sich die Produkte meist nur kurz am Markt behaupten, bis sie von einem Folgeprodukt abgelöst werden, werden Szenarien über Marktzykluskurven immer wichtiger, um frühzeitig Planungskonzepte für sich ändernde PLC bereit zu halten.

Der Marktzyklus wird in 5 Phasen unterteilt:

- **Die Einführungsphase:** Das Produkt wird am Markt eingeführt. Durch hohe Einführungskosten werden in dieser Phase noch keine Gewinne erwirtschaftet. Es dauert einige Zeit, bis alle Vertriebskanäle versorgt sind und das Produkt am Markt erhältlich ist. Der Umsatz bzw. der Absatz befindet sich im Ansteigen, der Kapitalbedarf ist hoch und die Rentabilität meist negativ. Es gilt die Eintrittsbarriere im Markt, wie Verbrauchergewohnheiten und Konkurrenz, zu überwinden. Entwicklungskosten, Werbekosten, Einführungsrabatte und aufgrund der niedrigen Absatzmenge hohe Herstellkosten belasten das Ausgabenbudget.
- **Wachstumsphase:** Hier steigen Umsatz und Absatz in Folge der stark steigenden Nachfrage überproportional. Der Kapitalbedarf ist bedingt durch die Erweiterungsin-

vestitionen ebenfalls progressiv steigend, so dass sich das Umsatzwachstum noch nicht unmittelbar verbessernd auf die Rentabilität auswirkt. Es gilt in dieser Phase schnell zu wachsen, neue Marktanteile zu gewinnen und durch das Mengenwachstum die Herstellkosten zu senken, indem Erfahrungseffekte genutzt werden können. Hier wird auch der Wettbewerb häufig instabil, da konkurrierende Unternehmen im Kampf um Marktanteile verschiedenste Marketingstrategien durchführen, die oftmals über den Verkaufspreis erfolgen.

- **Reifephase:** Das Produkt wird vom Markt akzeptiert. Da kaum weitere Kunden hinzukommen bleiben die Gewinne aufgrund ausbleibender Zuwachsraten nahezu konstant. In dieser Phase geht es um die Verteidigung der Marktposition gegenüber der Konkurrenz, wodurch erhöhte Kosten im Marketing anfallen. Signifikant ist die Überschneidung des Umsatz- und Absatzmaximums. Auch der Gewinnhöhepunkt wird in dieser Phase erreicht, allerdings in der Regel vor dem Umsatzmaximum. Der Gewinn wird sich im weiteren Verlauf schneller rückläufig zeigen als der Umsatz. Der Kapitalbedarf ergibt sich aus den für die Haltung des Marktanteiles notwendigen Investitionen und ist im Normalfall geringer als in der Phasen davor. Dadurch wird eine positive Rentabilität ermöglicht, die solange wie möglich verlängert werden soll. In dieser Phase werden Anstrengungen unternommen, um den Lebenszyklus auszudehnen. Die Verkaufssteigerungen aus Wachstums- und Einführungsphase werden auch bei einer Verlängerung des Lebenszyklus nicht mehr erzielt.
- **Sättigungsphase:** Umsatz, Gewinne und Rentabilität sind rückläufig. Das Produkt konkurriert auf dem Markt mit neuen Produkten und die Verbraucher wechseln. Zusätzliche Kosten, verursacht durch gestiegene Marktansprüche hinsichtlich Qualität und Kundenservice, belasten die Ertragssituation.
- **Degeneration.** Diese Phase liegt vor, wenn der Absatz des Produktes unaufhaltsam zurückgeht und damit nicht mehr lange am Markt vorhanden sein wird. Am Ende dieser Phase kann die Abschaffung oder auch die Neueinführung des Produktes stehen.

Da die Absatzmengen der Produkte aus Schätzungen und Marktanalysen hervorgehen, sind diese mit einer gewissen Unschärfe behaftet, wodurch flexibel auf den immer turbulenteren Markt reagiert werden muss. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, setzt die heutige Planung auf wandlungsfähige Produktionssysteme, die von einer hohen inneren oder internen Flexibilität geprägt sind und somit Absatzschwankungen leichter ausgleichen können. [Blum06].

Unter Flexibilität versteht Pfohl die Fähigkeit eines Systems, sich alternativen Situationen anzupassen, die in Zukunft eintreten können [Pfoh00]. Bei der Definition von Tempelmeier und Kuhn stehen Freiheitsgrade eines Systems im Vordergrund, wodurch es möglich ist, sich an Veränderungen in der Umwelt anzupassen [TeKu92]. Nach Westkämper und Wiehndahl bildet Flexibilität eine Teilmenge von Wandlungsfähigkeit. Am Beispiel eines Fertigungssystems besteht die Wandlungsfähigkeit darin, dass strukturelle Änderungen durch die Integration weiterer Ressourcen vorgenommen werden können. Flexibilität hingegen beschreibt die

Anpassungsfähigkeit eines Systems ohne strukturelle Änderungen [WZBT00, Wien00, Wien02a].

Innere Flexibilität stützt sich auf flexible Ressourcen, die universell einsetzbar sind [SeSe90]. Hierbei handelt es sich in erster Linie um die Ressource Mensch und erst an zweiter Stelle können Robotersysteme angeführt werden. An dieser Stelle stehen jedoch Hochlohnländer vor der Notwendigkeit, ihre Flexibilität durch hohe Kosten einkaufen zu müssen, wodurch die Produktionskosten steigen, die auf die Produkte umgelegt werden müssen. Durch das Zusammenwachsen der Märkte basierend auf neuen Kommunikationsmöglichkeiten (Internet) existiert auf dem Markt ein steigender Preiskampf. Der Kunde hat die Auswahl des Anbieters und sucht sich aus dem Angebot das für ihn beste Preis-Leistungs-Verhältnis aus. Daher muss es das Ziel sein, neue Methoden und Konzepte im Produktenstehungsprozess zu etablieren, die es ermöglichen, die innere Flexibilität durch automatisierte Fertigungseinrichtungen zu erzielen, ohne die Zielkosten [BuWa97] außer Acht zu lassen.

5.2 Flexible Fertigungssysteme

Die Automobilindustrie ist einer der entscheidenden Wirtschafts- und Innovationsmotoren unserer Gesellschaft. In den nächsten Jahren steht sie mehr als in den letzten Jahren vor der Aufgabe, innovative Produkte mit kurzen Marktzyklen, kleinen Losgrößen und hohen Anforderungen an die Qualität zu wettbewerbsfähigen Preisen anbieten zu können. Daher müssen Produktionskonzepte erarbeitet werden, die die Dynamik der Märkte berücksichtigen, ohne weitere Überkapazitäten zu erzeugen [RaAZ04]. Nachteilig haben sich die hohe Variantenvielfalt und die unterschiedlichen Arbeitsinhalte jedes Produktionsschrittes auf die Durchlaufzeit ausgewirkt, da Engpässen durch die Bildung von Puffern entgegengewirkt wird [Matt02]. Basierend auf dem Marktzyklus eines Produktes besteht daher die Forderung nach flexiblen und wandlungsfähigen Produktionssystemen, deren Kapazität variabel angepasst werden kann, um den Marktanforderungen hinsichtlich des Absatzes gerecht zu werden [LaMK01]. Milberg und Krüger stellen Kapazitätsanpassungskonzepte für die Montage vor, wobei diese Konzepte auch auf andere Bereiche der Fertigung übertragbar sind. Die vorgestellten Alternativen beziehen sich jedoch nicht auf eine hohe Flexibilität der Fertigungssysteme, sondern zeigen andere Strategien der Kapazitätssteigerung [MiKr01]. Grundsätzlich werden die geplanten Absatzzahlen nur selten erreicht, da zu optimistisch in die Zukunft gesehen wird. Diesen Umstand kann man wieder am deutlichsten in der Automobilindustrie sehen, wo z.B. bei der Audi AG mit dem Audi TT ein doppelt so hoher Absatz erzielt werden konnte als anfangs erwartet. Dieses Beispiel zeigt gut, dass Marktanalysen nur eine grobe Richtung vorgeben,

jedoch der Markt sich bei der Einführung der Produkte anders verhalten kann als dies prognostiziert wurde. Einen Lösungsansatz bilden flexible Fertigungssysteme im Zusammenspiel mit flexiblen Fertigungseinrichtungen, die einerseits eine hohe innere als auch andererseits eine hohe äußere Flexibilität besitzen [EVDH02].

Laut Definition handelt es sich bei einem flexiblen Fertigungssystem (FF-System; FFS) um ein Produktionssystem, das aus einer Menge von ersetzenden und/oder ergänzenden numerisch gesteuerten Maschinen besteht, die durch ein automatisiertes Transportsystem miteinander verbunden sind. Sämtliche Vorgänge in dem FFS werden durch einen Zentralrechner gesteuert. Das FFS ist in der Lage, Werkstücke eines bestimmten Werkstückspektrums in wahlfreier Reihenfolge ohne nennenswerte Verzögerungen durch Umrüstvorgänge zu bearbeiten. Dies wird möglich, weil in einem FFS eine gegebene Menge von voreingestellten Werkzeugen mit kurzen Zugriffszeiten in lokalen Werkzeugmagazinen an den Maschinen verfügbar ist. Ferner werden die Werkstücke in der Regel an separaten Spannplätzen auf speziellen Werkstückträgern (Paletten, Formnester) fixiert, die eine schnelle Justierung der Werkstücke an den Bearbeitungsmaschinen ermöglichen.

In der konventionellen Werkstattfertigung werden zeitaufwändige Werkzeugwechsel (einschließlich der erforderlichen Vorbereitung des Werkzeugs) automatisiert während der Maschinenhauptzeit durchgeführt. So wird während der Bearbeitung eines Werkstücks mit einem bestimmten Werkzeug bereits das nächste Werkzeug mit einem speziellen Greifer aus dem Werkzeugmagazin entnommen und in kürzester Zeit nach Abschluss des Bearbeitungsvorgangs simultan gegen das vorhergehende Werkzeug ausgetauscht. Dieser Vorgang bedarf in der Regel nur weniger Sekunden, die im Fall eines Werkstückwechsels für das Laden des notwendigen NC-Programms zur Steuerung der Maschine benötigt werden.

In einem FFS werden üblicherweise Werkstücke mehrerer unterschiedlicher Produkttypen und Produktionsaufträge gleichzeitig bearbeitet. Die Werkstücke werden im Allgemeinen mit Hilfe von Spannelementen auf den Werkstückträger montiert. Tönshoff et. al. beschreiben moderne Spannsysteme, die mit der Hilfe von Aktoren und Sensoren der Anforderung einer präzisen Werkstückfixierung bei großer Typenvielfalt gerecht werden [TDLS02]. Jedes Werkstück ist durch seinen spezifischen Bearbeitungsfortschritt gekennzeichnet, der von der FFS-Steuerung individuell gespeichert und fortgeschrieben werden muss. Zwischenlagerungen der Halbzeuge erfolgen meist in einem zentralen Palettenspeicher (Zentralpuffer) oder in lokalen Speicherplätzen an den Maschinen. Jedes CNC-gesteuerte Bearbeitungszentrum in einem FFS erlaubt einen direkten Zugriff auf die Werkzeuge, die z.B. in Werkzeugkassetten, Werkzeugtrommeln, Werkzeugscheiben oder in Werkzeugkettenmagazinen (Umlaufmagazi-

nen) angeordnet sein können. In der Wissenschaft sind flexible Fertigungssysteme aus dem Fokus gerückt, während sie sich in der betrieblichen Praxis in großer Zahl wiederfinden. Die einzelnen Arbeitssysteme sollten neben dem NC-Programm das Potential einer Rekonfigurierbarkeit besitzen, um die Reaktionsfähigkeit zu verbessern. Modularisierte Werkzeugmaschinen können einen Beitrag leisten, da sie für neue Aufgaben konfiguriert werden können und sich im Prozess an das Produktspektrum anpassen lassen [WuHK06]. Die Planung des Designs eines FFS ist eine komplexe Aufgabe, die sowohl nach technischen Kriterien als auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten gelöst werden muss.

Als Grundlage für die Investitionsentscheidung muss Klarheit darüber bestehen, wie hoch der mit einer FFS-Konfigurationsalternative erreichbare Output sein wird. Diese Frage kann mit Hilfe von Simulationsmodellen oder auch mit analytischen Warteschlangenmodellen beantwortet werden [GuTe05, TeKu93]. Neben der Planung der Fertigungseinrichtungen müssen auch die Rahmenbedingungen einer flexiblen Fertigung geschaffen werden. So müssen die Fabrikstrukturen wandlungsfähig gestaltet sein, um eine hohe Geschwindigkeit in Planung und Umsetzung zu realisieren [WiSc98]. Ein Beispiel bilden die Logistikprozesse, die bei der Umstellung auf ein anderes Produkt oder Produktspektrum an die veränderten Produktionsbedingungen im Rahmen flexibler und wandlungsfähiger Produktionssysteme angepasst werden müssen [MiDü02, ScKH06], um ein Beispiel aus dem Bereich der Prozessplanung und Produktionskontrolle zu nennen [TWTH01].

5.2.1 Investitionen in flexible Fertigungssysteme

Als Folge des aus der Einleitung und Motivation abzuleitenden Wandels zu einer größeren Variantenvielfalt und dem wachsenden Kostendruck wird die Entscheidung hin zu flexiblen Fertigungssystemen immer bedeutender, da die Beherrschung der Vielfalt zu niedrigen Kosten sich immer mehr zum zentralen Erfolgsfaktor eines modernen Produktionsmanagements herausstellt. Der Begriff Flexibilität verkörpert im Allgemeinen die Anpassungsfähigkeit eines Systems an neue Rahmenbedingungen.

Den Eindimensionalen Entscheidungsmodellen aus Abbildung 51 liegen monetäre Zielausrichtungen zugrunde, die nur auf eine Zielgröße fokussiert sind. Daher werden bei diesen Verfahren ausschließlich Kosten, Kapitalwert oder die Rentabilität einer Investition berücksichtigt. Die Verfahren der statischen und der dynamischen Investitionsrechnung sind in der betrieblichen Praxis weit verbreitet, jedoch genügen diese Verfahren den Anforderungen einer strategischen Investitionsrechnung nicht mehr. Im Gegensatz zu den eindimensionalen Bewertungsverfahren können mit mehrdimensionalen Entscheidungsmodellen mindestens zwei

Zielgrößen berücksichtigt werden. Durch die Einbeziehung von nicht-monetären, aber quantifizierbaren Vorteilen in die Investitionsrechnung erlauben diese Verfahren eine Wirtschaftlichkeitsbeurteilung flexibler Fertigungseinrichtungen und Fertigungssysteme [DiZS99].

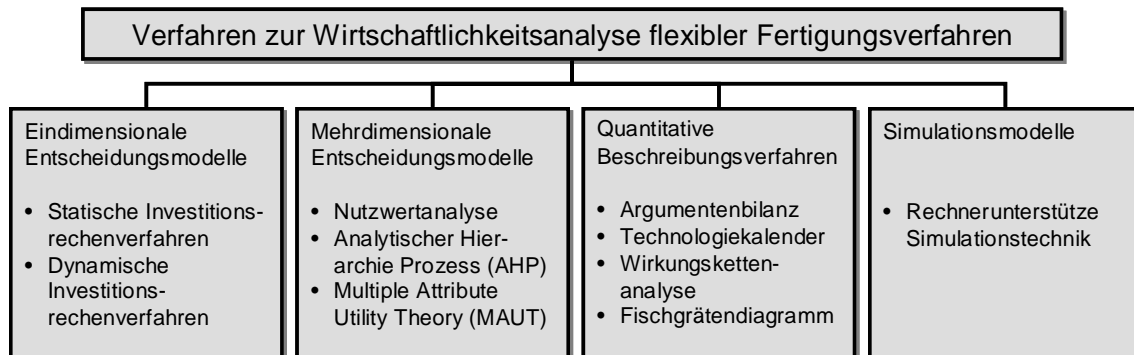


Abbildung 51: Verfügbare Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsanalyse flexibler Fertigungssysteme [DiZS99]

Da sich bei strategischen Investitionsentscheidungen nicht viele Nutzeneffekte monetär exakt bewerten lassen, kommen vermehrt verbal beschriebene Bewertungsverfahren im Zuge von Wirtschaftlichkeitsanalysen zum Einsatz. Daher haben sich die qualitativen Beschreibungsverfahren in der Investitionsrechnung etabliert, die die nicht monetär bewertbaren Entscheidungskriterien, die von den anderen Verfahren vernachlässigt werden, explizit aufgreifen und anhand dieser Bewertungen erstellen.

Ein weiterer Fortschritt in der Investitionsrechnung wurde durch den Einsatz von Simulationsmodellen erreicht, die eine zusätzliche Transparenz für die wechselseitigen Abhängigkeiten über die Zeit ermöglichen. Laut Greschner bietet sich zur Erfassung komplexer Problemstellungen unter Einbeziehung ihrer dynamischen Phänomene und zur Beurteilung der Wirkungen strategischer Entscheidungsalternativen die Simulation an [Gres96]. Jedoch wird dieses Verfahren nur selten in der Investitionsrechnung eingesetzt, da der Aufwand bei der Erstellung des Modells oft in keinem Verhältnis zum Informationsgewinn gegenüber dem Einsatz eines anderen Verfahrens steht.

Aufgrund der Flexibilität der Fertigungssysteme können Produkte mit einem gewissen Geometriespektrum gefertigt werden. Hierbei wird von einer Fertigungsgruppe gesprochen, da sie auf ein und demselben Produktionssystem gefertigt werden können.

5.2.2 Produkt- und Produktionsklassifizierung durch Skelettmodelle und Skelettelemente

Damit Produkte zu Fertigungsgruppen zusammengefasst werden können, werden sie hinsichtlich verschiedener Kriterien untersucht. Bereits in den 60er und 70er Jahren des 20ten Jahr-

hundreds haben die Forscher Mitrofanov und Opitz erste Konzepte zur manuellen Gruppierung von Produkten angestellt [Mitr60, Mitr66, Opit70]. Der Zusammenfassung zu Fertigungsgruppen wurde seither immer mehr Achtung geschenkt, wodurch in den 80er Jahren erste Konzepte zu einer automatisiert Feature-basierten Methode für die Gruppentechnologie erarbeitet ist [ShBh89, SrCr94]. Basierend auf den neuerarbeiteten Feature-Konzepten von Elinson und Nau werden Geometrie-Features als auch Fertigungs-Feature auf Ähnlichkeit überprüft [ElNa97].

Die Skelettmodelle der Produktentwicklung und der Produktionsplanung besitzen ebenfalls die Möglichkeit Fertigungsgruppen unter den unterschiedlichen Gesichtspunkten zu lokalisieren. Durch die standardisierte Darstellung der Bauteilskelettmodelle ist es möglich, diese auf Merkmale zu überprüfen. Durch diese Analyse können Synergieeffekte der Produkte aufgezeigt werden, indem man sie zu Gruppen zusammenfasst. Diese Analyse kann automatisiert erstellt werden, da die Produkte mit ihren Merkmalen in geometrischer Form vorliegen und somit einen Zugriff über Datenbanken ermöglichen. Da die Produkte mit den Fertigungsplänen verknüpft sind, kann ebenfalls ein Abgleich hinsichtlich des Fertigungskonzeptes erstellt werden, um das Fertigungskonzept, mit dem das Produkt gefertigt wird, zu evaluieren.

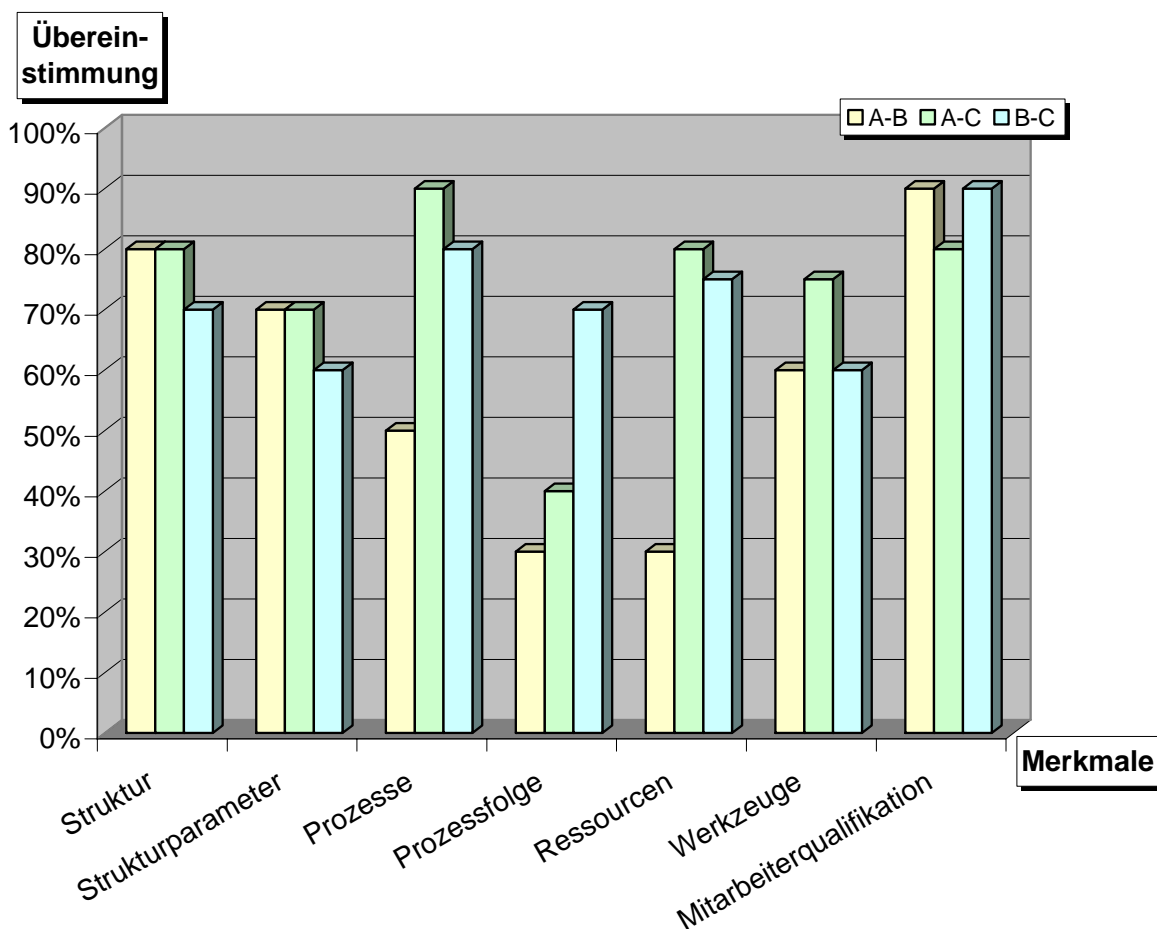


Abbildung 52: prozentuale Schnittmenge der Merkmale für Produktionsfamilien

Abbildung 52 zeigt eine Analyse zum Auffinden von Produktionsfamilien. Es sind Übereinstimmungen von fiktiven Produkten und deren Produktionssystem gebildet. In der Legende sind die miteinander zu vergleichenden Produktfamilien (A-B, A-C, B-C) aufgeführt. Hierbei werden neben produktspezifischen Merkmalen auch Übereinstimmungen in den Bereichen Prozesse, Ressourcen und eingesetzte Werkzeuge getätigt, um zu überprüfen, ob ein Produkt auf einem bestehenden Fertigungssystem gefertigt werden kann. Die Mitarbeiterqualifikationen sollten ebenfalls berücksichtigt werden, da sie entscheidend die Potentiale des Fertigungssystems beeinflussen. Ebenfalls kann diese Art der Gruppentechnologie genutzt werden, um Fertigungsgruppen forciert zu erzeugen. So kann zum Beispiel die Produktionsplanung mangelnde Übereinstimmungen in der Produktstruktur frühzeitig aufzeigen, wodurch unter Berücksichtigung der Funktion eines Produktes Anpassungen diskutiert werden können. Eine solche Herangehensweise hat den Vorteil, dass bestehende Produktionssysteme besser ausgelastet werden, wodurch sich eine höhere Investition in flexible Fertigungssysteme rechtfertigt. So können beispielsweise auch Bauteile, die nur geringe strukturelle Übereinstimmungen besitzen, aus Sicht der benötigten Ressourcen eine hohe Überlappung erreichen. So besitzt beispielsweise eine Kurbelwelle ein bestimmtes Bohrmuster, um das Ausgleichsgewicht zu montieren. Dieses Bohrmuster könnte in ähnlicher Form auch bei einer Bohrplatte vorhanden sein, die als Basiselement für die Montage einer anderen Baugruppe dient. Ist dies der Fall, könnte bei ausreichender Kapazität die Bohrstation besser ausgelastet werden, wodurch sich die Fixkosten auf eine größere Anzahl an Komponenten verteilen. Somit ist es möglich, bestehende Systeme besser auszulasten und den Gedanken einer wirtschaftlichen Produktion voranzutreiben. Auch hier ist es wichtig, die Szenarioebene für die Technologieauswahl in Betracht zu ziehen, da sich Synergieeffekte ergeben können, die die zu produzierende Jahresstückzahl vergrößern. Somit könnte eine Fertigungstechnologie mit höheren Fixkosten und geringeren variablen Kosten zum Einsatz kommen, da die Kosten auf eine größere Anzahl von Produkten verteilt werden. Mit dieser Sichtweise auf die Produkt- und Prozessentwicklung können strategische Entscheidungen frühzeitig getroffen werden, die das Unternehmensrisiko minimieren.

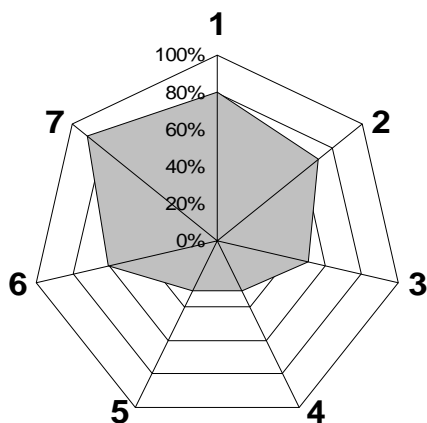
5.2.3 Ähnlichkeitstheorie von Produkten

Produkte werden einer Fertigungsgruppe zugeordnet, wenn sie eine Variante eines Produktes darstellen. Das vorgestellte Konzept bezieht sich jedoch nicht nur auf Varianten, sondern untersucht alle Produkte auf ähnliche Strukturen. Im Bereich von Ähnlichkeitsuntersuchungen oder Gruppentechnologie gibt es bereits die verschiedensten Ansätze. Manche beziehen sich

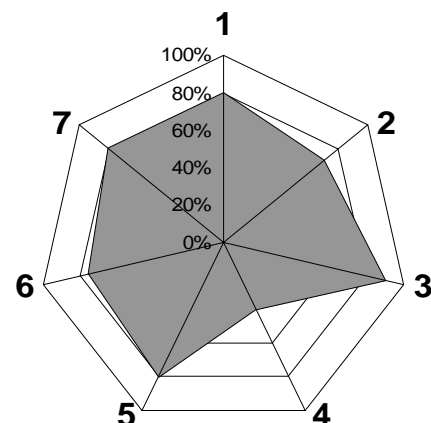
auf die dreidimensionale Gestalt der Produkte, die sich ausschließlich mit den geometrischen Formen der Produkte beschäftigt. Beim Auffinden von Übereinstimmungen in der Produktgeometrie können Produkte zu Fertigungsgruppen zusammenfasst werden. Durch die Gruppentechnologie ist es möglich, auch in Hochlohnländern preisgünstig zu produzieren, indem moderne Methoden für Produkte und Fertigungssysteme erstellt und aufeinander angepasst werden. Die ursprüngliche Herangehensweise hat sich ausschließlich auf Ähnlichkeiten der Produkte bezogen. Bei der klassischen Ermittlung von Fertigungsgruppen wird davon ausgegangen, dass bei einer geometrischen Übereinstimmung der Produkte auch eine technologische Übereinstimmung vorhanden sein muss. Dieser Zusammenhang kann jedoch nicht uneingeschränkt bestätigt werden, da konstruktive Merkmale entscheidend die Fertigungstechnologie beeinflussen. Daher werden mit dem Konzept der Vernetzten Skelettmodelle Fertigungsgruppen aus einer kombinierten Sicht auf das Produkt und dessen Produktion ermittelt. Durch die vorgestellten Skelettmodelle der Konstruktion und der Produktion ist es möglich, Produkt- und Fertigungsmodell als ein Modell aufzufassen und als solches zu bewerten. So besteht durch die Methodik der integrierten Produktentstehung auf Basis von Skelettmodellen und der Feature-Technologie das Potential, ein Modell des gesamten Entwicklungsprozesses zu erhalten und zu analysieren. Wird diese Methodik auf alle Produkte ausgeweitet, so können die Produktions-Skelettmodelle zu Ähnlichkeitsanalysen herangezogen werden. Die Gruppentechnologie bezieht sich somit nicht mehr nur auf die Produktstrukturen, sondern kann auf die Prozesse erweitert werden. Durch diese neue Herangehensweise entstehen neue Herausforderungen im Bereich der Kostenrechnung und des Szenariomanagements, da beispielsweise die Möglichkeit besteht, dass ein vermeintlich kostspieligerer Prozess den Zuschlag erhält, da das Produkt auf einem bestehenden Produktionssystem gefertigt werden kann, ohne eine Investition hervor zu rufen. Durch die nicht zu tätigen Investitionen werden die Fixkosten und somit das Unternehmensrisiko gesenkt. Die bessere Fixkostenverteilung wirkt sich ebenfalls positiv auf das bestehende Produktspektrum der Fertigungslinie aus, da sich die Anlagefixkosten auf eine größere Anzahl an Produkten verteilen.

Die Integrierbarkeit eines weiteren Produktes auf einer bestehenden Fertigungslinie muss jedoch im Vorfeld bewertet werden. Hierzu eignen sich die Softwaretools der Digitalen Fabrik, da man durch die integrierten Simulationstools Vorabuntersuchungen vornehmen kann, um Aussagen bezüglich des Systemverhaltens nach der Integration eines neuen Produktes treffen zu können. Neben der reinen Prozessfähigkeit wird beispielsweise auch die Steuerung der Prozesse hinsichtlich ihrer Ablaufsteuerung untersucht, um einen für das Produktspektrum optimierten Materialfluss zu erstellen. Somit kann es auch möglich sein, dass Produktvarian-

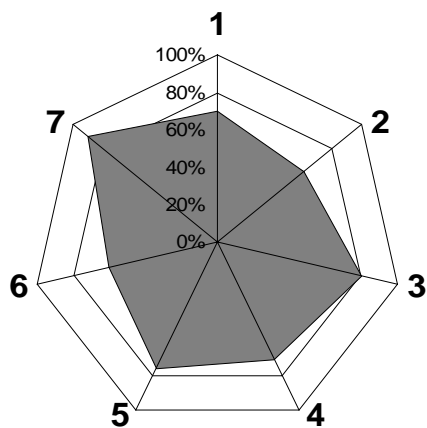
ten mit ähnlichen geometrischen Eigenschaften nicht zu einer Produktfamilie gehören, da deren produktionstechnische Anforderungen nicht vereinbar sind. Somit handelt es sich zwar strukturell um eine Fertigungsfamilie, die aus produktionstechnischer Sicht nicht auf einem Fertigungssystem produziert werden kann. So können auch Produktionsfamilien ermittelt werden, die auf den ersten Anschein nur geringe Ähnlichkeiten hinsichtlich der äußeren Gestalt aufweisen, aber unter produktionstechnischen Gesichtspunkten als Fertigungsgruppe produziert werden können. Die beiden vorgestellten Szenarien sollen verdeutlichen, dass neben den reinen Geometriemerkmale auch die produktionstechnischen Aspekte der Produkte bei der Klassifizierung von Produktionsgruppen untersucht und bewertet werden müssen. Die innere Flexibilität eines Produktionssystems bezieht sich auf die Flexibilität seiner Komponenten. So repräsentiert eine Robotereinheit eine sehr flexible Komponente, da sie in der Lage ist, beliebige Tätigkeiten durch spezielle Programmierung zu erfüllen. Spannsysteme oder Arbeitsräume von Werkzeugmaschinen hingegen sind in ihren Möglichkeiten eingeschränkter, wodurch sie einen Flexibilitätsengpass des Fertigungssystems darstellen können.



Ähnlichkeiten von Produkt A und B



Ähnlichkeiten von Produkt A und C



Ähnlichkeiten von Produkt B und C

- 1) Strukturübereinstimmung
- 2) Strukturparameter
- 3) Prozess
- 4) Prozessfolge
- 5) Ressource
- 6) Werkzeuge
- 7) Benötigte Mitarbeiterqualifikation

Abbildung 53: Flächendarstellung in der Fertigungsgruppenbildung aufgrund prozentualer Übereinstimmung

Jedoch ist es von Interesse, die Flexibilität der Arbeitsbereiche der Fertigungseinrichtungen zu kennen, um diese Flexibilität in Bewegungs- und Fertigungssimulationen auf andere Produkte anzuwenden, damit Fertigungsgruppen gefunden werden können. Werden die Fertigungssysteme eines Unternehmens mit dem vorgestellten Konzept der Produktions-Skelettmodelle aus Kapitel 4.5 abgebildet, können Synergieeffekte von Produkten detektiert werden. Auswahlalgorithmen suchen nach Produktionsgruppen, die große Übereinstimmungen aufweisen. Bei diesem Abgleich müssen auch Fertigungsalternativen berücksichtigt werden. So kann beispielsweise der Rohling als Schmiedeteil oder als Frästeil angeliefert oder produziert werden. Andere Ansätze suchen nach Ähnlichkeiten der Prozesse, die wiederum auf ähnliche geometrische Strukturen schließen lassen, um diese als Fertigungsgruppe zu detektieren. Zur Visualisierung der Übereinstimmung kann auch der Flächeninhalt der in Abschnitt 5.2.2 vorgestellten Übereinstimmungskriterien herangezogen werden. Aus Sicht der Fertigungsgruppenbildung können Merkmale unterschiedlich gewichtet werden, wodurch der Flächeninhalt gemäß des Gewichtungsfaktors verstärkt anwächst.

5.2.4 Möglichkeiten für die Produktionsplanung

Aufgrund des vorgestellten Konzepts zur Identifikation von Fertigungsgruppen können verschiedene Herangehensweisen realisiert werden. Grundvoraussetzung besteht jedoch in der vorgestellten digitalen Abbildung der Prozesse und Produkte, um Vergleiche anstellen zu können, wodurch Synergieeffekt für die Produktion lokalisiert werden können.

Die Digitale Fabrik ist eine Option für diese Unternehmen, um Anlagenpotentiale und Kapazitäten transparenter zu gestalten. Durch die Verwendung zentraler Datenbanken können die benötigten Informationen zur Verfügung gestellt werden, die einen automatisierten Abgleich mit den benötigten Fertigungsverfahren und Kapazitäten hervorrufen. Ein weiterer Schritt in diese Richtung ist eine Erfassung der Flexibilität eines Fertigungssystems. Hierbei müssen Transportsysteme, Spannmittel und Bearbeitungsmöglichkeiten von Maschinen analysiert und ebenfalls in geeigneter Form angelegt werden.

Eine Möglichkeit, diese Informationen zur Verfügung zu stellen, liegt in der Nutzung der Feature-Technologie, die auf Ressourcen und deren Flexibilität erweitert werden kann. So ist es beispielsweise möglich, von Spannsystemen maximale und minimale Konfigurationen durch Hüllkurven darzustellen, die als Parameterset in der Ressource verankert sind. Diese Informationen können von dem Suchalgorithmus ausgelesen und interpretiert werden. Basierend auf dieser Analyse findet ein ständiger Abgleich mit den Informationen der Produkte statt, die auf dieser Anlage gefertigt werden sollen. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, dass die

Feature-Elemente des Produktes und des Produktionssystems in Verbindung stehen, wodurch eine Machbarkeitsaussage getroffen werden kann.

Da man jedoch nicht davon ausgehen kann, dass ein bestehendes Fertigungssystem eine optimale Konfiguration für ein Bauteil darstellt, dessen Produktion nicht von vornherein berücksichtigt wurde, müssen Kriterien erstellt werden, nach denen Anlagen ausgewählt werden können, die nur geringe Konfigurationsänderungen benötigen, um das neue Produkt auf der Fertigungslinie zu produzieren. Beispiele für solche Kriterien sind Fertigungstechnologien, Raumkapazitäten, Integrierbarkeit und die Einflüsse der neuen Linienkomponenten auf die bestehenden Ressourcen. Ziel ist es, im Falle einer Erweiterung ähnliche Technologien zu integrieren, um die Flexibilität des Fertigungssystems für weitere Produkte zu steigern. Handelt es sich bei der Erweiterung um eine dem bestehenden Fertigungssystem fremde Fertigungstechnologie, so ist diese meist nur für ein spezielles Produkt in Kombination mit anderen Ressourcen zu verwenden. Ziel ist es also auch, die bestehende Anlage durch Erweiterungen für das Unternehmen flexibler zu gestalten und technologische Neuerungen der bereits eingesetzten Fertigungsverfahren einfließen zu lassen. Die Integrierbarkeit eines Produktes in ein bestehendes Fertigungssystem ist ein wichtiges Kriterium der Gruppentechnologie und muss zuvor am digitalen Modell abgesichert werden. An dieser Stelle wäre es wünschenswert, wenn der Anlagen-Suchalgorithmus nach Auswahl der bestmöglichen Fertigungssysteme schon Erweiterungen vorschlagen würde, die eine Analyse über die Integrierbarkeit unterstützen, indem das digitale Fabrikmodell Parametrisierungen aufweist, die Steuerungsvarianten und Ressourcenintegrationen zulassen.

Der Aufwand einer solchen Modellierung ist bei der Einführung bedeutend größer, als der bestehende Aufwand, jedoch können die einzelnen Ressourcen mit ihren Rahmenbedingungen als Templates verwendet werden, da unterschiedliche Parameterkonfigurationen einstellbar sind. In diesem Fall stellen die Ressourcentemplates Module dar, die auch in anderen digitalen Modellen integriert werden können. Ein weiterer Vorteil einer solch flexiblen Gestaltung des Gesamtmodells liegt in der Erweiterbarkeit, die keinen kompletten Neuaufbau erforderlich macht. Der anfängliche Mehraufwand wird bereits bei einer geringen Anzahl an Wiederverwendungen in einen Zeitgewinn umwandelt.

Ein weiterer Vorteil liegt in einer weiter verstärkten Vernetzung zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung, die somit zu früheren Zeitpunkten Informationen austauschen, was eine verbesserte Planungsgrundlage bietet und Integrationsspielräume für neue Methoden einräumt.

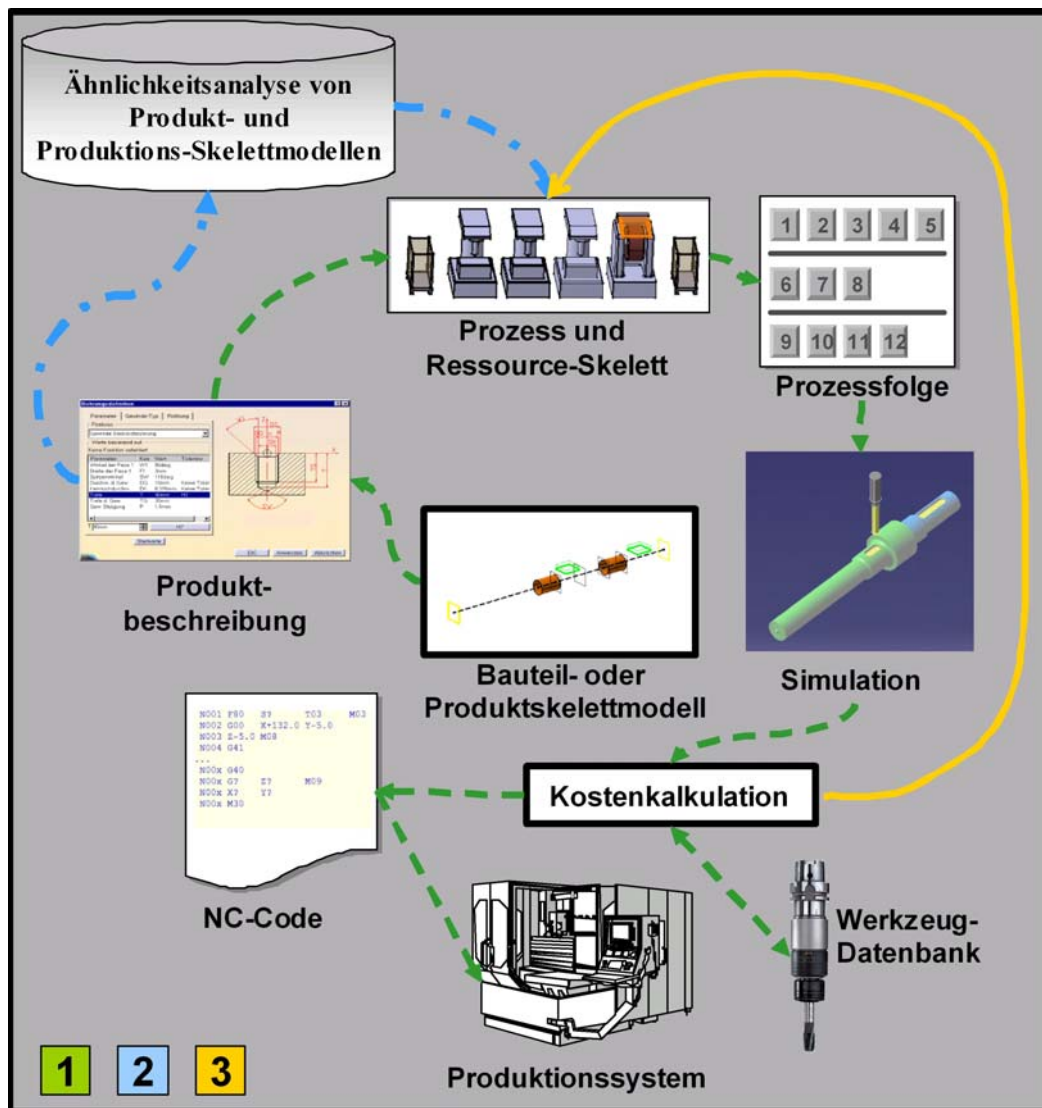


Abbildung 54 Zuordnung von produktorientierten Fertigungssystemen [BIBo06a]

Bei der Auswahl und der Abstimmung eines geeigneten Produktions-Skelettmodells gibt es für die Vorgehensweise prinzipiell drei Möglichkeiten:

1. **Aufbau eines neuen Fertigungssystems:** Ausgehend von der Produktanalyse wird das Modell über die Skelettelemente charakterisiert, wodurch es möglich ist, grobe Fertigungsmuster zu bilden. Die ermittelten Prozesse werden durch den Fertigungsplaner strukturiert, um erste Fertigungssimulationen zu erstellen. Basierend auf den Ergebnissen der Simulation werden erste überschlägige Kostenkalkulationen durchgeführt.
2. **Integration in ein bestehendes Fertigungssystem:** Über die Feature-Erkennung und den daraus abzuleitenden Prozessen werden bestehende Produktionssysteme hinsichtlich ihrer Rahmenbedingungen untersucht, ob es möglich ist das Produkt zu integrieren.
3. **Produkt-Prozess-Produktionssystemmodifikationen:** Ausgehend von den zu erwartenden Kosten gibt es wiederum zwei mögliche Szenarien, um eine zielkostenorientierte Produktion zu gewährleisten:

- a. Man kann das Fertigungskonzept verändern, indem kostenintensive Prozesse detektiert und zusätzliche Technologien für die Produktion berücksichtigt werden.
- b. Ebenfalls besteht die Möglichkeit, durch eine Produktmodifikation kostspielige Prozesse zu eliminieren.

Dieser Planungsansatz kann jedoch nur dann verfolgt werden, wenn eine integrierte Sicht ermöglicht wird, die alle Auswirkungen von Modifikationen auf Seiten des Produkt- oder des Prozessmodells berücksichtigt. Es wird zu keiner Produktmodifikation kommen, wenn die Einsparpotentiale nicht monetär und die Dokumentation nicht hinsichtlich der Auswirkungen bewertet werden können.

5.2.5 Barrieren für den integrierten Ansatz

Das vorgestellte Szenario im Bereich der Ressourcenauswahl kann zum heutigen Zeitpunkt nur Empfehlungen aussprechen, indem kostspielige Prozesse und deren Ursachen aufgezeigt werden. Jedoch kann man sich heute noch nicht vorstellen, dass per Knopfdruck ein optimiertes Fertigungskonzept erstellt wird oder sogar Produktmodifikationen mit Funktionsberücksichtigung automatisiert erstellt werden. Ebenso lebt das Konzept von Daten und den Informationen, daher müssen alle Produktionssysteme und Produkte nach den neuen Richtlinien erstellt werden, um alle Potentiale des Integrierten Produktentstehungsprozesses zu aktivieren. Einzelne Module sind jedoch auch schon als Einzellösung verwendbar.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von der Feststellung, dass die Produktentstehungszeit den entscheidenden Wettbewerbsfaktor für das „Überleben“ und den Erfolg eines Unternehmens darstellt, wird ein globales Konzept der Produktentstehung vorgestellt. Damit ein schnellerer Produktionsstart erzielt werden kann, beruht das Konzept auf der Vernetzung von Produktentwicklung und Prozessentwicklung. Innerhalb des Konzeptes wird verstärkt auf die flexible Planung der Bauteilfertigung und auf eine abgesicherte Montagesequenzplanung eingegangen.

6.1 Zusammenfassung

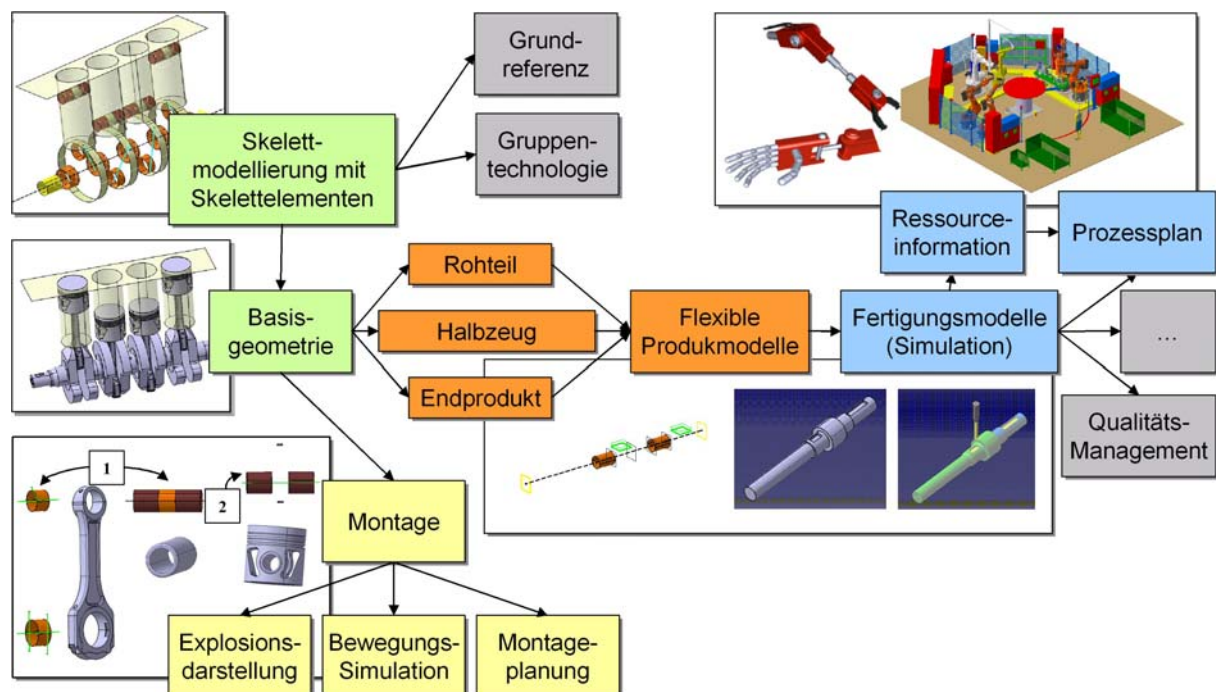


Abbildung 55: Konzeptübersicht

Abbildung 55 gibt einen Überblick über die Teilbereiche des vorgestellten Konzepts der integrierten Produktentstehung. Die Basis bilden standardisierte Konstruktionselemente, die unter Verwendung der Feature-Technologie erstellt werden, wodurch es ermöglicht wird, den Konstruktionsprozess zu unterstützen und zu strukturieren. Bei den Feature-Elementen handelt es sich um Skelett- und Funktionselemente, die die Skelettmodellierung standardisieren, wodurch eine höhere Transparenz erzielt wird, da die Produktmodelle nach einer einheitlicheren Vorgehensweise modelliert werden. Somit kann gewährleistet werden, dass Produktmodelle auch durch Personen modifiziert werden können, die sie nicht erstellt haben, da ähnliche oder gleiche Strukturen zugrunde liegen.

Bei der Skelettmodellierung handelt es sich um eine moderne Modellierungsmethode, die es ermöglicht, Varianten des Produktmodells über Parameterkombinationen abzubilden. Somit ist die Forderung nach einer Variantenbeherrschung aus Sicht der Konstruktion erfüllt. Das entwickelte Featurekonzept repräsentiert im Konstruktionsprozess das Funktionsmodell des Produkts, das bisher in digitaler Form noch nicht abgebildet werden konnte. Die Feature-Elemente unterstützen mit ihrer Struktur die Modellierungsmethodik der Skelettmodelle. Die Skelettelemente sind in der Lage, Informationen in Form von Geometrieelementen, Parameter, Regeln oder Textinformationen zu repräsentieren, um die Prozessplanung und Produktentwicklung zu unterstützen.

Durch das Feature-Konzept und dem zugrunde liegenden Informationsmanagement gelingt es, die Abteilungen, die in den Produktentstehungsprozess involviert sind, in ein gemeinsames Datenmanagement zu integrieren und dadurch die Aufgaben der Abteilungen zu parallelisieren. Ab dem Zeitpunkt der Fertigstellung des Funktionsmodells werden Daten und Informationen ausgetauscht, wodurch es möglich ist, die Potentiale einer größtmöglichen Verkürzung der Entwicklungszeit mit einer einhergehenden verbesserten Informationstransparenz zu erzielen. Die Definition der benötigten Featureinformationen erfolgt auf Grundlage einer Einsatzstudie, wodurch Geometriedaten, Parameter und Daten festgelegt werden, die unterschiedliche Aufgaben unterstützen. Bei der Erstellung der Features wird insbesondere auf die Vermeidung von Datenredundanzen Wert gelegt, um den Aufwand bei der Integration der Elemente und der Speicherung der Daten auf ein Minimum zu reduzieren.

Auf der Seite der Prozessentwicklung stellt das Konzept neue Bausteine vor, die basierend auf den Skelettelementen des Produktmodells in der Planung eingesetzt werden. Bei den Elementen handelt es sich um Prozess- und Ressourcenelemente, die auf Hierarchieebene der Skelettelemente im Planungs-Skelettmodell platziert werden. Prozess- und Ressourcenelemente werden nach der Interpretation der Skelettelemente zusammengefasst und bilden somit das Prozess- und Ressource-Skelettmodell. Auf der obersten Hierarchieebene befindet sich das Produktions-Skelettmodell, das alle Prozess- und Ressource-Skelettmodelle der Fertigung und der Montage beinhaltet, um eine globale Sicht auf die Produktion zu ermöglichen und Auswirkungen von Modifikationen aus Konstruktionssicht oder Planungssicht direkt bewerten zu können.

Die Vernetzung der Skelettmodelle der Produktentwicklung und der Prozessentwicklung wird realisiert, indem die Informationen der Feature-Elemente in direkter oder indirekter Form über eine Schnittstellendatei transferiert werden. Hierbei dient die Schnittstellendatei neben

dem Datentransfer der Strukturierung der Daten, indem die Informationen nach Sichten unterteilt abgelegt werden.

Damit erste Planungen zum Zeitpunkt des Funktionsmodells der Konstruktion erstellt werden können, müssen Geometriereferenzen zur Verfügung stehen, die Rohteilgeometrie und Bauteilgeometrie nach einem bestimmten Fertigungsschritt repräsentieren, um Fertigungssimulationen und Bewegungssimulationen für die Montageplanung zu erstellen. Daher werden die verankerten Konstruktionsinformationen einzelner Elemente eines Bauteils in Form von Parametern und Referenzen genutzt, um eine erste grobe Bauteilgeometrie zu erstellen. Treten von Seite der Konstruktion Geometriemodifikationen auf oder werden andere Produktvarianten erstellt, so verändern sich auch die dynamisch verknüpften Prozessreferenzen, wodurch ein flexibles Fertigungsmodell für Produktvarianten entsteht. Somit sind Analysen von Produktvarianten hinsichtlich der Machbarkeit oder der benötigten Fertigungszeit möglich, die für erste Kostenabschätzungen herangezogen werden können und einen höheren Produktreifeegrad erzielen lassen.

Im Bereich der Montagereihenfolgeplanung werden zwei Konzepte vorgestellt, die grundsätzlich einer ähnlichen Vorgehensweise unterliegen, indem verschiedene Absicherungsebenen für die Montageplanung erstellt werden. Die erste Ebene beschäftigt sich ausschließlich mit den zu fügenden Komponenten. Die zweite Ebene berücksichtigt zusätzlich die Handhabungsgeräte, die in direktem Kontakt mit den Komponenten stehen. In der dritten Ebene werden die Position und die Steuerung der Ressourcen untersucht, um eine minimale Taktzeit zu erzielen. Die Ergebnisse der niederen Ebenen der Montageabsicherung schränken die Sequenzen der höheren Montageebenen ein, so dass nur abgesicherte kollisionsfreie Reihenfolgen zur Analyse herangezogen werden. Der Unterschied der beiden Konzepte besteht in der Darstellungsform der Prozesse. Beim ersten dieser beiden Konzepte werden die Prozesse dynamisch dargestellt und analysiert, beim zweiten Konzept erfolgt die Analyse anhand des statischen Prozessmodells der Montagebewegung. Bei der Lokalisierung einer Kollision werden ausgehend von den beteiligten Komponenten bei beiden Konzepten alle Montagereihenfolgen mit dieser Komponentensequenz eliminiert.

Daten und Wissen über die Montagerichtung sind in den Skelettelementen des Produktmodells enthalten. Hierbei werden die Position, die Orientierung und die Parameter der Featuretypen abgeglichen, um grundlegende Montageinformationen zu generieren und die Featurepaarung hinsichtlich Konsistenz zu überprüfen. Zur Erstellung der Montagebewegung werden zur Verfügung stehende Referenzen der Feature-Elemente für Kinematiksimulationen herangezogen, die sowohl bei der dynamischen als auch bei der statischen Konzeptvariante zum

Einsatz kommen. Ausgehend von den Simulationen werden Montagerestriktionen abgeleitet, über die Montagereihenfolgen eingeschränkt werden.

Das statische Modell der Bewegung (TfV) eines Körpers hat sich für die Erstellung der Montagesequenz als vorteilhaft erwiesen, da mit einem Modell verschiedene Blickwinkel möglich sind und der Simulationsaufwand somit reduziert wird. Daher ist im Rahmen dieser Arbeit ein Ein-Schritt-Verfahren für die Montageplanung realisiert, das es ermöglicht, die drei Ebenen der Montageabsicherung in einem Modell zu visualisieren und zu analysieren. Innerhalb der Montageplanung wird eine Machbarkeitsstudie erstellt, die kollisionsfreie Montagereihenfolgen und kritische Montageprozesse zum Ergebnis hat. Somit ist es möglich, die Fügeflächenmatrix, den Fügeflächengraph und das beschriebene Montageebenenmodell automatisiert aus dem Produktmodell abzuleiten. Die Simulationsergebnisse können neben den planerischen Aktivitäten auch für Schulungen der Mitarbeiter oder zur Prozessoptimierung herangezogen werden, da sie die Montage aus verschiedenen Blickwinkeln visualisieren.

Die Erweiterung und Detaillierung der digitalen Fertigungs- und Montageprozesse in Form von rechnergestützten Modellen resultiert in einem digitalen Abbild des Produktionssystems, das die Arbeitsinformationen über die Prozesse enthält. Basierend auf den freigegebenen Simulationsmodellen der Fertigungsprozesse können automatisiert Prozesspläne abgeleitet werden, da die Informationen als Parameter im Simulationsmodell hinterlegt sind. Neben einer Machbarkeitsstudie und der Ableitung von Arbeitsplänen können durch die Simulationsmodelle der Fertigungsprozesse auch Fertigungssysteme charakterisiert werden, indem ihre Flexibilität und Wandlungsfähigkeit bewertet werden.

Die Optimierung der Prozessfolge wird maßgeblich von den eingesetzten Ressourcen beeinflusst. Das Vernetzungskonzept der Skelettmodelle der Produkt- und Prozessentwicklung eignet sich zur Analyse verschiedener Fertigungstechnologien und verschiedener Fertigungseinrichtungen. Die alternativen Fertigungskonzepte werden mit Hilfe der Szenariotechnik erstellt, wobei davon ausgegangen wird, dass die Ressourceinformationen und die Prozessrestriktionen in geeigneter Form vorliegen und eine automatisierte Verknüpfung der einzelnen Skelettmodellebenen zu ermöglichen.

Die Produkt-Skelettmodelle und Prozess-Skelettmodelle stellen jedoch auch getrennt betrachtet autonome Einheiten dar. Diese Selbstständigkeit wird ermöglicht, indem Informationen definiert werden, die entweder in beiden Modellen enthalten sind und somit Einfluss auf beide Modelle besitzen oder nur Einfluss auf eines der beiden Modelle besitzen und daher auch nur in diesem Modell verwaltet werden. Somit enthalten die Skelettmodelle nur die Daten, die für den jeweiligen Teilbereich Relevanz besitzen. An den Schnittstellen kommt es zu Informati-

onsüberlappungen, woraus Datenredundanzen resultieren würden, die durch eine Verlinkung der Informationen verhindert werden. Dieser Link ermöglicht es, die Modifikation einer Information, die für beide Modelle Relevanz besitzt, in beiden Modellen zu repräsentieren, wodurch Aufwand und Fehlerquellen bei der Informationsintegration reduziert werden.

Das Resultat der neuen Herangehensweise sind zwei dynamisch gekoppelte Skelettmodelle innerhalb des Produktentstehungsprozesses. Hierbei ist es von enormer Bedeutung, dass die Modelle den aktuellen Stand der Produktionssysteme repräsentieren, damit sie bei Änderungen schnell angepasst und erste Evaluierungen am digitalen Modell vorgenommen werden können.

Ein weiterer Vorteil der Vernetzung der Skelettmodelle besteht in der Möglichkeit einer Klassifizierung von Produkten hinsichtlich ihrer Geometrie und ihrer Fertigung. Mit dem Abgleich der Skelettmodelle werden Übereinstimmungen lokalisiert, um Fertigungsgruppen zu bilden. Bei der Erstellung möglicher Fertigungsgruppen können die digitalen Modelle der Fertigungseinrichtungen verwendet werden, um Machbarkeitsaussagen zu treffen, die durch Materialfluss- und Fertigungssimulationen abgesichert werden.

Die Feature-basierte IT-Unterstützung der einzelnen Abteilungen im Bereich von Routinetätigkeiten ermöglicht es, erste wirkliche Parallelisierungen im Produktentstehungsprozess einzuleiten, indem Meilensteine definiert werden, zu deren Zeitpunkten spezielle Daten transferiert werden. So ist es beispielsweise möglich, anhand des Funktionsprinzips bereits erste planerische Maßnahmen für die Bereiche Produktionsplanung und Montageplanung anzustoßen, ohne dass die Endgeometrie der Produkte fixiert sein muss. Der Detaillierungsgrad der planerischen Tätigkeiten ist abhängig vom Produktstatus; zuerst werden Grobstrukturen angelegt, die dann mit wachsendem Produktreifegrad ausdetailliert werden. Diese Art und Weise des Datentransfers ermöglicht einen „echten“ parallelisierten Entwicklungsprozess, indem Informationen weitergegeben werden, die Aktivitäten in anderen Abteilungen anstoßen, ohne dass der Prozess zu 100% abgeschlossen ist. Die Definition der Meilensteine wird prototypisch dargestellt und verdeutlicht den Zeitgewinn im Produktentstehungsprozess, der den Unternehmen die Möglichkeit gibt, Regelkreise zu installieren, die sowohl die Kosten, als auch die Qualität ihrer Produkte und Prozesse entscheidend beeinflussen können.

Das vorgestellte Featurekonzept besitzt den Vorteil, dass weitere Informationsträger strukturiert in das Produktmodell integriert werden können, da die geometrischen Referenzen der Skelettelemente zur Instanziierung genutzt werden können. Daher bietet dieses Konzept auch die Möglichkeit, bestehende unternehmensspezifische Lösungen automatisiert oder teilauto-

matisiert über bestehende semantische Verbindungen zu integrieren und gemäß dem Workflow einzusetzen.

Neben der Möglichkeit einer stärkeren Parallelisierung der Aufgaben besteht ebenfalls die Möglichkeit einer weiteren Zeitersparnis durch die Unterstützung der Abteilungen bei den zu bearbeitenden Aufgaben. In diesem Zusammenhang sind beispielhaft die automatisierte Erstellung der Grobgeometrie und die Prozessreferenzierung bei der Zerspanung aufgeführt.

Zurzeit existieren viele unternehmensspezifische Featurekonzepte, um verschiedene Routinearbeiten zu automatisieren. Da diese Konzepte nur für bestimmte Aufgaben konzipiert sind, wird die Integration in ein Gesamtkonzept meist nicht in Erwägung gezogen, wodurch der Zeitvorteil nur bei der Unterstützung einzelner Aufgaben gegeben ist. Das vorgestellte Featurekonzept der Skelettmodellierung hingegen kann als globales Konzept für die Produktentstehung verwendet werden, da es die Basis für unterschiedlichste CAx-Tätigkeiten entlang des Produktentstehungsprozesses darstellt. Neben den beschriebenen planerischen Tätigkeiten sind weitere Anwendungen denkbar. Das Basisfeaturekonzept kann auch für FEM-Berechnungen genutzt werden, indem beispielsweise definierte geometrische Bereiche als Krafeinleitungspunkte genutzt werden.

Die frühe Integration der Abteilungen, die mit integrierten Regelkreisen gleichzusetzen ist, führt zu einer verbesserten Transparenz der Auswirkungen der Entscheidungen entlang der Produkt- und Prozessentwicklung. Basierend auf der verbesserten Zusammenarbeit der Abteilungen ist mit einem reibungsfreieren Produktionsanlauf zu rechnen, da die Produkte hinsichtlich der Bauteilfertigung und der Montage besser aufeinander abgestimmt sind und den DFMA-Kriterien entsprechen.

Neben diesen organisatorischen Verbesserungen bewirkt die Integration von Regelkreisen ebenfalls eine kostengünstigere Produktion, da die Prozessfolgen im Verbund gesehen werden und eine Optimierung hinsichtlich der gesamten Produktion angestrebt wird. Hierbei wird beispielsweise auch die Qualität der Produktion verbessert, da ungünstige Prozesskonstellationen weitestgehend eliminiert werden können, die potentiell für Ausschuss verantwortlich sind.

Durch die Erstellung eines digitalen Modells des Fertigungssystems ist es möglich, Daten an die Steuerungs- und Regelungstechnik weiterzugeben und diese als Anforderungen an die Automatisierung zu sehen. Anhand dieses digitalen Modells können nach Erstellung der Steuerungsprogramme erste Testläufe gemacht werden, wodurch die Steuerung hinsichtlich der Ausbringung oder der Prozesssicherheit optimiert und abgesichert wird.

Basierend auf den digitalen, hinsichtlich Steuerungs- und Regelungstechnik abgesicherten Modellen der Produktionssysteme wird der Produktionsstart unterstützt, da die Testläufe mit dem realen Fertigungssystem reduziert werden können. Zur Realisierung der Interaktion des realen und des digitalen Produktionssystems müssen Schnittstellen den Datenaustausch gewährleisten.

6.2 Kritische Konzeptbetrachtung

Das vorgestellte Gesamtkonzept erlaubt eine integrierte Produktentwicklung, die es ermöglicht, den Produktentwicklungsprozess zu beschleunigen und die Produktionsplanung nach unterschiedlichen Kriterien zu bewerten. Mit der globalen Sicht auf die Produktentwicklung können wirtschaftliche Prozessoptimierungen vorgenommen werden, die auf der Bewertung der unterschiedlichsten Fertigungsalternativen beruhen. Damit verschiedene Fertigungsalternativen zu einem sehr frühen Zeitpunkt in der Produktentwicklung bewertet werden können, müssen die vorgestellten Standards sowohl in der Produktentwicklung als auch in der Prozessentwicklung die gemeinsame Arbeitsgrundlage darstellen, wodurch sich Wettbewerbsvorteile bezüglich Zeit- und Kostenersparnis ergeben.

Das Konzept ist für alle Größen von Industrieunternehmen geeignet, da es modular aufgebaut ist und je nach Bedarf angepasst werden kann. Eine stufenweise Umsetzung der Standardisierung wird durch die Bildung von Feature-Kombinationen gewährleistet. Hierbei ergibt sich die Möglichkeit, das Konzept nur teilweise umzusetzen, wodurch eine Umsetzung im Rahmen der finanziellen Möglichkeiten erfolgen kann. Bei der Auswahl der Module bildet der Konstruktionsstandard als Basisinformation für alle Planungsaktivitäten einen fixen Startpunkt von dem ausgehend alle Module beliebig kombiniert werden können.

Der Fokus bei der Modulauswahl korreliert mit den Arbeitsbereichen des Unternehmens, die unterstützt werden sollen. Somit sind für einen Komponentenhersteller, meist Klein- und Mittelständige Unternehmen (KMU), beispielsweise nur die Module „flexible CAD-CAM-Kopplung“ oder „Qualitätsprüfung“ von Interesse. Handelt es sich jedoch um ein Großunternehmen, das Teilefertigung, Montage und Qualitätssicherung als Kernkompetenzen aufweist, sollte die Umsetzung des Gesamtkonzepts das Ziel sein, um eine ganzheitliche Optimierung anzustreben.

Erfahrungsgemäß erfordert die Erarbeitung eines Standards und des Wissensmanagements sehr viel Zeit und ist mit hohen Kosten verbunden und daher als Risikoinvestition zu sehen. Dieser Aufwand muss parallel zum laufenden Betrieb bewältigt werden, was mit doppelten Kosten einhergeht, aber den laufenden Betrieb nicht beeinträchtigt. Neben diesen Kosten ent-

steht zusätzlicher Aufwand für Mitarbeiterschulungen, damit die Konzeptanwendung durch die Mitarbeiter getragen werden kann. Kosten für neue Softwaretools entstehen nur bei einem Teil der Konzeptumsetzung, da z.B. bei der Methode der Montageplanung Funktionen bestehender Softwaretools eingesetzt werden, wodurch hier nur geringer Schulungsbedarf besteht. Bei der Umsetzung des Konzeptes, ist es möglich, dass auf Mitarbeiterseite verschiedene Akzeptanzprobleme auftreten. So müssen z.B. die Konstrukteure ihre Arbeitsweise an den integrierten Ansatz anpassen, der sie nach der Umsetzung zwar entlastet, aber bei der Einführung zunächst zusätzlich belastet. Auf Seiten der Planung ist ebenfalls mit Akzeptanzproblemen zu rechnen, da sehr viele Arbeitsabläufe automatisiert ablaufen und die Entscheidungslogik für oder gegen verschiedene Fertigungsprozesse nicht direkt ersichtlich ist. Der Vorteil der automatisierten Prozess- und Ressourcenplanung besteht jedoch in der automatisierten Erstellung der Simulationsmodelle, um Fertigungsalternativen automatisiert zu generieren und zu bewerten, wodurch dem Planer der aufwändige Aufbau der Simulationsmodelle abgenommen wird. Die Möglichkeit, Feature-Kombinationen zu erstellen, ist die Stärke des vorgestellten Konzepts der Skelettmodelle, da bestehende unternehmensspezifische Featurekonzepte integriert werden können. Somit können bereits erfolgreich integrierte Konzepte weiter verwendet werden, wodurch Kosten eingespart und bestehendes Know-how konserviert wird. Ebenfalls kann ein Widererkennungseffekt bei der Modellierung und der Prozessdefinition erzielt werden, wodurch Akzeptanzprobleme reduziert werden.

Im Rahmen der Konzeptumsetzung kann es nötig sein, Personalumstrukturierungen vorzunehmen, da Kapazitäten freiwerden und neue Aufgabenbereiche entstehen. Im Bereich der Wissensrepräsentation müssen beispielsweise permanente Anpassungen an Neuerungen (neue Fertigungstechnologien, verbesserte Ressourcen) vollzogen werden, um auch aus technologischer Sicht die Produktrealisierung optimieren zu können. Ebenfalls müssen bestehende Produkte und Fertigungssysteme in den Standard des Konzepts überführt werden, was mit zusätzlichem Aufwand bedeutet, damit diese automatisiert innerhalb des 5-Ebenen-Modells der Prozessplanung angesprochen werden können, um Fertigungsgruppen zu lokalisieren.

Das Konzept ist in erster Linie auf Großunternehmen ausgerichtet, da diese die Möglichkeit haben, die Investition für die Gesamtumsetzung zu tätigen, und bei ihnen die größten Einsparungen mit der globalen Sicht auf die Produktion möglich sind.

6.3 Ausblick

Das vorgestellte Konzept bietet Unternehmen die Möglichkeit, Einsparungen im Hinblick auf Zeit und Kosten zu realisieren; damit darüber hinaus weitere Zeitvorteile im Produktentste-

hungsprozess erzielt werden können, müssen zusätzliche zur Automatisierung von Routinetätigkeiten weitere Feature-Elemente im Bereich der Konstruktion und der Prozessplanung erarbeitet werden. Um mit der Anwendung der Szenariotechnik auf das 5-Ebenenmodells der Prozessplanung technologisch optimierte Ergebnisse zu erzielen, müssen die Datenbanken des Prozesswissens um die unterschiedlichsten Fertigungstechnologien in Verbindung mit Ressourcen erweitert werden. Weitere Standardisierungen erhöhen die Transparenz der verschiedenen Modelle, wodurch ein höherer Automatisierungsgrad erzielt werden kann, der schneller zu einem höheren Produktreifegrad führt.

Damit das Konzept der Skelettmodelle auch in Zukunft auf dem neuesten Stand eingesetzt werden kann, ist es wichtig, mit Hilfe der Bildung von Feature-Kombinationen zukünftige erarbeitete Methoden und Konzepte einfließen zu lassen, um die Potentiale des integrierten Ansatzes zu steigern. Ebenfalls sollten Aktivitäten im Bereich der Digitalen Fabrik berücksichtigt werden, um Verbesserungen in der Durchgängigkeit der Daten zu übernehmen und das Konzept gegebenenfalls an neue Anforderungen anzupassen.

Quellenverzeichnis

Literatur

- [Abel90] Abeln, O.: Die CA-Techniken in der industriellen Praxis, München, Wien 1990.
- [AbSc04] Abramovici, M.; Schulte, S.: PLM-igische Fortsetzung der PDM-Ansätze oder Neuaufgabe des CIM-Debakels? Ergebnisse einer Experten-Studie in der Automobilindustrie, In: VDI-Berichte 1819 I²P 2004 – Integrierte Informationsverarbeitung in der Produktentstehung, Stuttgart, 2004.
- [ACHK06] Aldinger, L.; Constantinescu, C.; Hummel, V.; Kreuzhage, R.; Westkämper, E.: Neue Ansätze im „advanced Manufacturing Engineering“, in: wt Werkstattstechnik 96 (2006) H. 3, S. 110-114.
- [AdWM00] Adunka, R.; Wartzack, S.; Meerkamm, H.: Computer Aides Multi-Criteria Evaluation of Construction Structure Variants, Proceedings of the International Workshop on Multi-Criteria Evaluation MCE 2000, Neukirchen, Deutschland, 2000.
- [Aka092] Akao, Y.: QFD-Quality Function Deployment, Verlag Moderne Industrie, Landsberg Lech, 1992.
- [AlBM02] Alt, G., Bill H., Maching, M.: Innovation –Technik – Zukunft Die Wissens- und Informationsgesellschaft gestalten, 2002.
- [AlNo03] Albers, A.; Nowicki, L.: Integration der Simulation in der Produktentwicklung – Neue Möglichkeiten zur Steigerung der Qualität und Effizienz in der Produktentwicklung, Symposium “Simulation in der Produkt- und Prozessentwicklung, Bremen, 2003.
- [Amen01] Amen, M.: Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A comparison on solution quality and computing time, International Journal of Production Economics 69, 2001, S. 255-264.
- [AnKL83] Andreasen, M.; Kähler, S.; Lund, T.: Design for Assembly, 2nd Edition, London, IFS Publications, 1983.

- [AnKL88] Andreasen, M.; Kähler, S.; Lund, T.: Design for Assembly, Berlin, Springer, 1988.
- [AnMe95] Anderl, R.; Mendgen, R.: Parametric design and its impact on solid Modeling applications, Proceedings of the third ACM symposium on Solid Modeling and Applications, Salt Lake City, Utah, USA, 1995.
- [AvBB06] Avgoustinov, N.; Bossmann, M.; Bley, H.: Approaches and Methods for Supporting the Assembly Planning by Means of Features and their Influence on the Development Process, in: Proceedings of the 39th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Ljubljana, Slowenien, 2006.
- [AvBF02a] Avgoustinov, N., Bley, H., Franke, C.: Feature-based Knowledge Representation for Assembly Process Modelling, CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Ischia, Italy, 2002.
- [AvBF02b] Avgoustinov, N., Bley, H., Franke, C.: Towards Feature-based Intelligent Assembly, Annals of the German Academic Society for Production Engineering IX (1), S. 97-100, 2002.
- [BäHa01] Bär, T.; Haasis, S.: Verkürzung der Entwicklungszeiten durch den Einsatz von Skelettmodellen und Feature-Technologie, VDI-Bericht Nr.1614, Düsseldorf, Germany, 2001
- [BäHa03] Bär, T.; Haasis, S.: Steps towards the Digital Factory, Proceedings of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Saarbrücken, 2003, S. 171-175.
- [Bär98] Bär, T.: Einsatz der Feature-Technologie für die Integration von Berechnungen in die frühen Phasen des Konstruktionsprozesses, Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 15, Dissertation, Saarbrücken, 1998.
- [BaRi00] Baumgarten, H. Risse, J.: Verkürzung der Time-to-Market – Logistikbasiertes Management des Produktentstehungsprozesses, Logistik-Management, 2000.
- [BBDH97] Bronsvort, W. F.; Bidarra, R.; Dohmen, M.; van Holland, W.; de Kraker, K. J.: Multiple-view feature modelling and conversion. In: Geometric Modelling: Theory and Practice - The State of the Art, Strasser W, Klein R, and Rau R (eds). Springer, Berlin, pp. 159-174.

- [Bern01] Berning, S.: Messungen von Belegungen durch Fertigungshilfsstoffe auf metallenen Werkstücken mittels mIR-Fasersonde, Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 23, Dissertation, Saarbrücken, 2001.
- [BiBr00] Bidarra, R.; Bronsvort, W. F.: Semantic feature modelling, Computer Aided Design 32, 2000, S. 201-225.
- [Bida99] Bidarra, R.: Validity maintenance in semantic feature modelling, PHD Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 1999.
- [BKNB02] Bidarra, R.; Kranendonk, N.; Noort, A.; Bronsvort, W. F.: A Collaborative Framework for Integrated Part and Assembly Modeling, Saarbrücken, Deutschland, 2002, S. 389-400.
- [BlBo05] Bley, H.; Bossmann, M.: Standardisierte Produktmodelle für die automatisierte Montageplanung – Feature-basierte Montageplanung unterstützt den Simultaneous Engineering-Prozess, in: wt Werkstattstechnik 95 (2005) H. 9, S. 627-631.
- [BlBo06a] Bley, H.; Bossmann, M.: Improved Manufacturing Planning based on Localisation of Product Synergy Effects by the Use of Feature Technology Cirp Journal of Manufacturing Systems, Vol 35, No1, pp. 55-61, 2006.
- [BlBo06b] Bley, H.; Bossmann, M.: Automated Assembly Planning Based on Skeleton Modelling Strategy, in: Precision Assembly Technologies for Mini and Micro Products, IFIP International Federation for Information Processing, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2006, S. 121-131.
- [BlBZ04] Bley, H.; Bossmann, M.; Zenner, C.: Flexible Process Models in Manufacturing based on Skeleton Product Models Preprints of IFAC-MIM Conference on Manufacturing, Modelling, Management and Control, Athens, Greece, 2004.
- [Blei97] Bleicher, K.: Management - kritische Kernkompetenz auf dem Weg zur virtuellen Unternehmung. In: Schuh, G.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Komplexität und Agilität. Springer-Verlag, Berlin 1997, S. 11-24.
- [BlFo94] Bley, H.; Fox, M.: Entwicklung eines Feature-basierten Konzepts zur Montageplanung, VDI-Berichte 1171, Serienfertigung feinwerktechnischer Produkte - von der Produktplanung bis zum Recycling, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994, S.231-250.

- [BIFO06] Bley, H.; Fischer, N.; Oberhausen, M.: Measuring Organic Layers on Surfaces, Annals of the German Academic Society for Production Engineering, WGP, 2006.
- [BIFW00] Bley, H.; Franke, C.; Wuttke, C.C.: Solving the Information Management Problem in the Digital Factory, in: Proceedings of the 33rd CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Stockholm, Schweden, 2000, S. 357-362.
- [BIFZ04] Bley, H.; Franke, C.; Zenner, C.: Integration of Product Design and Assembly Planning By the Use of Assembly Features, in: Proceedings of the 4th CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Sorrento, Italien, 2004, S. 319-324.
- [Blum06] Blumenau, J.-C.: Lean Planning unter besonderer Berücksichtigung der Skalierung wandlungsfähiger Produktionssysteme, Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 36, Dissertation, Saarbrücken, 2006.
- [BlZe05] Bley, H.; Zenner, C.: Handling of Process and Resource Variants in the Digital Factory, in: CIRP Journal of Manufacturing Systems, Vol. 34 (2005), No. 2, 2005, S. 187-194.
- [BoDK94] Boothroyd, G.; Knight, W.; Dewhurst, P.: Product design for Manufacture and assembly, 2nd Edition, Marcel Dekker, New York, 1994.
- [Bole02] Boles D.: Integration von Konzepten und Technologien des Electronic Commerce in digitale Bibliotheken, Oldenburg, 2002.
- [Boot94] Boothroyd, G.: Product design for manufacture and assembly, Computer Aided Design, 26(9): S. 505-520, 1994.
- [Brac02] Bracht, U.: Ansätze und Methoden der Digitalen Fabrik, In: Schulze, T.; Schlechtweg, S. und Hinz, V. (eds.): Simulation und Visualisierung 2002, SCS-Europe BVBA, Gent, Belgien, 2002, S. 1-11.
- [Braß03] Braß, E. Konstruieren mit CATIA V5 - Methodik der parametrischen assoziativen Flächenmodellierung; Carl Hanser Verlag, München – Wien, 2003.
- [BrHJ95] Bronsvort, W. F., Van Holland, W., Jansen, F. W.: Feature modelling for assembly, Graphics and Robotics, Straszer W. and Wahl F. (eds), Springer-Verlag, Berlin, S. 131-148, 1995.

- [Brow03] Brown, D. C.: Functional, Behavioral and Structural Features, Proceedings of DET'03, ASME 2003 Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference, Chicago, Illinois, USA, 2003.
- [BuBW96] Bullinger, H.-J.; Bading, A.; Warschat, J.: Forschungs- und Entwicklungsmanagement. Simultaneous Engineering, Projektmanagement, Produktplanung, rapid product development, Teubner Verlag, Stuttgart 1996.
- [BuWa90] Bullinger, H.-J.; Wasserloos, G: Reduzierung der Produktentwicklungszeiten durch Simultaneous Engineering. CIM 6/90 Management, S. 4-12.
- [BuWa97] Bullinger, H.-J.; Warschat, J.: Forschungs- und Entwicklungsmanagement, Teubner Verlag Stuttgart, 1997.
- [BuWR89] Bullinger, H.-J.; Warschat, J.; Richter, R.: Montagegerechter Erzeugnisentwurf auf der Basis objektorientierter Produktmodellierung, VDI Z 131 (1989) 11, S.67-70.
- [Cant87] Canty, E. J.: Simultaneous Engineering: Expanding scope of quality responsibility, Digital Equipment Corporation White Paper, 1987.
- [Capg05] Capgemini Studie: Unsichtbares, immaterielles Vermögen in sichtbare Wettbewerbsvorteile umsetzen, Berlin, 2005.
- [Carr95] Carriker, W. F.: A Rapid Prototyping System for Flexible Assembly, PhD thesis. Department of Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 1995.
- [Cele05] Celerant Consulting: Kostensenkung durch Qualitätsmanagement, Press Release, Düsseldorf, 2005.
- [Cies97] Ciesla, M.: Feature-basierte Messplanung für Koordinatenmessmaschinen, Dissertation Tu Berlin 1997, Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, 1997.
- [ChMG05] Chaudron, V.; Martin, P.; Godot, X.: Assembly sequences: Planning and simulating assembly operations, in: Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, Montréal, Kanada, 2005.

- [ChPe05] Chung, C.; Peng, Q.: An integrated approach to selective-disassembly sequence planning, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2005, S.475-485.
- [ChZh02] Chin, K.; Zhoa, Y.: STEP-based Multiview Integrated Product Modelling for Concurrent Engineering, in *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 20, No. 12, 2002.
- [CIKL03] Clarkson, P. J.; Keates, S.; Lebon, C.: *Inclusive design: design for the whole population*, Berlin, Springer, 2003.
- [Coop02] Cooper, R.: *Top oder Flop in der Produktentwicklung - Erfolgsstrategien: Von der Idee zum Launch*, Wiley-VCH, Weinheim, 2002.
- [Cors98] Corsten, H.; *Simultaneous Engineering als Managementkonzept für Produktentwicklungsprozesse*. In Horvath, P.; Fleig, G.(Hrsg.) *Integrationsmanagement für neue Produkte*, Schäfer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1998, S. 125-159.
- [CuFR96] Cuiper, R., Feldmann, K., Roßgoderer, U.: *Rechnerunterstützte Parallelisierung von Konstruktion und Montageplanung*, *ZWF* 91 7-8, S.338-341, 1996.
- [Darw84] Darwin, C.: *Die Entstehung der Arten - durch natürliche Zuchtwahl oder die Erhaltung der begünstigten Rassen im Kampfe ums Dasein*, Herausgeber: Heinrich Schmidt, J. V. Carus, 1884.
- [Diet95] Dietz, P.: *Concurrent Engineering - Folgen für die Ausbildung*, *Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen Nr. 20 der TU Clausthal*, 1995.
- [DiZS99] Dillerup, R.; Zahn, E.; Schmid, U.: *Investitionsentscheidung in flexible Fertigungssysteme. Ein integrierter systemdynamischer Bewertungsansatz*, *Zeitschrift für Betriebswirtschaft; Ergänzungsheft 1, Innovation und Investition*, 1999, S. 43-67.
- [DoTB01] Dombrowski, U.; Tiedemann, H.; Bothe, T.: *Auf dem Weg zur Digitalen Fabrik*, in: *Carolo-Wilhelmina* 1/2001, S. 44-49.
- [DrCo95] Driskill, E.; Cohen, E.: *Interactive Design, Analysis, and Illustration of Assemblies*, *Symposium on Interactive 3D Graphics*, Monterey CA, USA, 1995, S. 27-33.
- [Duec05] Duechting, C.: *Aufbau eines freigabe- und kommunikationsbasierten Assistenzsystems im Produktentstehungsprozess*, *Dissertation Dortmund*, 2005.

- [DuWo95] Dutta, D.; Woo, T. C.: Algorithm for Multiple Disassembly and Parallel Assemblies, Transaction of ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 177, 1995, S. 102-109.
- [EhKL98] Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung, Berlin, Springer, 1998.
- [Ehr95] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1995.
- [EhSc92] Ehrlenspiel, K.; Schall, S.: In CAD integrierte Kostenkalkulation, Konstruktion 44 (1992) 12, S.407-414.
- [EHSS91] Eigner, M.; Hiller, C.; Schindewolf, S.; Schmich, M.: Engineering Database – Strategische Komponenten in CIM-Konzepten, Hanser Verlag, München, 1991.
- [ElMa06] ElMaraghy, H. A.: Reconfigurable Process Plans for Reconfigurable Manufacturing, Proceedings of the 3rd International CIRP Sponsored Conference on Digital Enterprise Technology, Setúbal, Portugal, 2006.
- [ElNa97] Elinson, A.; Nau, D. S.: Feature-based Similarity assessment of Solid Models, Proceedings of the fourth ACM symposium on Solid modelling and applications, Atlanta, Georgia, United States, 1997, S. 297-310.
- [ELOM99] Eng, T.-H.; Ling, Z.K.; Olson, W.; Mclean, C.: Feature-based assembly modeling and sequence generation, Computers & Industrial Engineering 3, 1999, S. 17-33.
- [Eppi94] Eppinger, S.: A Model-Based Method for Organizing Tasks in Product Development. Springer Verlag, Cambridge 1994.
- [EvAW01] Eversheim, W.; Aßmus, D.; Weber, P.: Parametrik als Grundlage für eine integrierte Produkt- und Prozessentwicklung, wt Werkstattstechnik online Jahrgang 91 (2001) H.3, 2001, S. 112-116.
- [EVDH02] Elbestawi, M. A.; Veldhuis, S. C.; Deiab, I. M.; Habel, M. J. Roberts, C.: Development of a Novel Modular and Agile Face Machining Technology, Annals of the CIRP Vol. 51/1/2002, 2002, S. 307-310.

- [Ever95] Eversheim, W.; Bochtler, W.; Laufenberg, L.: Simultaneous Engineering – Erfahrungen aus der Industrie für die Industrie. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1995.
- [Ever97] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik – Arbeitsvorbereitung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1997.
- [Ever98] Eversheim, W.: Konstruktion, 3. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.
- [Fisc01] Fischer, M.: Produktlebenszyklus und Wettbewerbsdynamik, Deutscher Universitäts-Verlag, 2001.
- [Fisc05] Fischer, N.: Messung geringster organischer Belegung auf diffus reflektierenden Oberflächen mit einem mIR-faseroptischen Prüfkopf Produktionstechnik Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 31, Dissertation, Saarbrücken, 2005.
- [Fran03] Franke, C.: Feature-basierte Prozesskettenplanung in der Montage als Basis für die Integration von Simulationswerkzeugen in der Digitalen Fabrik, Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 28, Dissertation, Saarbrücken, 2003.
- [Frau96] Fraunhofer IAO Studie, 1996.
- [Frau00] Fraunhofer IAO Studie, 2000.
- [Frie89] Friedmann, T.: Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue, rechnerunterstützte Verfahren, Dissertation, Forschungsberichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe, Band 25, 1989.
- [FuNA99] Fujita, K; Nakayama, T.; Akagi, S.: Integrated Product Design Methodology for Aesthetics, Functions and Geometry with Feature-Based Modeling and Constrain Management, International Conference on Engineering Design, München, 1999.
- [GaEK01] Gausemeier, J.; Ebbesmeyer, P.; Kallmeyer, F.: Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen, Hanser, München, 2001.
- [GaFS96] Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O.: Szenario-Management: Planen und Führen mit Szenarien, München Wien, Hanser Verlag, 1996.
- [Gair81] A. Gairola: Montagegerechte Konstruktion, Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1981.

- [Gaul01] Gaul, H.-D.: Verteilte Produktentwicklung - Perspektiven und Modell zur Optimierung, München: Dr. Hut 2001. Produktentwicklung München, Band 45, Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- [Gebh96] Gebhardt, A.: Rapid Prototyping, Crl Hander Verlag, München, Wien, 1996.
- [GeRe04] Geckler, D.; Rehnelt, C.: Die „Digitale Fabrik“ als neue Wissensdrehscheibe zwischen OEM und Zulieferer, in: Projektmanagement aktuell 1/2004, S. 26-30.
- [Gier01] Gierhardt, H.: Global verteilte Produktentwicklungsprojekte – Ein Vorgehensmodell auf der operativen Ebene, München: Dr. Hut 2001. Produktentwicklung München, Band 46, Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- [GNRZ99] Gupta, S.; Nau, D.; Regli, W.; Zhang, G.: A methodology for systematic generation and evaluation of alternative operation plans. In Advances in feature Based Manufacturing, 1999, S. 161-184.
- [GrBi05] Graupner, T.-D.; Bierschenk, S.: Erfolgsfaktoren bei der Einführung der Digitalen Fabrik. In: Industrie Management 21 (2005), Nr. 2, 2005, S. 59-62.
- [Gres96] Greschner, J.: Lernfähigkeit von Unternehmen, Frankfurt, 1996.
- [GrDB01] Grüner, C.; Dick, M.; Birkhofer, H.: Strategy-Based Design for Environment – Methodology and Implementation in Industry, Proceedings of the International Conference on Engineering Design, Glasgow, England, 2001.
- [Gupt94] Gupta, S. K.: Automated Manufacturability Analysis of Machined Parts, PhD thesis, University of Maryland, College Park, MD, 1994.
- [GuTe05] Günther, H.-O. und H. Tempelmeier: Produktion und Logistik 6. Auflage, Springer, Berlin, 2005.
- [Haas95] Haasis, S.: Wissens- und Feature-basierte Unterstützung der Konstruktion von Strinradgetrieben unter besonderer Berücksichtigung des Gussgehäuses, Dissertation Universität Stuttgart, 1995, Fortschrittberichte VDI, Reihe 1, Nr 254, Düsseldorf, VDI Verlag, 1995.
- [Haas97] Haasis, S.: Nutzenpotentiale der durchgängigen Feature-Verarbeitung, VDI-Berichte 1322, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1997, S.63-82.
- [Han96] Han, J.: Survey of feature Resarch, Technical Report IRIS-96-346, University of Southern California Institute for Robotics and Intelligent Systems, 1996.

- [Hans01] Hans, B.: Entwicklung eines Konzeptes zur durchgängig Feature-basierten Produktmodellierung und Produktmodellverknüpfung von den Anforderungen, über das Konzept- bis hin zum Detailmodell, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM der Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2001.
- [HeHW99] Hesselbach, J.; Herrmann, C.; von Westernhagen, K.: Datenbanken als Informationsträger von der Produktentstehung bis zur Demontageplanung Tagungsbericht: Umweltinformatik zwischen Theorie und Industrieanwendung, 13. Int. Symposium. Magdeburg, 1999, S. 331-346.
- [Henn97] Henning, A.: Die andere Wirklichkeit, Adission Wesley Longmann Verlag GmbH, Bonn 1997.
- [HiAc97] Hirsch, B.; Actis-Dato, M.: Esprit CIM: Design Engineering, Management and Control of Production Systems, Amsterdam, New York et al: North-Holland, 1997.
- [HoBJ95] Van Holland, W.; Bronsvoot, W. F.; Jansen, F. W.: Feature modelling for assembly, in: Straßer W. and Wahl F. M. (Hrsg.): Graphics and Robotics, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 1995, S. 131-148.
- [Holl97] van Holland, W.: Assembly Features in Modelling and Planning, PhD thesis, Technische Universiteit Delft, 1997.
- [HRFW99] Haasis, S.; Franke, D.; Rommel, B.; Weyrich, M.: Feature-basierte Integration von Produktentwicklung, Prozessgestaltung und Ressourcenplanung, VDI Bereich 1497, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [HSP00] Haasis, S.; Ströhle, H.; Karthe, T.; Pfeifle, J.: Feature-basierte Prüfmodellierung, VDI Berichte Nr. 1569, Düsseldorf, VDI Verlag, 2000, S. 199-212.
- [HsLF92] Hsu, W., Lee, C.S.G., Fu, S.F.: Feedback evaluation of assembly plans, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1992, S. 2419-2424.
- [Huan96] Huang, G. Q.: Design for X: Concurrent Engineering Imperatives, London, 1996.
- [HuMa98] Huang, G. Q.; Mak, K. L.: Re-engineering the product development process with 'design for X', Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B (Journal of Engineering Manufacture) / 1998 / N9810 0430 700, 1998, S. 259-268.

- [Humb00] Humbert, A.:Einführung von 3D-Cad und PDM im Spezialmaschinenbau: Theorie \neq Praxis?! - Ein Erfahrungsbericht. Produkte entwickeln im realen Umfeld. VDI-Berichte, 1569 (2000), 2000, S. 87-98.
- [JoPS93] Jo, H. H.; Parsaei, H. R.; Sullivan, W. G.:Principles of Concurrent Engineering. In: Parsaei, Sullivan, (1993), 1993, S.3-23.
- [KaAh96] Karlsson, C.; Ahlström, P.: The Difficult Path to Lean Product Development, Journal of Product Innovation Management Vol. 13, 1996, S. 283-295.
- [KaTa96] Kanai, S.; Takahashi, H.: ASPEN: Computer-Aided Assembly Sequence Planning and Evaluation System Based on Predetermined Time Standard, Annals of the CIRP Vol 45/1/1996, 1996, S. 35-39.
- [KBGE98] Kunhenn, J.; Bugert, T.; Götzelt, U.; Enders, L.; Schön, A.; Vajna, S.: Parametrik im Produktentstehungsprozess – Möglichkeiten und Risiken. CAD-CAM-Report 17(1998) 10, S.86-91.
- [KhMa89] Khosla, P. K.; Mattikalli, R.: Determining the assembly sequence from a 3-D model, Journal of Mechanical Working Technology, 1989, S. 153-162.
- [KiBB06] Kiefer, J.; Baer, T.; Bley, H.: Mechatronic-oriented Engineering of Manufacturing Systems Taking the Example of the Body Shop. Proceedings of the 13th International Conference on Life Cycle Engineering, Leuven, 2006.
- [Kies97] Kiesewetter, T.: Integrativer Produktentwicklungsarbeitsplatz mit Multimedia- und Breitbandkommunikation, TU Berlin, Dissertation, 1997.
- [Klap92] Kalpakjian, S.: Manufacturing process for engineering materials, 2nd Edition, Addison-Wesley Publishing Company, 1992.
- [KIFK99] Klocke, F.; Fallböhrer, M.; Kopner, A.: Fertigungstechnologien und –prozesse wissensbasiert planen, optimieren sowie überwachen. ZWF 94 (1999) H.9, 1999, S. 509-513.
- [KlGC96] Kleinschmidt, E.; Geschka, H.; Cooper, R.: Erfolgsfaktor Markt – Kundenorientierte Produktinnovationen, Springer, Berlin, 1996.
- [Krau90] Krause, F.-L.: Wissensverarbeitung für die rechnerunterstützte Produktgestaltung, ZWF-CIM 85 (1990) 3, 1990, S. 146-150.

- [KrBB02] Krause, F.-L.; Baumann, R.; Böttge, U.; Jansen, H.; Kaufmann, U.; Ficiyan, Y.: iViP – integrierte Virtuelle Produktentstehung, in: Krause, F.-L.; Tang, T.; Ahle U. (Hrsg.): Leitprojekt integrierte Virtuelle Produktentstehung – Abschlussbericht, 2002.
- [KrKR92] Krause, F.-L.; Kramer, S.; Rieger, E.: Feature-basierte Produktentwicklung, ZWF.CIM 87 (1992) 5, 1992.
- [KrLe89] Krause, F.-L.; Lehmann, C. M.: Erweiterung des rechnerunterstützten Konstruierens durch Wissensverarbeitung; VDI Bericht 775, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989.
- [KuGu01] Kumar, M.; Gupta, S. K.: A geometric algorithm for automated design of multi-stage molds for manufacturing multi-material objects, Proceedings of the 6th ACM symposium on solid modeling and applications, Ann Arbor, Michigan, USA, 2001, S. 278-288.
- [KyRu04] Kyriakopoulos, K.; Ruyter, K.: Knowledge Stocks and Information Flows in New Product Development, Journal of Management Studies Vol.41 Issue 8, 2004, S.1469-1498.
- [Lamb97] Lambert, A. J. D.: Optimal Disassembly of Complex Products, Journal of Technovatin, 1997, Vol.35 No. 9, 1997, S. 2509-2523.
- [Lamb99] Lambert, A. J. D.: Optimal Disassembly Sequence Generation for Combined Material Recycling and Part Reuse, Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, 1999, S. 146-151.
- [LaMK01] Landers, R. G.; Min, B.-K.; Koren, Y.: Reconfigurable Machine Tools, Annals of the CIRP, Vol. 50/1/2001, 2001, S. 269-274.
- [Lee92] Lee, S.: Backward assembly planning with assembly cost analysis, Proceedings of the IEEE, International Conference on Robotics and Automation, 1992, S. 2382-2391.
- [LeGa96] Lee, K.; Gadh, R.: Destructive Disassembly to Supportino Virtual Prototyping, Journal of Design and Manufacturing, IIE, 1996.
- [Lehn00] Lehner, F.: Organisation Memory. Konzept und Systeme for das organisatorische Lernen und das Wissensmanagement, München/Wien, 2000.

- [Linn02] Linner, S.: Virtual Process Creation – Bridging the Gap from Design to Manufacturing, in: Tagungsband der 6. Automobiltechnischen Konferenz 2002, 03./04. Juli, Berlin, 2002.
- [LiON02] W. D. Li, S. K. Ong, A. Y. C. Nee; Recognizing manufacturing features from a design-by-feature model, *Computer-Aided Design* 34, 2002, S. 849-868.
- [LiRe98] Lindemann, U.; Reichwald, R.: *Integriertes Änderungsmanagement.*, Berlin, Springer 1998.
- [LiRI97] Lindemann, U.; Reinhart, G.; Irlinger, R.; Loferer, M.: Integrierte Gestaltung von Produkt und Produktionsmittel, Konferenzbericht, VDI Berichte 1357, 1997, S. 161-182.
- [LMHH02] Lindemann, U.; Mörtl, M.; Hessling, M.; Hutterer, P.: The Guideline „Design for Upgrading“ as a Medium for Sustainable Design. In: Marjanovic, D. (Ed.): *Proceedings of the 7th International Design Conference, Design 2002*, May 14-17 2002, Dubrovnik, Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Arch., The Design Society 2002, S. 1331- 1338.
- [LoSc94] Lotter, B.; Schilling, W.: *Manuelle Montage*, VDI Verlag, Düsseldorf, 1994.
- [LuWF06] Lu, C.; Wong, Y. S.; Fuh, I. Y. H.: An enhanced assembly planning approach using a multi-objective genetic algorithm, *Proceedings International Mechanical Engineering, Vol. 220 Part B, Journal of Engineering Manufacture*, 2006, S. 255-272.
- [MaBW97] Mathhes, F. L.; Bullinger, H.-J.; Warschat, J.: Featureorientierte Produktbeschreibung zur konstruktionsbegleitenden Montageplanung, VDI Berichte Nr. 1322, Düsseldorf, VDI Verlag, 1997, S. 135-160.
- [MäNS96] Mäntylä, M., Nau, D., Shah, J.: Challenges in feature-Based Manufacturing Research, *Communication of the ACM* February 1996, Vol. 39 No. 2, 1996, S. 77-85.
- [MäOP89] Mäntylä, M., Opas, J., Puhakka, J.: Generative process planning of prismatic parts by feature relaxation, in *Proceedings of 15th ASME Design Automation Conference*, ASME, New York, 1989, S. 49-60.
- [Marc04] Marczinski, G.: Digitale Fabrik – anspruchsvolle Technologien sinnvoll einsetzen, in: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 99 (2004) 11, S. 666-669.

- [Matt02] Matt, D.: Planung autonomer, wandlungsfähiger Produktionsmodule, ZWF Jahrgang 97 (2002) 4, 2002.
- [McKi00] McKinsey & Company: Strukturwandel im Maschinenbau. Vortrag Dr. Hartung, Montagekolloquium WZL, Aachen, Dezember, 2000.
- [McKi02] McKinsey & Company: Profitable Wachstumsstrategie für den Maschinenbau. Ergebnisse einer Studie von McKinsey & Company und dem Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen, VDMA Verlag, Frankfurt am Main, 2002.
- [MeSc03] Melchinger, A.; Schmitz E.-U.: Schneller und effizienter in der Entwicklung durch Simulation und Optimierung, Symposium Simulation in der Produkt- und Prozessentwicklung, 5-7. November, Bremen, 2003, S. 149-156.
- [MeWa99] Meerkamm, H.; Wartzack, S.: Durchgängige Rechnerunterstützung in der Produktentwicklung durch den Einsatz von hochwertigen Features. VDI-Berichte Nr. 1497, Düsseldorf: VDI Verlag, 1999, S. 369-390.
- [MiDü02] Milberg, J.; Dürrschmidt, S.: Planning Methodology for Changeable Logistical Systems, Production Engineering Vol. IX/1 (2002), 2002, S. 63-68.
- [MiGW94] Millner, J., Graves, S., Whitney, D.: Using simulated annealing to select least-cost assembly sequences, in IEEE International Conference on Robotics and Automation, S. 2058-2063, San Diego, May 1994.
- [MiKr01] Milberg, J.; Krüger, A.: Planning Method for Volume Flexible Assembly Systems, Production Engineering Vol. VIII/2 (2001), 2001, S.49-54.
- [MiOh86] Miyawaka, S. Ohashi, T.: The Hitachi assemblability evaluation method (AEM), In International Conference on Product Design for Assembly, 1986.
- [MiOI90] Miyakawa, S.; Ohashi, T.; Iwata, M.: The Hitachi Assemblability Method (AEM) And Its Applications, The International Conference on Manufacturing Systems And Environment_Looking Toward The 21th Century, 1990, S. 277-282.
- [Mitr60] Mitrofanow, S. P.: Wissenschaftliche Grundlagen der Gruppentechnologie, VEB Verlag Technik, Berlin, 1960.
- [Mitr66] Mitrofanov, S. P.: The Scientific Principles of Group Technology, National Lending Library Translation, 1966.

- [Mört02] Mörtl, M.: Entwicklungsmanagement für langlebige, upgradinggerechte Produkte. TU München, Produktentwicklung München, Band 51, 2002.
- [MoVM03] Monostori, L.; Váncza, J.; Márkus, A.; Kádár, B.; Viharos, Zs.J.: Towards the Realization of Digital Enterprises, Proceedings of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Saarbrücken, 2003, S. 99-106.
- [MuAn98] Mullins, S. H., Anderson, D. C.: Automatic identification of generic constraints in mechanical assemblies, Computer Aided Design, Vol. 30, No. 9, S. 715-726, 1998.
- [MVS098] Muth, M.; Vajna, S.; Sander, R.; Obinger, F.: Einsatz der OParametrik in der Produktentwicklung. VDI-Z 140 (1998), Special C-Techniken März, S. 38-41.
- [Navi91] Navion-Chandra, D.: Design for environmentability, in ASME Design Theory and Methodology Conference, 1991.
- [Navi93] Navion-Chandra, D.: A Design tool for environmental recovery analysis, in 9th International Conference on Engineering Design, 1993.
- [Nest00] Nester, A.: Integration von CAM-Funktionalitäten in durchgängigen CAD/CAM-Systemen, Dresdner CAD/CAM-Kolloquium, 2000.
- [Nobl93] Noble, J. S.: Economic Design in Concurrent Engineering. in Parsaei Sullivan, 1993, S.352-371.
- [NoBr99] Noort, A.; Bronsvort, W. F.: Enhanced multiple-view feature modelling, 1999.
- [Nort99] North, K., Wissensorientierte Unternehmensführung: Wertschöpfung durch Wissen, Wiesbaden, Gabler 1999.
- [Nowa74] Nowak, H.: Eine Methode zur Bestimmung der Reihenfolge von Bauelementen für die Montage von Baugruppen und Erzeugnissen – Beitrag zur Systematisierung und Rationalisierung der technologischen Vorbereitung von Montageprozessen, Dissertation, TU Dresden, 1974.
- [Opit70] Opitz, H.: Classification to Describe Workpieces. Pergamon Press, Oxford, 1970.
- [PaCh93] Park, J. H., Chung, M. J.: Automatic generation of assembly sequences for multi-robot workcell, Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, 10(2), S. 355-363, 1993.

- [PeWi89] Pennel, J. P.; Winner, R. I.: Concurrent Engineering: Contemporary issues and modern design tools, London, Glasgow, 1989.
- [Pfoh00] Pfohl, H.-C.: Logistiksysteme: betriebswirtschaftliche Grundlagen, 6. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 2000.
- [Phle99] Phleps, U.: Recyclinggerechte Produktdefinition – Methodische Unterstützung für Upgrading und Verwertung, TU München, Konstruktionstechnik München, Band 34, 1999.
- [Pill01] Piller, F. T.: Mass Customization. Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter, Wiesbaden, Gabler, 2001.
- [PrRR99] Probst, G.; Raub, S.; Romhardt, K.: Wissen managen - Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen, 3. Auflage, Frankfurt am Main/Wiesbaden, Gabler, 1999.
- [Puhr90] Puhr-Westerheide, J.: Beschaffung und Abwicklung komplexer Montageanlagen – ein Erfahrungsbericht, VDI-Berichte 871, 1990, S. 15-41.
- [RaAZ04] Radtke, P.; Abele, E.; Zielke, A. E.: Die smarte Revolution in der Automobilindustrie, Frankfurt am Main, Wirtschaftsverlag Carl Ueberreuter, 2004.
- [Radt95] Radtke, M.: Konzept zur Gestaltung prozess- und integrationsgerechter Produktmodelle. Dissertation, Universität Kaiserslautern 1995.
- [ReBF02] Reinhart, G.; Baudisch, T.; Fusch, T.; Lanza, M.: Rechnergestützte Produkt-, Prozess- und Anlagenentwicklung, in: Tagungsband der 6. Automobiltechnischen Konferenz 2002, 03./04. Juli, Berlin, 2002.
- [ReCh94] Redford, A.; Chal, J.: Design for Assembly, Principle and Practice, McGraw-Hill Book Company Europe, 1994.
- [ReDü00] Reinhart, G.; Dürrschmidt, S.: Produkt und Produktion gemeinsam geplant, in: newsletter iwB, Jahrgang 8 – Nr. 3, 2000, S. 1-2.
- [Remu02] Remus, U.: Integrierte Prozess- und Kommunikationsmodellierung als Ausgangspunkt für die Verbesserung von wissensintensiven Geschäftsprozessen, In: Abecker, A.; Hinkelmann, K.; Maus, H.; Müller, H.-J.: Geschäftsprozessorientiertes Wissensmanagement. Effektive Wissensnutzung bei der Planung und Umsetzung von Geschäftsprozessen, Springer Verlag, Berlin, 2002.
- [ReSc90] Reichwald, R.; Schmelzer, H.: Durchlaufzeiten in der Entwicklung – Praxis des industriellen F&E-Managements, München und Wien, 1990.

- [ReSe02] Reinhart, G.; Selke, C.: Automatic Building of Simulation Models – Information Becomes Knowledge, The 35th CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems, Seoul, Korea, 2002, S. 610-613.
- [Rieb89] Rieberer, A.: Schweißgerechter Konstruieren im Maschinenbau – Berechnungs- und Gestaltungsbeispiele, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1989.
- [Riss02] Risse, J.: Time-to-Market-Management in der Automobilindustrie. Dissertation, TU Berlin, 2002.
- [Roth03] Rother, A.: Krisenkommunikation in der Automobilindustrie. Eine inhaltsanalytische Studie am Beispiel der Mercedes-Benz A-Klasse. Tübingen 2003.
- [Rudo93] Rudolph, F. N.: Konfigurierbare Technische Elemente für Konstruktion und Arbeitsplanung, Dissertation TU Hannover, 1993.
- [SaRF93] Sanchez, S.M.; Ramberg, J. S.; Friero, J.: Quality by Design . in Kusiak, 1993, S. 235-286.
- [Schr03] Schraft, R. D.: Von der Vision zur Realität durch die Digitale Fabrik, in: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 98 (2003) 6, S. 268-269.
- [Schu94] Schuhmann, G.: Adaptive Planung des Produktentstehungsprozesses. Dissertation, TU Berlin 1994.
- [ScKH06] Schuh, G; Kampker, A.; Höhne, T.: Adaptive Logistik, Selbststeuerung in Fertigung und Montage, wt Werkstatttechnik online, Jahrgang 96 (2006) H. 5, 2006, S. 321-324.
- [ScSt93] Schulte, M.; Stark, R.: Definition und Anwendung höherwertiger Konstruktionselemente (Design Features) am Beispiel von Wellenkonstruktionen, Forschungsbericht Universität des Saarlandes, Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 2, Saarbrücken, 1993.
- [SeB197] Seel, U.; Bley, H.: Feature-basierte Montage – Konzepte und Realisierungsbeispiele für den Datenaustausch in komplexen automatisierten Montagesystemen. VDI Berichte Nr. 1322, Düsseldorf, VDI Verlag, 1997, S. 161-178.
- [Seid93] Seidenschwarz, W.: Target Costing: Marktorientiertes Zielkostenmanagement, München:, Vahlen 1993.

- [Selk05] Selke, C.: Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung, Forschungsberichte iwB, Dissertation, Herbert Utz Verlag GmbH, München, 2005.
- [SeSe90] Sethi, A. K.; Sethi, S. P.: Flexibility in Manufacturing: A Survey, in International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 2. Jahrgang, 1990, Nr. 4, S. 289-326.
- [Shah91] Shah, J.J.: Conceptual Development of Form Features and Feature Modelers, in: Research in Engineering Design Vol. 2, Number 1, 1990.
- [ShBh89] Shah, J. J.; Bhatnagar, A.: Group technology classification from feature-based geometric models, Manufacturing Review 2(3), 1989, S. 204-213.
- [ShEl05] Shabaka, A; ElMaraghy, H. A.: Mapping Products Machining Requirements and Machine Tools Structure Characteristics in RMS, CARV'05, International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and virtual Production, Technical University of Munich, Germany, 2005.
- [ShEl06] Shabaka, A; ElMaraghy, H. A.: Generation of Machine Coinfiguration Based on Product Features, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2006.
- [ShRC00] Shetty, D.; Rawolle, K.; Campana, C.: A New Methodology for Ease-Of-Disassembly in Production Design, Recent Advances in Design for Manufacture (DFM), ASME, 2000.
- [ShRo93] Shah, J. J., Rogers, M. T.: Assembly modelling as an extension of feature-based design, Research in Engineering Design (5) , 1993, S. 218-237.
- [Siem02] N. N.: Fabrik im Computer, in: Siemens Pictures of the Future, Herbst 2002.
- [SpKr84] Spur, G.; Krause, F.-L.: CAD-Technik. Lehr- und Arbeitsbuch für Rechnerunterstützung in Konstruktion und Arbeitsplanung, Hanser Verlag, München-Wien, 1984.
- [SpKr97] Spur, G.; Krause, F.-L.: Das virtuelle Produkt – Management der CAD-Technik. München-Wien: Hanser-Verlag, 1997.
- [SPSF80] Schönfeld, S.; Pöttrich, W.; Sieber, P.; Franz, L.: Analyse des Konstruktionsprozesses – Ein Mittel zur Rationalisierung und Intensivierung in der Konstruktion , Maschinenbautechnik 29 (1980) 5, 1980, S. 204-208.

- [Spur98] Spur, G.: Technologie und Management, Hanser Verlag, 1998.
- [SrCr94] Srikantappa, A.; Crawford, R.: Automatic part coding based on interfeature relationships, *Advances in Feature Based Manufacturing*, Elsevier/North Holland, 1994, S. 215-237.
- [StHC97] Stage, R., Henderson, M., Roberts, C.: A framework for representing and computing tool accessibility, in *ASME Design for Manufacturing Conference*, Sacramento, CA, 1997.
- [Stie99] Stiegler, G.: *Produktionsplanung und Produktionssysteme im Fahrzeugbau*, Manz-Verlag Schulbuch, Wien, 1999.
- [SuCC01] Sung, R. C. W.; Corney, J. R.; Clark, D. E. R.: Octree Based Assembly Sequence Generation, *ACM*, 2001, S. 120-129.
- [SuDP95] Subrahmanyam, S.; DeVries, W.; Pratt, M. : Features Attributes and their Role in Product Modeling, *Proceedings of the Symposium on Solid Modeling and Applications*, Salt Lake City, UT, May 17-19, 1995, S. 115-124.
- [TaSa05] Takeuchi, S.; Saitou, K.: Design for Product Embedded Disassembly Sequence, 6th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning: From Nano to Marco Assembly and Manufacturing, 2005, S. 41-45.
- [TDLS02] Tönshoff, K.; Denkena, B.; Lünemann, M.; Schnebeck, T.: Intelligent Fixtures in Manufacturing Systems, *Production Engineering Vol. IX/1 (2002)*, 2002, S. 139-142.
- [TeKu92] Tempelmeier, H.; Kuhn, H.: *Flexible Fertigungssysteme*, Berlin, Springer, 1992.
- [TeKu93] Tempelmeier, H.; Kuhn, H.: *Flexible Manufacturing System - Decision Support for Design and Operation*, New York: Wiley, 1993.
- [ThWe97] Thoben, K. D., Weber, F.: Information and Communication Structures for product development in the Concurrent Enterprise: Requirements and Concepts, *Life-Cycle Approaches to Production Systems-Management, Control, Supervision*, the Annual Conference of ICIMS-NEO, Budapest, 1997, S. 460-467.

- [TöSc01] Tönshoff, H.-K.; Schnülle, A.: Highly Productive and Reconfigurable Manufacturing Systems, Proceedings of the International CIRP Design Seminar, Haifa, 2001, S. 377-381.
- [TöZa99] Tönshoff, H.-K.; Zahn, G.: Wissensbasiertes Datenmodell für die Konstruktion und Arbeitsplanung. ZWF 94 (1999) 3, 1999, S. 108-110.
- [Tryg93] Trygg, L.: Concurrent Engineering Practices in Selected Swedish Companies: A Movement or an Activity on the Few?, Journal of Product Innovation Management Vol. 10, 1993, S.403-415.
- [TWTH01] Tönshoff, H.-K.; Woelk, P.-O.; Timm, I.J.; Herzog, O.: Flexible Process Planning and Production Control Using Co-Operative Agent Systems. In: Proceeding of the International Conference on Competitive Manufacturing (COMA'01), Stellenbosch, South Africa, 2001.
- [VaPo98] Vajna, S.; Podehl, G.: Durchgängige Produktmodellierung mit Features, CAD-CAM Report Nr. 3, 1998.
- [VDI92] Beiträge zu "Wissensbasierte Systeme für Konstruktion und Arbeitsplanung" herausgegeben von der VDI-EKV und der GI, VDI-Verlag, 1992.
- [Viel05] Vielhaber, M.: Assembly Oriented Design – Zusammenbauorientiertes Konstruieren im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie am besonderen Beispiel des Karosserierohbaus, Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 34, Dissertation, Saarbrücken, 2005.
- [VMSO98] Vajna, S.; Muth, M.; Sander, R.; Obinger, F.: Einsatz der Parametrik in der Produktentwicklung, VDI-Z Special C-Techniken, Nr. 1 (1998), 1998, S. 38-14.
- [Wagen98] Wagenheim van, S.: Integrationsbedarf neuer Produkte dargestellt am Beispiel der Automobilindustrie, in Horvath, P.; Fleig, G.: Integrationsmanagement für neue Produkte, Stuttgart, 1998, S.59-86.
- [Warn93] Warnecke, H.-J.: Revolution der Unternehmenskultur – Das Fraktale Unternehmen, Springer-Verlag, Berlin, New York, 1993.
- [Webe96] Weber, C.: What is a feature and What is its Use? – Results of FEMEX Working Group I Proceeding of the 29th International Symposium on Automotive Technology and Automation, Florence, Italy, 1996, S109-116.

- [Webe99] Weber, F.: Concurrent Engineering- Reduzierung der „Time-to-Market“, Vorlesungsumdruck des BIBA (bremer Institut für Betriebstechnik und angewandte Arbeitswissenschaften an der Universität Bremen, 1999.
- [WeJR03] Westkämper, E.; Jovanoski, D.; Rist T.: New Framework for Digital Factory Planning, Proceedings of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Saarbrücken, 2003, S. 191-198.
- [WeKr99] Weber, C.; Krause, F.-L.: Features mit System – die neue Richtlinie VDI 2218. VDI-Berichte Nr. 1497, Düsseldorf: VDI Verlag, 1999, S. 349-367.
- [WeWS00] Weber, C.; Werner, H., Schilke, M.: Einsatz der Feature-Technologie für die automatisierte Generierung optimierter FEM-Netze, VDI-Berichte Nr. 1569, Düsseldorf: VDI Verlag, 2000, S. 385-397.
- [Wien00] Wiehdahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit: Neues Zielfeld in der Fabrikplanung, in Industrie Management 16 Jg. 2000, Nr. 5, S. 37-41.
- [Wien02a] Wiehdahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit: Schlüsselbegriff der zukünftigen Fabrik, in wt Werkstattstechnik online, Jg. 2002, Nr. 2002, S. 122-127.
- [Wien02b] Wiendahl, H.-P.: Auf dem Weg zur „Digitalen Fabrik“, wt Werkstattstechnik online Jahrgang 92 H.4, 2002, S. 121.
- [WiSc98] Wiendahl, H.-P.; Scheffczyk, H.: Wandlungsfähige Fabrikstrukturen, wt Werkstattstechnik online Jahrgang 88 (1998) H.4, 1998, S. 171-175.
- [WoDu91] Woo, T. C.; Dutta, D.: Automatic disassembly and total ordering in three dimensions, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 113, 1991, S. 207-213.
- [WoJR92] Womack, J. P.; Jones, D. T.; Roos, D.: The Machine that changed the World, New York, associates et al, 1992.
- [Wolf94] Wolfram, M.: Feature-basiertes Konstruieren und Kalkulieren, Dissertation TU München, München, Hanser Verlag, Reihe Konstruktionstechnik, Band 19, 1994.

- [Wozn92] Wozny, M.J.: Research Trends in the U.S. for the next Generation CAD-Systems. In: Krause, F.-L; Ruland, D.; Jansen, H. (Hrsg.): CAD '92 – Neue Konzepte zur Realisierung anwendungsorientierter CAD-Systeme, Tagungsband der GIFachtagung, Berlin 14./15. Mai 1992, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1992, S.30-65.
- [WuHK06] Wurst, K.-H.; Heisel, U.; Kircher, C.: (Re)konfigurierbare Werkzeugmaschinen – notwendige Grundlage für eine flexible Produktion, wt Werkstatttechnik online Jahrgang 96 (2006) H. 5, 2006, S. 257-265.
- [WZBT00] Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P.; Tilebein, M.: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen, in wt Werkstatttechnik online 90 Jg. 2000, Nr. 1/2, S. 22-25.
- [ZäPF03] Zäh, M. F.; Patron, C.; Fusch, T.: Die Digitale Fabrik – Definition und Handlungsfelder, in: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 98 (2003) 3, S. 75-77.
- [ZäRW05] Zäh, M. F.; Rimpau, C.; Wiesbeck, M.: Produktion im globalen Umfeld, in: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 100 (2005) 5, S. 246-250.
- [Zenn06] Zenner, C.: Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung, Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 37, Dissertation, Saarbrücken, 2006.
- [Ziet03] Ziethen, D. R.: CATIA V5 - Effiziente Konstruktion mit Makros - Automatisierte Erstellung von Volumenkörpern, Drahtgeometrie und Flächen mit CATScript; Carl Hanser Verlag, München-Wien, 2003.

Normen und Richtlinien

- [823] N.N.: Merkblatt 823: Schweißen von Edelstahl Rostfrei, Warenzeichenverband Edelstahl Rostfrei e.V., 4. Auflage, 2004.
- [DIN 6789] N.N.: DIN 6789: Dokumentationssystematik, Blatt 1-6, Beuth Verlag, Deutsche Institut für Normung e. V. Berlin, Wien Zürich, 2003.
- [VDA-4.3] Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA): Qualitätsmanagementcenter (QMC): Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz, Band 4 Teil3. Projektplanung, Heric, Frankfurt, Erste Auflage, 1998.
- [VDI2209] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2209: 3D-Produktmodellierung, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2006.
- [VDI2211] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2211: Datenverarbeitung in der Konstruktion; Methoden und Hilfsmittel; Maschinelle Herstellung von Zeichnungen, Blatt 3, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1980.
- [VDI2218] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2218: Feature-Technologie, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [VDI2221] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003.
- [VDI2235] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2235: Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren; Methoden und Hilfen VDI-Verlag, Düsseldorf, 1987.
- [VDI3237] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3237: Fertigungsgerechte Werkstückgestaltung im Hinblick auf automatisches Zubringen, Fertigen und Montieren: Blatt 1 und 2, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1978.
- [VDI3633] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3633 Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Blatt 1, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.
- [VDI4499] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4499, Digitale Fabrik – Grundlagen, Blatt 1, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2006.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozentuale Marktanteile bei der Einführung von Produktinnovationen [McKi00, McKi02].....	2
Abbildung 2: Erfolgchancen verschiedener Maßnahmen zur Verkürzung der Produktentstehungszeit [BuWa90].....	4
Abbildung 3: Kostenverursachung und Kostenverantwortung in der Produktentwicklung [Ever98].....	5
Abbildung 4: Anforderungen an das zu erstellende Konzept in Anlehnung an [Spur98].....	11
Abbildung 5: Produktentstehungsprozess in Anlehnung an [GaEK01].....	13
Abbildung 6: Phasenschema des Produktentstehungsprozesses in Anlehnung an [BaRi00]...	14
Abbildung 7: Gesamtrentabilität in Abhängigkeit von der Time-to-Market [Puhr90]	18
Abbildung 8: VDI 2221 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte	20
Abbildung 9: Anteile der unterschiedlichen Konstruktionsarten [Abel90]	21
Abbildung 10: Evolutionsstufen der Produktmodellierung [VDI92].....	22
Abbildung 11: Entwicklung der Feature-Technologie [VDI 2218].....	25
Abbildung 12: Bereiche des „Design for X“	27
Abbildung 13: Variantendarstellung eines Verbrennungsmotors basierend auf der Skelettmodellierung	35
Abbildung 14: Einsatzdichte der Feature-Technologie in den einzelnen Produktentwicklungsphasen [VaPo98]	38
Abbildung 15: Assembly-Feature-Konzept [AvBB06].....	45
Abbildung 16: Prozess des Wissensmanagements [PrRR99]	52
Abbildung 17: Wissenstreppe [Nort99]	53
Abbildung 18: Bewertungsmatrix von Wissensrepräsentationen in CAD-Systemen.....	57
Abbildung 19: Bewertung der Wissensrepräsentation nach Hauptgruppen.....	58
Abbildung 20: „over the wall“ zur integrierten Produktentstehung.....	63
Abbildung 21: Vorverlagerung von Änderungen [LiRe98].....	64
Abbildung 22: Vorgänger-Nachfolger-Beziehung verschiedener Strategien	65
Abbildung 23: Zeitersparnis durch den Simultaneous Engineering Prozess	67

Abbildung 24: klassischer und simulationsgestützter Produktentwicklungsprozess [MeSc03]	69
Abbildung 25: Planungsaufwand in der Montage nach Nowak [Nowa74]	73
Abbildung 26: Rechnergestützter Auftragsdurchlauf	75
Abbildung 27: Ablaufplan der Produktentwicklung in der Automobilindustrie nach VDA [VDA-4.3]	77
Abbildung 28: Veränderter Informationsgewinn bei der Produktmodellierung	78
Abbildung 29: Informationsgehalt in der Produktentstehung	82
Abbildung 30: Informationszuwachs bei der Parallelisierung der der Produktentstehung	83
Abbildung 31: Planungsphasen der Fertigung	85
Abbildung 32: Einsatzgebiete der digitalen Fabrik [Zenn06, Linn02]	88
Abbildung 33: Aufbau der Skelett- und Funktionselemente	93
Abbildung 34: Hierarchieebenen der standardisierten Skelettmodelle	94
Abbildung 35: Prozess- und Ressource-Element	98
Abbildung 36 Feature-Technologie als Schnittstelle zwischen Konstruktion und Produktionsplanung	100
Abbildung 37: Erstellung des Prozess- und Ressource-Skeletts aus dem Produktskelettmodell	105
Abbildung 38: Fertigungsabschnittsmodelle einer Welle	106
Abbildung 39: flexible CAD-CAM-Kopplung [BIBZ04]	107
Abbildung 40: Interpretation der Skelettelemente in Fügeflächen und Montageprozesse [BIBo05]	113
Abbildung 41: Ablauf der Montagevorranggrapherstellung	114
Abbildung 42: Feature-basierte Prozessplanung über ein „neutrales“ Format	115
Abbildung 43: Absicherungsstufen der Montagesimulation mit Rückkopplung zur Konstruktion und Prozessplanung [BIBo06b]	118
Abbildung 44: Kollisionsarten eines TfVs	121
Abbildung 45: Flussdiagramm der Ablauflogik bei der Ermittlung der Montagereihenfolge	122
Abbildung 46: TfV-Modell eines Getriebes	123
Abbildung 47: Montageebenenmodell des Getriebes mit zwei Modifikationen (B.1/B.2) ...	125

Abbildung 48: TFV zur Planungsunterstützung parallel ausführbarer Montageschritte	126
Abbildung 49: Mögliche Montagesequenzen eines vereinfachten Getriebemodells	127
Abbildung 50: Konstruktionsmodell und FEM-Modell einer Schweißlinse	131
Abbildung 51: Verfügbare Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsanalyse flexibler Fertigungssysteme [DiZS99].....	140
Abbildung 52: prozentuale Schnittmenge der Merkmale für Produktionsfamilien	141
Abbildung 53: Flächendarstellung in der Fertigungsgruppenbildung aufgrund prozentualer Übereinstimmung	144
Abbildung 54 Zuordnung von produktorientierten Fertigungssystemen [BlBo06a]	147
Abbildung 55: Konzeptübersicht	149

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: DFMA Richtlinien	28
Tabelle 2: Prinzipdarstellung ausgewählter Verbrennungsmotoren	34
Tabelle 3: Featuretypen	42
Tabelle 4: Bewertung bestehender Assembly-Feature-Konzepte	48
Tabelle 5: Ergebnisse von Simulationswerkzeugen über die Produktentwicklung [MeSc03]	68
Tabelle 6: Aufgaben und Planungsphasen der Montageplanung	72
Tabelle 7: vereinfachte Darstellung des Phasenmodells des Szenariomanagements [GaFS96]..	86
Tabelle 8: klassische Verbindungen mit spezifischen Fügebewegungen	117

Abkürzungsverzeichnis

AF	Assembly Feature
AHP	Analytischer Hierarchie Prozess
AIAG	Automotive Interest Action Group
APQP	Advanced Product Quality Planning
Bemi	Betriebsmittel
CAC	Computer Aided Control
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAI	Computer Aided Industry
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAO	Computer Aided Optimization
CAP	Computer Aided Production
CAPP	Computer Aided Production Planning
CAX	Computer Aided X
CNC	Computer Numeric Control
CE	Concurrent Engineering
DFA	Design for Assembly
DFE	Design for Environment
DFM	Design for Manufacturing
DFX	Design for X
DMU	Digital Mock-up
FEM	Finite Elemente Methode
FFS	Flexibles Fertigungssystem
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FMOG	Feature Maiting Operation Graph
GMG	Geometric Maiting Graph
IPD	Integrated Product Development
IPM	In Process Model
KBE	knowledge based Engineering
MAUT	Multi Attribute Utility Theory
MI	Montageinformation
MF	Manufacturing Feature

NC	Numeric Control
PDM	Product Data Management
PLC	Product Lifecycle
PM	Prozessmanagement
PMU	Physical Mock-up
PPR	Produkt-Prozess-Ressource
SE	Simultaneous Engineering
SMED	Single Minute of Die
TfV	Transformationsvolumen
TQM	Totaly Quality Management
UDF	User Defined Feature
UGS	Unigraphics Solutions GmbH
VB	Visual Basic
VDA	Verband der Deutschen Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VAD	Virtual Aided Design
VR	Virtual Reality

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name	Marc Bossmann
Geburtsdatum	02. Januar 1977
Geburtsort	Völklingen
Familienstand	ledig

Schulische Ausbildung:

08/83 - 07/87	Grundschule Haydnstrasse Völklingen
08/87 - 06/97	Gesamtschule Wadgassen „Allgemeine Hochschulreife“

Studium:

10/98 - 03/04	Studium der Produktionstechnik an der Universität des Saarlandes, Abschluss zum Diplom-Ingenieur am 12. März 2004
10/00 - heute	Studium der Betriebswirtschaftslehre an der Universität des Saarlandes

Berufstätigkeit:

10/99 - 06/03	Wissenschaftliche Hilfskraft am Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften und Präzisionsformgebung (LWP) der Universität des Saarlandes, Saabrücken
04/04 - 03/07	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM der Universität des Saarlandes, Saabrücken

Universität des Saarlandes

Schriftenreihe Produktionstechnik
Herausgeber: H. Bley, und C. Weber

ISSN 0945-6244

Verzeichnis der bisher erschienenen Bände (Stand: Juni 2007)

- Band 1** Schulte, Michael: *Grundlagen der automatischen funktionsorientierten Klassifizierung technischer Gegenstände im Rahmen intelligenter Konstruktionsunterstützungssysteme (CAD-Systeme)*.
ISBN 3-930429-30-6 (1993)
- Band 2** Schulte, Michael; Stark, Rainer: *Definition und Anwendung höherwertiger Konstruktionselemente (Design Features) am Beispiel von Wellenkonstruktionen*.
ISBN 3-930429-31-4 (1993)
- Band 3** Mischo, Armin: *Modellbasierte Akquisition und Implementierung des technologischen Wissens für die NC-Detailplanung*.
ISBN 3-930429-32-2 (1993)
- Band 4** Rech, Karsten: *Regelungsmodell zur Konzipierung der Informationsverarbeitung in der Produktionslogistik*.
ISBN 3-930429-33-0 (1994)
- Band 5** Stark, Rainer: *Entwicklung eines mathematischen Toleranzmodells zur Integration in (3D-) CAD-Systeme*.
ISBN 3-930429-34-9 (1994)
- Band 6** Dietz, Stefan: *Wissen zur Auswahl von Montagemitteln, seine Aufbereitung und Verarbeitung in CA-Systemen*.
ISBN 3-930429-35-7 (1994)
- Band 7** Muth, Michael: *Repräsentation von Konstruktionswissen unter Verwendung des objektorientierten Paradigmas*.
ISBN 3-930429-36-5 (1994)
- Band 8** Stadelmeyer, Volker: *Entscheidungsunterstützung zur technischen Planung im Fertigungsbereich*.
ISBN 3-930429-37-3 (1994)
- Band 9** Jostock, Jürgen: *Aufbau eines hierarchisch organisierten, wissensunterstützten Fertigungsregelungssystems*.
ISBN 3-930429-38-1 (1994)
- Band 10** Müller, Andreas: *Leitlinie zur Problemdefinition bei der Entwicklung von komplexen Montagesystemen*.
ISBN 3-930429-39-X (1994)

- Band 11** Labisch, Susanna: *Untersuchung des Kaltpressens pulverförmiger Stoffe mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung der Trockenpressung von Sekundärkornmassen.*
ISBN 3-930429-40-3 (1995)
- Band 12** Schmidt, Jürgen: *Untersuchung zur Reinheit spanend bearbeiteter Oberflächen unter besonderer Berücksichtigung des erzeugenden Prozesses.*
ISBN 3-930429-41-1 (1996)
- Band 13** Cuber, Michael: *Entwicklung einer Strategie zur qualitätsgerechten Modellierung des Entwicklungs-/Konstruktionsprozesses.*
ISBN 3-930429-42-X (1996)
- Band 14** Avgoustinov, Nicolay: *Minimizing the Labour for Exchange of Product Definition Data Among N CAx-Systems.*
ISBN 3-930429-43-8 (1997)
- Band 15** Bär, Thomas: *Einsatz der Feature-Technologie für die Integration von Berechnungen in die frühen Phasen des Konstruktionsprozesses.*
ISBN 3-930429-44-6 (1998)
- Band 16** Seel, Uwe: *Robotergestützte Zellenkalibrierung als Basis einer Feature-basierten Montageplanung.*
ISBN 3-930429-45-4 (1999)
- Band 17** Britten, Werner: *CAD-basierte Übersetzung geometrischer Toleranzen in vektorielle Darstellungen.*
ISBN 3-930429-46-2 (1999)
- Band 18** Jung, Dieter: *Praxis- und Prozessnahes Optimierungsmodell (PPO-Modell) zur systematischen, kontinuierlichen Verbesserung komplexer industrieller Prozesse.*
ISBN 3-930429-47-0 (2000)
- Band 19** Muth, Michael: *CAD-M(COMPUTER AIDED DESIGN using MULTIMEDIA)-Repräsentation und Nutzung von Konstruktionswissen in verteilten Entwicklungsumgebungen.*
ISBN 3-903429-48-9 (2000)
- Band 20** Wuttke, Claas Christian: *Mehrfachnutzung von Simulationsmodellen in der Produktionslogistik.*
ISBN 3-930429-49-7 (2000)
- Band 21** Oltermann, Ralf: *Systematik zur Abschätzung von Fertigungstoleranzen auf Grundlage einer Auswertung der laufenden Fertigung.*
ISBN 3-93042-50-0 (2000)
- Band 22** Werner, Horst: *Integration von CAx-Funktionalitäten in einem neuartigen Konstruktionssystem.*
ISBN 3-930429-51-9 (2001)
- Band 23** Behrning, Stefan: *Messungen von Belegungen durch Fertigungshilfsstoffe auf metallenen Werkstücken mittels mIR-Fasersonde.*
ISBN 3-930429-52-7 (2001)

- Band 24** Thome, Oliver: *Durchgängige Erfassung und Verarbeitung von Toleranzinformationen.*
ISBN 3-930429-53-5 (2001)
- Band 25** Junk, Stefan: *Inkrementelle Blechumformung mit CNC-Werkzeugmaschinen: Verfahrensgrenzen und Umformstrategien.*
ISBN 3-930429-54-3 (2003)
- Band 26** Braun, Peter: *Entwicklung einer Methodik zur Untersuchung des Einflusses von Kühlschmierstoffen auf das Härteverhalten von Einsatzstählen am Beispiel des Kühlschmierstoffs ARAL Sarol 470 EP und der Einsatzstähle C15, 16MnCr5, 9SMnPb28.*
ISBN 3-930429-55-1 (2003)
- Band 27** Rattay, Bernd: *Untersuchung der Einflußgrößen auf die Formfüllung und die Werkzeugbelastungen beim Prägen von Mikrokanalstrukturen in Metallische Bleche.*
ISBN 3-930429-56-X (2003)
- Band 28** Franke, Christina: *Feature-basierte Prozesskettenplanung in der Montage als Basis für die Integration von Simulationswerkzeugen in der Digitalen Fabrik.*
ISBN 3-930429-57-8 (2003)
- Band 29** 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems
ISBN 3-930429-58-6 (2003)
- Band 30** Korne, Thomas: *Fertigungsorientierte Analyse und Optimierung von Gruppenarbeit in der Automobil-Endmontage unter besonderer Berücksichtigung von Informationstechnologie und Digitaler Fabrik.*
ISBN 3-930429-59-4 (2004)
- Band 31** Fischer, Nikolaus: *Messungen geringster organischer Belegungen auf diffus reflektierenden Oberflächen mit einem mIR-faseroptischen Prüfkopf.*
ISBN: 3-930429-60-8 (2005)
- Band 32** Bernardi, Markus: *Gestaltung eines mechatronikorientierten Entwicklungsprozesses für mobile Arbeitsmaschinen und des dazugehörigen Entwicklungsumfeldes.*
ISBN 3-930429-61-6 (2005)
- Band 33** Ryu, Shi-Bok: *Development of a Microklystrode Vacuum Tube: A Focus on the Improvement of Modeling and Manufacturing Processes.*
ISBN 3-930429-62-4 (2005)
- Band 34** Vielhaber, Michael: *Zusammenbauorientiertes Konstruieren im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie am besonderen Beispiel des Karosserie-rohbaus.*
ISBN 3-930429-63-2 (2005)
- Band 35** Steinbach, Michael: *Systematische Gestaltung von Product-Service Systems.*
ISBN 3-930429-64-0 (2005)
- Band 36** Blumenau, Jean-Claude: *Lean Planing unter besonderer Berücksichtigung der Skalierung wandlungsfähiger Produktionssysteme.*
ISBN 3-930429-65-9 (2006)

Band 37 Zenner, Christian: *Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung*.
ISBN 3-930429-66-7 (2006)

Band 38 Bossmann, Marc: *Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung*.
ISBN 3-930429-67-7 (2007)