

Lehrstuhl für  
Montagesystemtechnik und Betriebswissenschaften  
der Technischen Universität München

## **Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen**

**Ralf Cuiper**

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:            Univ.-Prof. Dr.-Ing. E. Igenbergs

Prüfer der Dissertation:

1.        Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2.        Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Die Dissertation wurde am 23. 06. 2000 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 27. 07. 2000 angenommen.



**Forschungsberichte**

**iwb**

***Band 143***

*Ralf Cuiper*

***Durchgängige rechnergestützte  
Planung und Steuerung  
von automatisierten  
Montagevorgängen***

---

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

---

*Herbert Utz Verlag*



# **Forschungsberichte iwb**

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

**herausgegeben von**

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

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

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

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2000

**ISBN 3-89675-783-0**

Printed in Germany

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

## Geleitwort des Herausgebers

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

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

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

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

*Gunther Reinhart*



## Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen des Sonderforschungsbereichs (SFB) 336 "Montageautomatisierung durch Integration von Konstruktion und Planung" der DFG während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, dem Leiter dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, dem Leiter des Lehrstuhls für Fabrikautomation und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, möchte ich mich für die Übernahme Amtes als 2. Prüfer herzlich bedanken.

Herzlich danken möchte ich ebenso Herrn Prof. Dr.-Ing. Eduard Igenbergs, dem Leiter des Fachgebiets Raumfahrttechnik der Technischen Universität München, für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, die mich bei meiner Arbeit am Institut unterstützt haben, recht herzlich. Insbesondere gilt mein Dank Dr. Christoph Feldmann, Ulrich Roßgoderer, Hans Meier und Dr. Rolf Diesch für die kritischen Anmerkungen und wertvollen Hinweise beim Erstellen der vorliegenden Arbeit.

Ferner möchte ich mich bei meinen Diplomanden, Semestranden und studentischen Hilfskräften Florian Auer, Florian Cuiper, Heiko Göing, Rafael Grygierek, Jörg Hohgardt, Markus Karjetta, Yves Happi Kemayou, Monika Klug, Rolf Laakmann, Christian Lachner, Christian Rossmüller, Wolfgang Rudorfer, Roland Schleippmann, Rainer Schmidt, Rudolf Stingl, Alexandra Stöckler, Birgit Stuber, Oliver Tischner, Robert Vetter und Franz Ziegler für ihre Unterstützung bei diversen Aufgaben am Institut bedanken.

Herrn Ralf Mildenberger von der Siemens AG danke ich für die kooperative Zusammenarbeit beim Piloteinsatz von Komponenten der STEP7-Software.

Bei meiner Frau Angelika bedanke ich mich herzlich für das entgegengebrachte Verständnis während der Anfertigung der Arbeit und die Korrekturhinweise.

Abschließend geht mein herzlicher Dank an meine Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht haben.

München, im August 2000

*Ralf Cuiper*



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1 Rechnerunterstützung in der Produktionsplanung .....	1
1.2 Bedeutung der Montage .....	2
1.2.1 <i>Aktuelle Situation</i> .....	2
1.2.2 <i>Zukunftsperspektive</i> .....	3
1.3 Fazit und globale Intention der Arbeit .....	3
1.4 Aufbau der Arbeit .....	4
<b>2 AUSGANGSFRAGESTELLUNG UND ZIELSETZUNG .....</b>	<b>5</b>
2.1 Begriffsklärung .....	5
2.1.1 <i>Die Begriffe ‚Planung‘ und ‚Steuerung‘</i> .....	5
2.1.2 <i>Weitere Begriffe</i> .....	7
2.2 Betrachtungsbereich der Arbeit .....	8
2.3 Problemstellung .....	9
2.4 Zielsetzung .....	11
2.5 Forderungen .....	12
2.5.1 <i>Forderung 1: Die Prozessplanung steht an erster Stelle der Betrachtung vor Layoutplanung / Produktgestaltung</i> .....	12
2.5.2 <i>Forderung 2: Wechselseitige Berücksichtigung von Anlagen- und Produkteinflüssen</i> .....	13
2.5.3 <i>Forderung 3: Durchgängigkeit von der Idee bis zur Realisierung</i> ..	13
<b>3 STAND DER TECHNIK UND DER FORSCHUNG .....</b>	<b>14</b>
3.1 Informationstechnische Grundlagen .....	14
3.1.1 <i>Datenmodellierung</i> .....	14
3.1.1.1 <i>Grundlagen</i> .....	14
3.1.1.2 <i>Objektorientierung</i> .....	16
3.1.1.3 <i>Produktmodellierung</i> .....	16
3.1.1.4 <i>Modellierungsmethoden für Prozesse</i> .....	17
3.1.2 <i>Datentechnische Kommunikation zwischen Computerprogrammen</i> .....	18
3.1.2.1 <i>ISO-OSI-Modell</i> .....	19
3.1.2.2 <i>TCP/IP - Ethernet</i> .....	19
3.1.2.3 <i>CORBA</i> .....	21
3.1.3 <i>Resümee</i> .....	21
3.2 Steuerungstechnische Grundlagen .....	21
3.2.1 <i>Steuerungsarten</i> .....	21

3.2.2 Steuerungsstrukturen.....	22
3.2.2.1 Hierarchische Einteilung.....	22
3.2.2.2 Aufgaben der Zellen- und Leitebene .....	23
3.2.3 (Programmier-)sprachen / semantisch-syntaktische Kommunikationskonzepte.....	24
3.2.3.1 Manufacturing Message Specification.....	24
3.2.3.2 Roboterprogrammierung .....	26
3.2.3.3 SPS-Programmierung nach IEC 1131-3.....	27
3.2.4 Kommunikation für Steuerungskomponenten .....	28
3.2.4.1 Manufacturing Automation Protocol .....	28
3.2.5 Resümee .....	29
3.3 Entwicklungs- und Planungsvorgehensweisen .....	30
3.3.1 Grundlagen .....	30
3.3.2 Allgemeine Fabrikplanung .....	30
3.3.3 REFA-Standardvorgehen.....	31
3.3.4 VDI-Richtlinie 2221 .....	31
3.3.5 Ansätze zur Arbeitsplanung.....	32
3.4 Montageplanung .....	34
3.4.1 Kommerzielle Ansätze .....	34
3.4.1.1 Werkzeuge zur Planung manueller Arbeitssysteme .....	34
3.4.1.2 3D-Simulationswerkzeuge.....	35
3.4.2 Forschungsansätze.....	35
3.4.2.1 Allgemeine Montageplanungsmethodiken.....	35
3.4.2.2 Rechnerbasierte Montageplanung .....	37
3.4.2.3 Planung manueller Montageanlagen.....	40
3.4.2.4 Montageplanung bei Simultaneous Engineering .....	40
3.4.2.5 Montageplanung und Scheduling .....	45
3.4.2.6 Virtual Reality / 3D-Simulationssysteme.....	47
3.5 Prozessplanung .....	47
3.5.1 Kommerzielle Ansätze der Montageprozessplanung.....	47
3.5.2 Forschungsansätze.....	48
3.5.2.1 Allgemeine Ansätze zur Ermittlung der Montagereihenfolge .....	48
3.5.2.2 Rechnerbasierte Prozessplanung .....	49
3.5.2.3 Integrierte Produkt- und Prozessplanung .....	51
3.6 Steuerungsentwicklung .....	53
3.6.1 Kommerzielle Systeme .....	53

3.6.1.1 SPS Programmierung.....	53
3.6.1.2 Roboter-Programmierung.....	54
3.6.1.3 3D-Simulation für die Roboter-Programmierung .....	54
3.6.2 <i>Forschungsansätze</i> .....	54
3.6.2.1 Steuern von simulierten Maschinen und Prozessen.....	54
3.6.2.2 Modellbasierte Steuerungsentwicklung .....	55
3.6.2.3 Steuerungsplanung mit Virtual Reality.....	57
3.6.2.4 Roboterprogrammierung .....	58
3.7 Zusammenfassung der Ansätze.....	59
<b>4 KONZEPT FÜR EINE METHODISCHE UND TECHNISCHE UNTERSTÜTZUNG.....</b>	<b>61</b>
4.1 Grundlagen .....	61
4.1.1 <i>Teilnehmer am Montagevorgang</i> .....	61
4.1.2 <i>Montagevorgangsbeschreibung</i> .....	62
4.1.2.1 Struktureller Kern .....	63
4.1.2.2 Unterschiedliche Teiltätigkeiten .....	63
4.1.2.3 Synchronisation der Einzeltätigkeiten .....	67
4.1.2.4 Hierarchisierung der Vorgangsbeschreibung .....	68
4.1.2.5 Einsatz für die Steuerung .....	71
4.1.3 <i>Treiber des Planungsablaufs</i> .....	72
4.1.3.1 Unterschiedliche Prämissen .....	72
4.1.3.2 Vereinfachung des Treiber-Modells.....	74
4.1.3.3 Kennzeichen der produktgetriebenen Planung.....	75
4.1.3.4 Kennzeichen der anlagengetriebenen Planung.....	76
4.1.4 <i>Steuerungskonzept</i> .....	77
4.1.5 <i>Kommunikationssprache in der Steuerungshierarchie</i> .....	78
4.1.6 <i>Zusammenspiel der Vorgangsbeschreibung und der Steuerungshierarchie</i> .....	79
4.1.7 <i>Symbole für die Steuerungsbefehle</i> .....	81
4.1.8 <i>Resümee der Konzeptgrundlagen</i> .....	82
4.2 Vorgehen zur Gestaltung des Montagevorgangs .....	83
4.2.1 <i>Gesamtübersicht</i> .....	83
4.2.2 <i>Ablauf der produktgetriebenen Planung</i> .....	85
4.2.2.1 Stufe 1 P: Generelle Montagereihenfolge in Form der Produktstruktur .....	85
4.2.2.2 Stufe 2 P – Planen der Teiltätigkeiten.....	86

4.2.2.3	Stufe 3 P: Synchronisation .....	87
4.2.2.4	Stufe 4 P: Montageanlauf .....	87
4.2.2.5	Gesamtdarstellung der produktgetriebenen Planung .....	88
4.2.3	<i>Ablauf der anlagengetriebenen Planung</i> .....	89
4.2.3.1	Stufe 1 A: Generelle Montagereihenfolge in Form des Montageablaufs in der Anlage .....	89
4.2.3.2	Stufe 2 A: Planen der Teiltorgänge .....	89
4.2.3.3	Stufe 3 A: Synchronisation .....	90
4.2.3.4	Stufe 4 A: Montageanlauf .....	90
4.2.3.5	Gesamtdarstellung der anlagengetriebenen Planung .....	91
4.2.4	<i>Resümee der Vorgehensweisen</i> .....	92
4.3	Datenmodell .....	93
4.3.1	<i>Das Montageplanungsmodell als Teil eines integrierten Produkt- und Prozessmodells</i> .....	93
4.3.2	<i>Modell der Steuerung</i> .....	94
4.4	Integration in übergeordnete Leitsteuerung .....	96
4.5	Zusammenfassung des Konzepts .....	97
<b>5</b>	<b>UMSETZUNG IN EINEM RECHNERWERKZEUG</b> .....	<b>98</b>
5.1	Übersicht des Planungswerkzeugs .....	98
5.1.1	<i>Vorhandenes Basissystem</i> .....	98
5.1.2	<i>Erweiterungen</i> .....	98
5.2	Planungs- und Analyseeditoren für den Steuerungsablauf .....	99
5.2.1	<i>Planung der Ablaufsteuerung</i> .....	99
5.2.2	<i>Planung der Bewegungsabläufe</i> .....	102
5.2.3	<i>Temporale und monetäre Bewertung</i> .....	102
5.3	Schnittstelle zu Komponentensteuerungen .....	103
5.3.1	<i>Kommunikation</i> .....	103
5.3.1.1	<i>Basismechanismus</i> .....	103
5.3.1.2	<i>Einsatz von MAP/MMS</i> .....	104
5.3.1.3	<i>Alternative: MMS-Syntax mittels CORBA übertragen</i> .....	104
5.3.2	<i>Funktionalität der CosMonAut MMS-Schnittstelle</i> .....	105
5.4	VMDs für die Komponentensteuerungen .....	105
5.4.1	<i>Innerer Aufbau der VMD</i> .....	105
5.4.1.1	<i>VMDs für die 3D-Simulation</i> .....	107
5.4.1.2	<i>VMD für einen Roboter Stäubli RX 90/130</i> .....	108
5.4.1.3	<i>VMD für eine SPS Siemens S7</i> .....	109

5.4.2 Funktionsumfang der VMDs .....	110
5.5 Schnittstelle des Planungssystems zu PPS .....	111
5.6 Zusammenfassung des umgesetzten Planungssystems .....	113
<b>6 ANWENDUNGSBEISPIELE .....</b>	<b>114</b>
6.1 Planung der automatischen Montage eines elektrischen Dosenöffners.....	114
6.1.1 Ausgangssituation.....	114
6.1.2 Stufe 1 A - Bestimmung der Generellen Montagereihenfolge.....	115
6.1.3 Stufe 2 A: Planung der Teiltätigkeiten .....	116
6.1.4 Stufe 3 A: Synchronisation.....	120
6.1.5 Stufe 4 A: Montageanlauf .....	121
6.2 Planung einer Bohrmaschinengebremontage .....	121
6.2.1 Planungsvoraussetzungen.....	121
6.2.1.1 Produktkomponenten .....	122
6.2.1.2 Einzusetzende Komponenten der Anlage .....	122
6.2.2 Stufe 1 P: Produktkomponenten und Struktur des Ablaufs .....	123
6.2.3 Stufe 2: Planung der Teiltätigkeiten.....	124
6.2.4 Stufe 3: Synchronisation der Steuerung der Anlage .....	125
6.2.5 Stufe 4: Montageanlauf.....	127
6.2.6 Datenaustausch mit der Auftragssteuerungsebene .....	128
<b>7 BEWERTUNG DES ANSATZES .....</b>	<b>130</b>
7.1 Vorgehensweise.....	130
7.2 Datenmodellierung .....	130
7.3 Kommunikation der Steuerung .....	130
7.4 Erfüllung der aufgestellten Forderungen .....	131
7.4.1 Forderung 1: Die Prozessplanung steht im Vordergrund der Betrachtung .....	131
7.4.2 Forderung 2: Wechselseitige Berücksichtigung von Anlagen- und Produkteinflüssen .....	131
7.4.3 Forderung 3: Durchgängigkeit von der Idee bis zur Realisierung	131
7.5 Wirtschaftliche Bewertung .....	132
<b>8 ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>134</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>136</b>
<b>ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>156</b>
<b>STICHWORTVERZEICHNIS .....</b>	<b>160</b>



---

# 1 Einleitung

## 1.1 Rechnerunterstützung in der Produktionsplanung

Die Grundidee der rechnerunterstützten Produktgestaltung und Produktionsplanung rückt in den letzten Jahren unter den verschiedensten Begriffen wie etwa **Virtuelles<sup>1</sup> Produkt**, **Virtuelle Produktentwicklung**, **Virtual Engineering**, **Virtuelle Produktion**, **Digital Manufacturing** oder **Digitale Fabrik** wieder verstärkt in das Licht der Betrachtung in der Forschung und Industrie.

SPUR & KRAUSE (1997, S. 3) beschreiben „das **virtuelle Produkt**, d.h. die Simulation aller Phasen des Produktes für den rechnerunterstützten Produktentwicklungsprozess, als strategisches Ziel.“ Nach SPUR (1999) ist „die Entwicklung eines virtuellen Produkts [...] auf die Entwicklung eines virtuellen Produktmodells zurückzuführen, das in digitaler Form in einem Rechnersystem manipulierbar gespeichert ist. Der gesamte Ablauf einer Produktentstehung ließe sich somit in eine virtuelle Phase und eine reale Phase unterteilen (S. 370)“.

EVERSHEIM & SCHENKE (1999, S. 77) sehen „die Erfolgsfaktoren der künftigen Produktentwicklung [...] in der frühzeitigen Überprüfung der Entwicklungsergebnisse anhand virtueller Produkte, die eine ganzheitliche Produkt- und Prozesssicht ermöglichen. Systemtechnisch existieren bereits geeignete Lösungen, die die einzelnen Prozesse der Produktentwicklung wirkungsvoll unterstützen. Diese Inselflösungen sind zum durchgängigen Gesamtansatz auszubauen“. Den übergeordneten Begriff nennen sie **Virtual Engineering**, dessen Bestandteile „Abläufe, DV-Systeme (Management) und DV-Systeme (Modellierung), also Simultaneous Engineering + Digital Mock-Up + Telekooperation + Electronic Data Management System (EVERSHEIM & SCHENKE, S. 76)“ sind. Nach MILBERG U. A. (1999, S. 144) umfasst Virtual Engineering „die frühzeitige, kontinuierliche, vernetzte und integrierte Unterstützung des Entwicklungsprozesses hinsichtlich der Abstimmung, Bewertung und Konkretisierung der Entwicklungsergebnisse aller Entwicklungspartner mit Hilfe eines „digitalen Prototypen“.“

Die **Virtuelle Produktion** ist nach REINHART U. A. (1999, S. 26) „die durchgängige Planung, Validierung und Steuerung von Produktionsprozessen und -anlagen mit Hilfe digitaler Modelle. [...] Horizontal reicht die Virtuelle Produktion auf der Fabrik Ebene von der Fertigung der Einzelteile bis zur Montage des Gesamtprodukts. Vertikal müssen die einzelnen Teilprozesse von der Fabrik-Ebene, der Anlagen- und Zellen- über die Maschinenebene bis zum technologischen Prozess in der erforderlichen Tiefe betrachtet und simulativ abgesichert werden.“

---

<sup>1</sup> SPUR (1999) definiert **Virtualität** als „Zustand einer Möglichkeit von Eigenschaften, die unter gewissen Umständen in die Wirklichkeit treten können. [...] Ein virtuelles Objekt ist zwar nur in der Möglichkeit vorhanden, erscheint also nur scheinbar, verfügt aber über Eigenschaften, die der Wirklichkeit weitgehend entsprechen. Es ist trotz der Scheinbarkeit zur Wirkung befähigt (S. 370)“.

PFEIFF (1998) gibt als Grundkonzept der **Digitalen Fabrik** die Verknüpfung von Produktstruktur samt den entsprechenden Geometriedaten mit einer digitalen Beschreibung der Fabrik über die Prozessstruktur an. Die Prozess-Simulation ist dann ein wesentlicher Baustein für die moderne Planung.

Zusammengefasst geht es also bei den aktuellen Arbeiten um den Aufbau umfassender rechnergestützter Engineering-Systeme, die alle Tätigkeitsfelder des Konstrukteurs und Produktionsingenieurs unterstützen sollen (z.B. BENDER U. A. 1997, WECK & DAMMER 1997, RIX & SCHROEDER 2000). Eine zentrale Rolle spielen dabei leistungsfähige Simulationswerkzeuge, die mittels **Virtual Reality** - Ein-/ Ausgabekomponenten bedient werden (z.B. ELSHENNAWY U. A. 1993, BULLINGER & HEGER 1997, DREWS & WEYRICH 1997, GAUSEMEIER U. A. 1997, SPATH U. A. 1997, REINHART & ROßGODERER 1998) und so die Benutzerakzeptanz und Arbeitseffizienz zu steigern suchen.

Die vorliegende Arbeit nimmt den Gedanken der rechnerintegrierten Produktionsplanung als Leitbild auf und entwickelt vor dem Hintergrund der neuen Technologien einen durchgängigen Ansatz für die rechnergestützte Planung und Steuerung in der Montage.

## **1.2 Bedeutung der Montage**

### **1.2.1 Aktuelle Situation**

Die Montage als letzter Schritt der Produkterstellung vor der Auslieferung an den Kunden hat eine zentrale Bedeutung für die Unternehmen (REINHART 1998). Aber auch in volkswirtschaftlicher Betrachtung ist die Montage als Teil der Produktion gemäß der Formel „Industrie = Forschung + Entwicklung + Produktion + Vertrieb (MILBERG 1997, S. 20)“ und der Erkenntnis, dass „die Wertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes [...] die Basis für die Ausweitung aller anderen Wirtschaftssektoren (MILBERG 1997, S. 21)“ ist, nicht zu unterschätzen.

Nicht erst seit den wirtschaftlichen Krisen in zahlreichen Ländern Asiens und Südamerikas in den letzten Jahren erscheinen die einst für deutsche Firmen als profitabel geltenden Verlagerungen von Produktionsstandorten ins Ausland in einem anderen Licht. Es mehren sich die Meldungen von Unternehmen, die nach Mißerfolgen im Ausland wieder zurückkehren und in Deutschland mit hochautomatisierten Anlagen profitabel arbeiten, so beispielsweise die Firma Varta (ILIC & CUUPER 1998).

Untersuchungen des VDMA belegen den Trend zu steigender Automatisierung innerhalb der Montage. Der Umsatz der Branche „Robotik und Automation“ steigt (mit Ausnahme der Krisenjahre 1992 mit 1994) seit 1984 stetig an, von damals 2,4 Mrd DM auf 8,69 Mrd im Jahre 1998, bei zuletzt 36% Exportquote (VDMA 1999, S. 2). Unmittelbar kann man die steigende Automatisierung aus der Anzahl der in Deutschland eingesetzten Roboter ablesen. Danach hat sich die Anzahl in den 14 Jahren von 1984 bis 1998 auf zuletzt 85.565 Einheiten knapp verdreizehnfacht.

Die Montage spielt in Deutschland also nach wie vor eine bedeutende Rolle für die Volkswirtschaft. Trotz Bekenntnissen zur Humanzentrierung in der Produktion erfolgt in der Montage eine zunehmende Automatisierung der Wertschöpfung. Der technische (Ausschußrate) und wirtschaftliche Erfolg (Kosten) der Montage wird sehr stark von der Planung der Anlage und den dort stattfindenden Montagevorgängen beeinflusst.

### 1.2.2 Zukunftsperspektive

DREHER & CUHLS (1999) bestätigen in ihrer Zusammenfassung der Delphi-Studie die anhaltend hohe Bedeutung von Montage und Automatisierung in Deutschland und prognostizieren eine im Wesentlichen ungebrochene Fortsetzung der Entwicklung. Die wichtigsten vier Thesen der Studie in diesem Kontext sind:

- Am Standort Deutschland entstehen **Produktionsverbünde mit hoher Reaktionsfähigkeit**.
- Die **Produktionsverbünde haben außer Montagetätigkeiten alles ausgelagert** (erreicht bis 2007; jedoch 17,9% der Befragten stehen dem tatsächlichen Eintreten skeptisch gegenüber).
- Es werden **Betriebszeiten von 20 Stunden am Tag eingeführt** (erreicht bis 2006; 6,5% Skeptiker),
- die aber **aufgrund von geringerer Störanfälligkeit der Automatisierungslösungen von den Arbeitszeiten der Beschäftigten entkoppelt** werden können (erreicht bis 2008; 6,3% Skeptiker).

Während bei der Auslagerungsthese noch mehr als ein Sechstel der befragten Experten unsicher über das tatsächliche Eintreten waren, stimmten über 93% einer zu erwartenden längeren Betriebszeit der Anlagen und einer Verstärkung der Automatisierung zu. Die Studienersteller selbst nennen als Kritikpunkt, dass die Thesen sehr kurzfristige Realisierungszeiten haben. Es bleibt die Frage, ob die Ziele nicht zu ehrgeizig gesteckt sind.

Diese Zunahme der Automatisierung bedeutet auch ein steigendes Planungsaufkommen für automatisierte Anlagen, das von den Unternehmen zu bewältigen ist. Hierfür müssen geeignete Vorgehensweisen und Hilfsmittel bereit stehen.

## 1.3 Fazit und globale Intention der Arbeit

Fasst man nun die oben dargestellten Themenblöcke zusammen, ergibt sich folgendes Bild: Für die deutschen Unternehmen ist die Montage ein wichtiger Bereich mit Zukunftschancen, der einer weiterhin zunehmenden Automatisierungstendenz unterliegt. Um die automatisierten Anlagen schnell und effizient (um-)planen zu können, besteht trotz des derzeitigen Entwicklungsstandes weiterhin ein Bedarf an Rechnerwerkzeugen, mit denen bereits frühzeitig an

digitalen Modellen der reale Montageablauf geplant und optimiert werden kann.

Diese Arbeit zielt darauf ab, für die Planung automatisierter Montagevorgänge bis hin zum Betrieb der realen Anlage einen Lösungsansatz zu entwickeln, der die Vorgehensweise und eine rechnergestützte Werkzeugunterstützung beinhaltet.

## **1.4 Aufbau der Arbeit**

Das nachfolgende zweite Kapitel klärt zuerst die wichtigsten Begriffe, die im Rahmen dieser Arbeit Verwendung finden. Danach wird die Zielsetzung der Arbeit konkret formuliert. Drei Forderungen werden abschließend aus der Zielsetzung abgeleitet, die es für die Zielerreichung zu erfüllen gilt.

Im dritten Kapitel werden in den Abschnitten 3.1 mit 3.3 elementare Basistechnologien der Informations- und Steuerungstechnik sowie allgemeine Planungsvorgehensweisen vorgestellt. Diese Grundlagen dienen zum Verständnis der Darstellung des aktuellen Standes in den Bereichen Montageplanung (Abschnitt 3.4), Prozessplanung (Abschnitt 3.5) und Steuerungsplanung (Abschnitt 3.6). Der letzte Abschnitt dieses Kapitels liefert eine zusammenfassende Übersicht des Standes der Technik.

Das Kapitel 4 beschreibt das neue Konzept. Im ersten Abschnitt werden die Grundlagen erarbeitet, bevor im Folgenden die neue Vorgehensweise und das Datenmodell für die rechnerische Unterstützung sowie die Integration in übergeordnete Planungsebenen vorgestellt werden. Abschließend erfolgt eine Kapitelzusammenfassung.

Das fünfte Kapitel beschreibt die rechnerische Umsetzung und geht dabei sowohl auf das Planungswerkzeug als auch auf die Kommunikationsmechanismen für die Steuerung von Anlagenkomponenten ein.

Die Anwendung der Vorgehensweise und der Einsatz des implementierten Rechnerwerkzeugs zeigt Kapitel 6 exemplarisch an zwei Fallbeispielen.

Eine Bewertung des hier vorgestellten Ansatzes erfolgt in Kapitel 7. Die abschließende Zusammenfassung der Arbeit findet sich in Kapitel 8.

---

## 2 Ausgangsfragestellung und Zielsetzung

Die Klärung der zentralen Begriffe der vorliegenden Arbeit erfolgt zu Beginn dieses Kapitels. Im Weiteren wird das Betrachtungsfeld abgesteckt - von Interesse ist die Planung von Montageanlagen und den darin stattfindenden Vorgängen – bevor die wesentlichen Probleme aufgezeigt werden. Diese gründen sich auf die gängige Praxis, die Montageplanung mit dem Modell der Anlage und teilweiser Simulation der Abläufe zu beenden. Der Transfer auf die reale Anlage ist somit nicht durchgängig. Abschließend wird die Zielsetzung der Arbeit als „die Planung und Steuerung einer Montageanlage innerhalb eines Ansatzes“ formuliert, welche durch Forderungen operationalisierbar heruntergebrochen wird.

Die in den Kapiteln 4 und 5 entwickelte und umgesetzte Idee für eine kontinuierliche Planung des Montagevorgangs mit anschließender Steuerung versteht sich als Lösung der hier formulierten Problemstellung.

### 2.1 Begriffsklärung

Die Definition der zentralen Begriffe<sup>2</sup> dieser Arbeit orientiert sich an den gängigen Standards, vorzugsweise aus dem Umfeld der Produktionstechnik.

#### 2.1.1 *Die Begriffe ‚Planung‘ und ‚Steuerung‘*

Der BROCKHAUS (1996) liefert für die beiden Begriffe folgende Definitionen:

„**Planung**, der geistige, auch organisatorisch und institutionell ausgeformte Vorgang, durch Abschätzungen, Entwürfe und Entscheidungen festzulegen, auf welchen Wegen, mit welchen Schritten, in welcher zeitl. und organisator. Abfolge, unter welchen Rahmenbedingungen und schließlich mit welchen Kosten und Folgen ein bestimmtes Ziel erreichbar erscheint. Anthropologisch gesehen ist P. der Versuch, die Zufälligkeit der Welt, die Vielfalt mögl. Alternativen und die Zukunftunsicherheit, auch das Nichtwissen über mögl. Nebenfolgen bzw. Rückkoppelungseffekte von Handlungen so zu reduzieren, dass Risikominimierung und zieladäquate Handlungsauswahl möglich werden. P. stellt einen Bestandteil und eine Funktion des menschl. Denkvermögens dar und ist so, was die Bestimmtheit und Verlässlichkeit von Annahmen und Aussagen angeht, beschränkt.“

„**Steuerung**, allg.: die Einstellung, Erhaltung oder Veränderung der Zustände eines Systems durch externe Festlegung einer oder mehrerer das Verhalten des Systems bestimmender Größen ohne Rückkopplung.“

---

<sup>2</sup> Begriffe, die von weniger zentraler Bedeutung für diese Arbeit sind, werden später auch über Fußnoten erläutert. Über das Stichwortverzeichnis sind diese schnell auffindbar.

## Ausgangsfragestellung und Zielsetzung

---

Die DIN 19226-1 definiert **Steuerung** als „Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen.“ Als wichtiges Kennzeichen gilt, dass „die durch Eingangsgrößen beeinflussten Ausgangsgrößen nicht fortlaufend und nicht wieder über dieselben Eingangsgrößen auf sich selbst wirken.“ Dabei wird ein **System** als „eine in einem betrachteten Zusammenhang gegebene Anordnung von Gebilden, die miteinander in Beziehung stehen“ angesehen. Die Anordnung „wird aufgrund bestimmter Vorgaben gegenüber ihrer Umgebung abgegrenzt“.

Eine weitere Definition von **Planung** gibt der VDI (1983) mit „Festlegen von Zielen, sowie Vorbereiten von Aufgaben und Festlegung des Ablaufes zur Erreichung der Ziele“. **Steuern** wird hier als „Veranlassen, Überwachen und Sichern der Aufgabendurchführung hinsichtlich Menge, Termin, Qualität und Kosten“ beschrieben.

**Planung** als Element der innerbetrieblichen Organisation wird von REFA (1974a, S. 5-12) für die Anwendungsbereiche Fertigung, Entwicklung, Beschaffung und Arbeitsvorbereitung definiert: Sie besteht „im systematischen Suchen und Festlegen von Zielen sowie im Vorbereiten von Aufgaben, deren Durchführung zum Erreichen der Ziele erforderlich ist“. Das Ziel ist dabei „der vorbestimmte Zweck von Aufgaben“, „Aufgaben sind Beschreibungen der notwendigen Maßnahmen zur Erreichung von Zielen“. Im Weiteren wird in Ziel- und Aufgabenplanung unterschieden, letztere teilt sich in Mittelplanung (Personal, Betriebsmittel und Material) und Ablaufplanung (Zusammenwirken der Mittel). „Das Ergebnis der Mittelplanung sind z.B. Personalbedarfspläne, Investitionspläne; das Ergebnis der Ablaufplanung sind Netzpläne, Arbeitspläne, Montagepläne usw.“

**Steuerung** wird in diesem Kontext definiert als „Veranlassen, Überwachen und Sichern der Aufgabendurchführung hinsichtlich Menge, Termin, Qualität und Kosten“ (s. Abbildung 1).

Oberbegriff	Planung		Steuerung		
Unterbegriff	Zielplanung	Aufgabenplanung	Veranlassung	Überwachung	Sicherung
Zeit	Zukunft			Gegenwart	Vergangenheit
Beispiele für andere Bezeichnungen		Maßnahmen- und Ablaufplanung, Mittelplanung	Disposition	Kontrolle	Prüfung
			Regelung		
← → Arbeitsvorbereitung					

Abbildung 1: Planung und Steuerung nach REFA (1974a, S. 13)

Dabei ist Veranlassen „ein terminorientierter Anstoß, ein Auslösen der Aufgabendurchführung“, Überwachen wird als „Feststellen der Aufgabenerfüllung bzw. der Abweichung der Ist- von den Soll-Daten“ beschrieben und Sichern als „Maßnahmen zum Vermeiden oder Verhindern der Abweichungen der Ist- von den Soll-Daten“ (REFA 1974a, S. 10-12). Es wird darauf hingewiesen, dass

## 2.1 Begriffsklärung

---

diese Begriffsbestimmung eigentlich dem ‚Regeln‘ in der DIN 19226 entspräche (REFA 1974a, S. 32).

In dieser Arbeit werden die Begriffe **Planung** und **Steuerung** hauptsächlich im Umfeld der Montageanlage eingesetzt, sodass in diesem Fall die Definition nach REFA aufgrund ihrer konkreteren Formulierung die geeignete ist. Die Montageplanung ist in ihren Kernbereichen der Mittelplanung (Betriebsmittelauswahl, Layoutgestaltung) und Ablaufplanung (Gestaltung des Montagevorgangs) zuzuordnen.

### 2.1.2 Weitere Begriffe

Nach BROCKHAUS (1996) ist **Montage** „[frz., zu monter, auch »hinaufbringen«, »aufwärts steigen«, eigtl. »auf einen Berg steigen«] allgemein das Zusammensetzen von Einzelteilen“.

Der VDI (1983) definiert im Umfeld der Produktionstechnik **Montage** als „Zusammenbau von Teilen und/oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebene in der Fertigung“.

Die zweite Erklärung ist im Prinzip eine konkretere Form der ersten. Der Begriff **Montage** wird auch in dieser Arbeit aufgrund des Bezugs zur produktionstechnischen Anlage so verstanden, dass sowohl Einzelteile als auch teilmontierte Gruppen mit weiteren zusammengebaut werden.

Die DIN 19226-1 beschreibt einen **Prozess** als „Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder auch Information umgeformt, transportiert oder auch gespeichert wird.“ BARTHELMEß sieht als „Ziel jedes **Montageprozesses** [...], aus einzelnen Körnern, Einzelteilen oder Baugruppen, aber auch formlosen Stoffen, z. B. Schmierstoff oder Klebstoff, technische Gebilde mit einer vorgegebenen Baustruktur zu erzeugen. (1987, S. 26)“.

Der in dieser Arbeit verwendete Begriff der **Montagevorgangsbeschreibung** umfasst die strukturierte Darstellung der zur Montage eines Endproduktes erforderlichen Teilschritte in ihrer Reihenfolge. Diese Teilschritte können dabei direkt mit dem Produkt oder dessen Bestandteilen durchgeführt werden, oder allein von der Montageeinrichtung durchgeführte, aber für den Gesamterfolg notwendige Schritte (Beispiel: Werkzeugwechsel) sein. Als synonymer Begriff für die Montagevorgangsbeschreibung wird hier auch **Montageprozess** benutzt.

Dem gegenüber steht der Begriff **Einzelprozess**. Dies ist in diesem Kontext die detaillierte Betrachtung der diversen Teilverfahren beim Montieren wie Schrauben, Kleben, Toxen etc., die meist mit einem einzelnen, spezialisierten Betriebsmittel stattfinden. Die Einzelprozesse werden in dieser Arbeit jedoch nur von außen betrachtet und bilden somit Elemente der übergeordneten Montagevorgangsbeschreibung bzw. des übergeordneten Montageprozesses.

Unter **Gestaltungsobjekt** ist hier das Zielobjekt einer aktuell durchgeführten Planung zu verstehen. Es wird im Rahmen der Planung einmal instanziert, danach durch die einzelnen Planungsschritte womöglich iterativ mehrfach defi-

niert und detailliert. Im Rahmen der integrierten Montageplanung werden insbesondere die Gestaltungsobjekte Produkt, Montagevorgangsbeschreibung und (Montage-)Anlage bearbeitet.

## 2.2 Betrachtungsbereich der Arbeit

Das übergeordnete Betrachtungsfeld bildet die industrielle Unternehmung. Das originäre „Ziel eines Produktionsbetriebes ist es, Geld zu verdienen (GOLDRATT & Cox 1987, S. 46)“. Dazu werden in der Regel Produkte entwickelt, die Einzelteile gefertigt und schließlich montiert.

Der Betrachtungsbereich der vorliegenden Arbeit umfasst das Zusammenspiel von Produkt, Montagevorgangsbeschreibung und Montageanlage schwerpunktmäßig während der Planung, aber auch in der Übergangsphase zur Inbetriebnahme und Nutzung der Montageanlage. In Abbildung 2 ist dieser Bereich grau unterlegt.

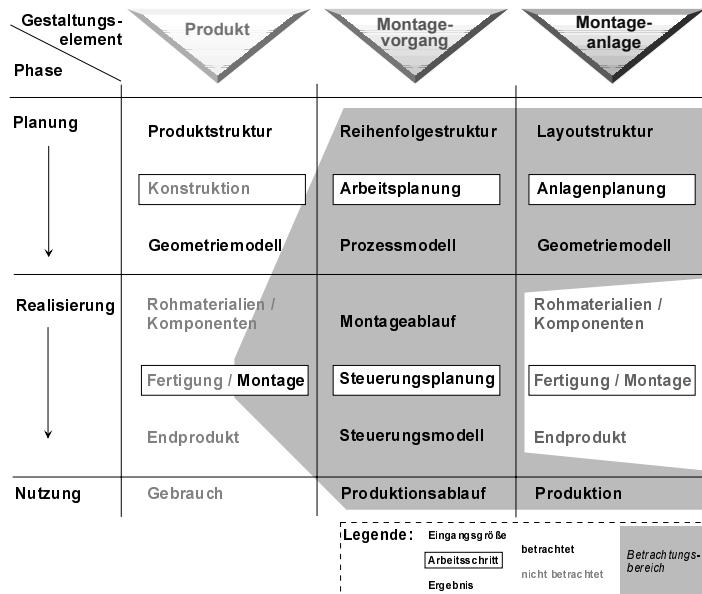


Abbildung 2: Betrachtungsbereich dieser Arbeit

Dabei wird in dieser Arbeit unter Konstruktion und Planung die Sammlung der notwendigen Arbeitsschritte zur Gestaltung eines Produktes, eines Montageablaufes bzw. einer Montageanlage verstanden, die von Mitarbeitern aus verschiedenen fachlichen Abteilungen erledigt werden können und müssen. Die Benennung und Unterscheidung bezieht sich also auf das Gestaltungsobjekt, nicht auf die aufbauorganisatorischen Fragestellungen in den Unternehmen, welche hier nicht berücksichtigt werden.

## 2.3 Problemstellung

Im typischen Ablauf einer Produktentwicklung herrscht meist immer noch eine Kluft zwischen den Bereichen Konstruktion und Planung auf der einen und Realisierung auf der anderen Seite. Der Gedanke des **Simultaneous Engineering** (SE) - bzw. als Weiterentwicklung auch **Concurrent** oder **Cooperative Engineering** (CE) genannt - wurde laut SWEENEY (1992) bereits im Jahre 1971 von W. J. Abernathy erstmals formuliert. Die Idee der parallelen Entwicklung über die Grenzen der Fachabteilungen hinweg wurde erst in den letzten zehn Jahren hauptsächlich bei der Integration der frühen Entwicklungsphasen von Mitarbeitern der Abteilungen Konstruktion, Fertigungsplanung und Montageplanung implementiert, wodurch sich insgesamt eine Verkürzung der Entwicklungszeiten erzielen ließ (z.B. RANKY 1994, BULLINGER & WARSCHAT 1995, EVERSHIM U. A. 1995, REINHART U. A. 1998). Weiterhin separat finden danach erst die Entwicklung der Steuerungsabläufe und Inbetriebnahme der Anlagenhardware statt.

Zudem ist die Betrachtungsweise in der Montageplanung selbst kaum ablauforientiert. Meistens wird in den beiden statischen Kategorien **Produkt** und **Anlage** bzw. Montagezelle gedacht. Das Ziel der Entwicklung ist dann vielfach in erster Linie die Erstellung digitaler Modelle des Produktes (CAD-Modell), seltener auch der Produktionseinrichtung (3D-Zellenlayout, 2D/3D-Modell für die Ablaufsimulation). Der Montagevorgangsbeschreibung selbst wird oft nur ein geringes Maß an Aufmerksamkeit geschenkt. Die Montage „findet dann eben statt“ und wird in der Planung lediglich über geschätzte Zeiten an den einzelnen Stationen berücksichtigt. Die Ausdetaillierung der Vorgangsbeschreibung erfolgt erst bei der Installation der Anlagenhardware und der Codierung des Steuerungsprogramms.

Der Einstieg für diese nachgelagerte Steuerungsentwicklung ist häufig der rudimentär beschriebene Ablauf innerhalb der Produktionsanlage, welcher dann im entsprechenden Entwicklungswerkzeug oftmals sogar neu modelliert werden muss, weil diese Systeme nicht auf die Daten der Planungswerkzeuge der vorangegangenen Entwicklungsstufen aufsetzen können. HEIMBERG & FREY (1997) bemängeln dieses Defizit an Rechnerunterstützung im Bereich der Produktionsplanung (s. Abbildung 3): Während in der Produktkonstruktion die Rechnerunterstützung insbesondere durch den Einsatz von CAD-Systemen und zugrundeliegenden Produktdaten-Management (PDM) -Systemen einen relativ hohen Grad an Automatisierung erreichen konnte, steht die Produktionsplanung offensichtlich erst am Beginn einer Automatisierungswelle.

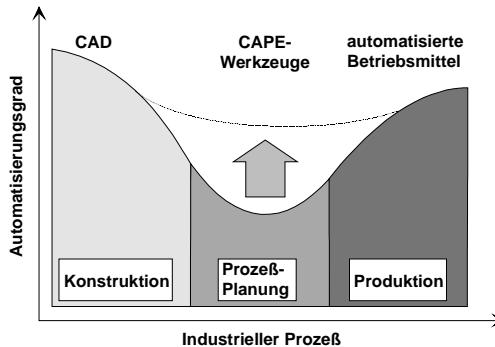


Abbildung 3: Bedarf an rechnergestützter Prozessplanung  
(HEIMBERG & FREY 1997)

Neben dieser fehlenden horizontalen Durchgängigkeit entlang des industriellen Prozesses gibt es zudem noch kein Rechnerwerkzeug, welches eine vertikale Durchgängigkeit über die Ebenen<sup>3</sup> der Produktionssteuerung (s. Abbildung 4) bietet. Somit kommt es zu Brüchen innerhalb des Bereichs der Produktionsplanung selbst, die zwischen den einzelnen vertikalen Hierarchiestufen auftreten.

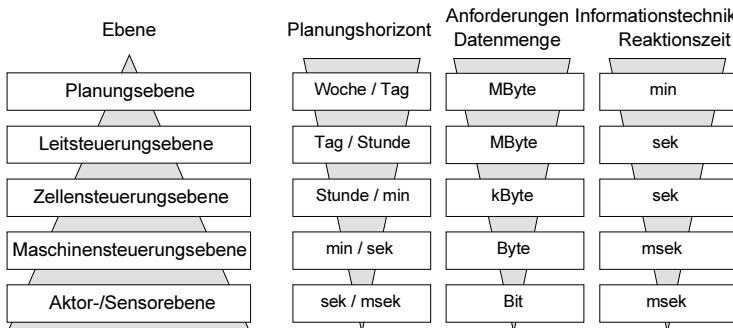


Abbildung 4: Die Ebenen der Produktionssteuerung  
(nach MILBERG 1992, BENDER 1996)

Die Ausgangssituation ist in Abbildung 5 zusammengefasst: Einerseits dominiert die Produktentwicklung die Planung der Montageanlage sowie des Montagevorgangs, andererseits ist die Montagevorgangsplanung selbst nicht durchgängig. Es treten methodisch und werkzeugtechnisch immer wieder Schnittstellen mit entsprechenden Verlusten auf.

<sup>3</sup> Dieses Ebenenmodell wird in nachfolgendem Kapitel 3.2.2.1 aufgegriffen und vertieft behandelt.

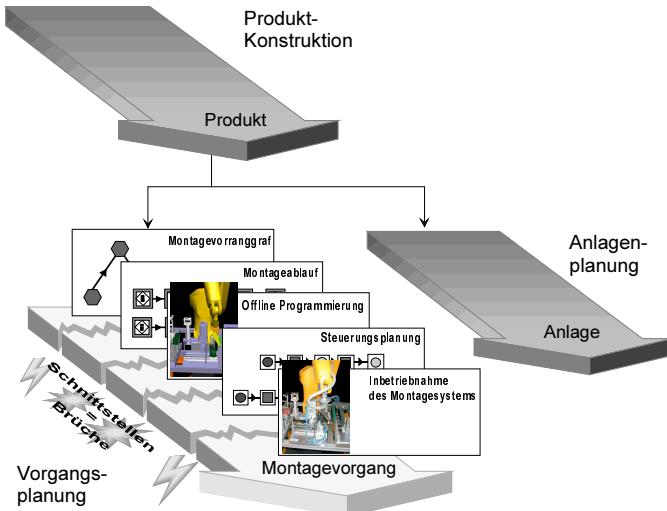


Abbildung 5: Ausgangssituation

## 2.4 Zielsetzung

Eine umfassende Idee zur Schließung der beschriebenen Lücke im Bereich der Produktionsplanung (s. Kapitel 2.3) skizzieren IWATA U. A. (1997). Sie fordern drei wesentliche Maßnahmen:

- Eine **Integration von Aktivitäten aus dem Produktlebenszyklus** über eine durchgängige Verwendung der Daten von Design bis Wartung.
- Eine **Integration von Ressourcen auf gleichem semantischen Level** aller Maschinen.
- Eine **Integration von realer und virtueller Welt** - hier sollen reale Produktionseinrichtungen um virtuelle ergänzt oder der Status der realen über die virtuellen Maschinen überwacht werden können.

Diese generelle Vision gibt die aktuelle Stoßrichtung vieler Forschungsgruppen für die nächsten Jahren wieder, sie harrt aber noch der Umsetzung (s. Kapitel 1.1).

Das Ziel dieser Arbeit ist, einen Weg für die Realisierung dieser Vision im Bereich der Montageplanung zu beschreiben. Der Fokus liegt dabei gemäß obiger Einteilung von IWATA U. A. (1997) auf der "Integration der Aktivitäten" sowie der "Integration von Ressourcen auf gleichem semantischen Level". Das bedeutet die durchgängige methodische und werkzeugtechnische Unterstützung des Vorgehens von der Planung bis hin zur Inbetriebnahme der Montageanlage. Insbesondere soll eine erneute Modellerstellung für die Anlagensteuerung vermieden werden. Durch sukzessives Aufbauen eines geeigneten Modells während der Planung soll ein kontinuierlicher Übergang in die Realität

ermöglicht werden. Hierdurch wird in gewissem Umfang auch die "Integration von realer und virtueller Welt" abgedeckt, wobei das eher ein Nebeneffekt der obigen Zielsetzung ist.

Als Fazit lässt sich festhalten: In dieser Arbeit soll ein ganzheitlicher Ansatz für die Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen entwickelt werden. Hierfür ist sowohl ein methodisches Vorgehen als auch ein Rechnerwerkzeug erforderlich.

## 2.5 Forderungen

Die oben formulierte abstrakte Zielsetzung ist in operationalisierbare Teilziele aufzuteilen, sodass abgeschlossene Handlungsfelder entstehen, in denen es Lösungsansätze aufzubauen gilt. Abschließend ist die Zielerfüllung des Ansatzes bezüglich dieser Forderungen zu beurteilen.

### 2.5.1 Forderung 1:

#### *Die Prozessplanung steht an erster Stelle der Be- trachtung vor Layoutplanung / Produktgestaltung*

Wie in der Problemstellung dargelegt (s. Kapitel 2.3), trifft man in der Entwicklung häufig auf eine funktionale Trennung zwischen Produktkonstruktion und Anlagenplanung. Jede Disziplin hat ihr eigenes Verständnis eines 'guten' Montageablaufs und betrachtet jeweils das Produkt bzw. die Anlage überwiegend isoliert. Für den Montagevorgang selbst gibt es keine konkrete Zuständigkeit, sodass ihm im Planungsablauf nur eine geringe Priorität beigemessen wird.

Im real ablaufenden Montageprozess aber stehen die Produktkomponenten und Anlagenkomponenten nicht nur in enger Wechselwirkung untereinander, sondern vielmehr gegeneinander. Gerade hier treten dann die Probleme auf, dass z.B. trotz aufwendiger Produkt- und Betriebsmittelkonstruktion das skizzierte Steuerungskonzept nicht umzusetzen ist oder im Extremfall Teile auf der Anlage nicht zu montieren sind. Die Ursache ist in der unzureichenden Planung des Ablaufs zu finden.

Daraus lässt sich die Forderung ableiten, dass der **Montagevorgangsbe-  
schreibung**, also der Verknüpfung von Produkt und Anlage, ein **höherer Stel-  
lenwert** beizumessen ist. Im hier verfolgten Ansatz steht die Prozessplanung im Vordergrund vor der Layoutplanung bzw. Produktgestaltung; für diese Bereiche kann auf bereits etablierte Methoden zurückgegriffen werden.

Diese Prozessbeschreibung wird nun im Laufe der Montageplanung als eigenständiges Gestaltungselement neben Produkt und Anlage kontinuierlich aufgebaut und in einem Modell abgelegt. Nur dann ist es möglich, von der Ermittlung der Reihenfolgebeziehung der Komponenten bis zur Anlagensteuerung eine geschlossene Entwicklungskette zu durchlaufen.

### 2.5.2 Forderung 2:

#### *Wechselseitige Berücksichtigung von Anlagen- und Produkteinflüssen*

Viele der bekannten Planungs- und Entwicklungsmethoden haben im Kern noch immer den traditionellen Kausalzusammenhang: Die Produktkonstruktion geht in Vorleistung, die übrigen Disziplinen sind Zuarbeiter. Selbst in Zeiten des Simultaneous Engineering ist die Produktdefinition stets ein Stück voraus und steckt das weitere Feld ab, auch wenn allgemeine Hinweise zur Montagegerechtigkeit etc. idealerweise Einfluss nehmen konnten. Gleichzeitig stöhnen die Verantwortlichen der Unternehmen allenthalben über die kürzeren Produktlebenszyklen auf dem Markt. Infolgedessen sind sie gezwungen, die Entwicklungszeit bei gleicher prinzipieller Vorgehensweise zu straffen.

Wenn aber die Zeiten für die Anlagenamortisation weiter anteilig gegenüber den Produktionszeiten einer Produktgeneration zunehmen, muss hier ein Umdenken erfolgen: Es sind Fälle vorstellbar, in denen lediglich bei Wiederverwenden bestehender Anlagen(-teile) bei der Herstellung der nachfolgenden Produktgeneration ein ausreichender Kapitalrückfluss erzielt wird, um die Investition zu finanzieren. Aber es ist auch denkbar, dass nur durch den Einsatz einer bahnbrechend billigen neuen Fertigungstechnologie ein konkurrenzfähiger Kostensatz für ein neues Produkt erreicht werden kann. Hier ist dann eben das Produkt an die Gegebenheiten in der Montage anzupassen.

Nach wie vor müssen die Produkte auch attraktiv für den Kunden gestaltet sein, woraus sich beispielsweise Oberflächenbehandlungen und die Fügetechnologie des Gehäuses ableiten lassen.

Die Berücksichtigung dieser Überlegungen führt zu der Forderung, dass im Entwicklungsablauf eine **wechselseitige Berücksichtigung von Einflüssen der Anlage wie des Produktes** stattfinden muss. Die gesamte Entwicklungs-vorgehensweise ist an diese neue Sichtweise anzupassen.

### 2.5.3 Forderung 3:

#### *Durchgängigkeit von der Idee bis zur Realisierung*

Derzeit bestehen methodische und datentechnische Brüche zwischen den einzelnen Planungsschritten, insbesondere aber besteht eine Kluft zwischen Planung und Inbetriebnahme von Montageanlagen. Durch diese Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Zuständigkeiten, Vorgehensweisen und eingesetzten Werkzeugen entstehen im Planungsablauf unnötig hohe Zeit- und Datenverluste. Die Verluste lassen sich bei geeigneter Unterstützung in Rationalisierungspotentiale überführen.

Hieraus leitet sich die Forderung nach einem **durchgängigen Ansatz** von der ersten **Gestaltungsidee** bis zur **Realisierung** der Anlage ab. Dabei muss die Durchgängigkeit bidirektional gegeben sein, damit die Teilergebnisse für logisch nachfolgende Schritte unmittelbar weiterverwendet werden können, und um in Planungsiterationen auf die bisherigen Ergebnisse zurückgreifen und diese direkt überarbeiten zu können.

### **3 Stand der Technik und der Forschung**

Zunächst werden in diesem Kapitel einige informations- und steuerungstechnische Basistechnologien vorgestellt (s. Kapitel 3.1 und 3.2), die teilweise bereits durch Normen standardisiert sind. Diese Vorstellungen werden jeweils durch ein kurzes Resümee im Sinne einer Zusammenfassung des Inhalts – ohne Bewertung – abgerundet. Im Weiteren werden allgemeine Beiträge zur Entwicklungs- und Planungsunterstützung als Grundlageninformation aufgeführt (s. Kapitel 3.3), soweit dies nicht bereits bei der fundamentalen Begriffsklärung und Definition im vorangegangenen Kapitel erfolgt ist.

Der eigentliche Hauptteil des Kapitels stellt die Bereiche Montageplanung, Prozessplanung und Steuerungsentwicklung genauer vor (s. Kapitel 3.4 - 3.6). In diesen drei Teilkapiteln erfolgt eine Unterscheidung zwischen etablierten Vorgehensweisen und kommerziell erhältlichen Systemen einerseits und Forschungsansätzen andererseits<sup>4</sup>. Hier findet zudem eine Beurteilung hinsichtlich der ‚Brauchbarkeit‘ der einzelnen Beiträge zur Erfüllung der verfolgten Zielsetzung statt. Es wird darauf verzichtet, für jeden vorgestellten Ansatz in der Einzelvorstellung eine Reflexion an den drei Forderungen zu präsentieren. Diese erfolgt in der abschließenden zusammenfassenden Darstellung der Ansätze (s. Kapitel 3.7) tabellarisch. Aus den Defiziten ergibt sich der Bedarf nach einem neuen Lösungsansatz.

#### **3.1 Informationstechnische Grundlagen**

Die in diesem Teilkapitel aufgeführten Grundlagen sind sowohl für das Verständnis der später vorgestellten Ansätze als auch des in dieser Arbeit entwickelten neuen Konzeptes notwendig. Dabei liegt die Intention hauptsächlich in der Begriffsklärung und Erläuterung der später angewandten Basistechnologien, weniger in der prinzipiellen Untersuchung der einzelnen Beiträge auf ihre Anwendbarkeit.

##### **3.1.1 Datenmodellierung**

Dieser Abschnitt gibt eine komprimierte Einführung in die Datenmodellierung und stellt die wichtigsten Ansätze im Bereich der Produkt- und Prozessmodellierung vor.

###### **3.1.1.1 Grundlagen**

Kennzeichnend für die Montageplanung ist die Weiterverarbeitung und Generierung sehr vieler Informationen. Um die Bearbeitung rechnertechnisch unterstützen zu können, ist eine sinnvolle Strukturierung der Daten notwendig. Hier finden Datenmodelle Anwendung, in denen alle auftretenden Informationen

---

<sup>4</sup> Hinweis: In dieser Arbeit werden grundsätzlich eventuelle eingetragene Warenzeichen wie etwa ‚CosMonAut‘ nicht explizit als solche gekennzeichnet.

### 3.1 Informationstechnische Grundlagen

---

abgelegt sind. Die einzelnen Entitäten<sup>5</sup> im Modell beschreiben mit ihren Attributen<sup>6</sup> die darzustellenden realen Gegenstände.

Der wesentliche Aspekt der Datenmodelle ist die Systematik, nach der sich ein konkretes Modell aus den Eingangsdaten aufbauen lässt. Dieser Bauplan wird als Schema bezeichnet, in dem die einzelnen Typen von Objekten<sup>7</sup> und ihre Attribute enthalten sind. Die so erstellten Modelle werden meist in einer Datenbank abgelegt und über ein Rechnerwerkzeug bearbeitet.

Ein Datenschema muss so konzipiert sein, dass es prinzipiell für alle Szenarien in einem vorgesehenen Anwendungsspektrum eingesetzt werden kann; eine generelle Allgemeingültigkeit ist einerseits nicht erzielbar und bietet andererseits aufgrund der zu erwartenden Komplexität des Schemas keine Vorteile in der Handhabung und Anwendung (vgl. MAIER 1997).

Basierend auf dem Schema kann dann über den sog. Vorgang der Instanzierung<sup>8</sup> ein konkretes Modell des Szenarios – bestehend aus einzelnen Objekten – aufgebaut werden (s. Abbildung 6).

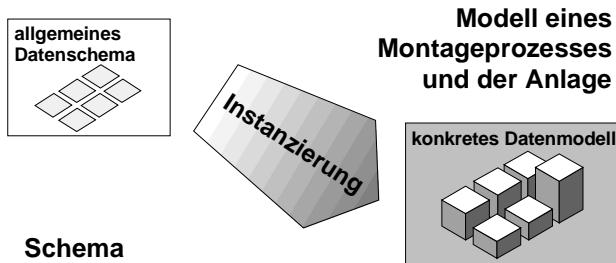


Abbildung 6: Zusammenhang von Schema und Modell

Das Thema Datenmodellierung behandeln zahlreiche Forschergruppen seit einigen Jahren mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Dabei werden sowohl Modelle für konkrete Anwendungsfälle erarbeitet, als auch abstrakte Vorgehens-

<sup>5</sup> Zu verstehen im Sinne eines abgeschlossenen Bestandteils des Modells, z.B. Roboter im Modell einer Montageanlage. In der Literatur wird **Entität** bisweilen auch synonym zu Instanz oder Objekt (siehe unten) verwendet.

<sup>6</sup> **Attribute** sind nach OESTEREICH (1998, S. 267) eine "benannte Eigenschaft eines Typs. Ein Attribut ist ein Datenelement, das in jedem Objekt einer Klasse gleichermaßen enthalten ist und von jedem Objekt mit einem unterschiedlichen Wert repräsentiert wird."

<sup>7</sup> Der Begriff **Objekt** ist nach OESTEREICH (1998, S. 274) "eine konkret vorhandene und agierende Einheit mit eigener Identität und definierten Grenzen des Zustand und Verhalten kapselt. Der Zustand wird repräsentiert durch die Attribute und Beziehungen, das Verhalten durch Operationen bzw. Methoden. [...] Die Werte der Attribute sind individuell für jedes Objekt." Den Begriff Instanz verwendet er synonym zu Objekt.

<sup>8</sup> Generierung eines Modellbestandteils (i.e. eines Objekts) aus dem allgemeinen Schema und Füllen der Attributliste mit den zutreffenden Werten. Rechnerintern wird bei der **Instanzierung** ein separater Speicherbereich in Anspruch genommen.

weisen und Notationen definiert. Einen Überblick über diese allgemeinen Vorgehensweisen der Informatik gibt z. B. BALZERT (1996).

### **3.1.1.2 Objektorientierung**

Seit Beginn der 90er Jahre findet der objektorientierte Ansatz in der Datenverarbeitung zunehmend Verbreitung. STEIN (1997) zählt allein 62 Analyse- und Designmethoden auf, die mehr oder weniger vollständig dem reinen objektorientierten Paradigma entsprechen. Weite Verbreitung erreichten die **Object Modeling Technique (OMT)** (RUMBAUGH U. A. 1993) und zuletzt die **Unified Modeling Language (UML)**. Diese definieren eine Notation zur Erstellung der Diagramme für das Schema (Klassendiagramm). Die OMT selbst definiert auch eine Vorgehensweise bei der Modellierung, welche sich mit der Notation der UML ebenfalls durchführen lässt. Die Beschreibung soll hier aber nicht weiter vertieft werden, für eine genaue Vorstellung der Elemente und Anwendung der UML sei auf entsprechende Literaturstellen verwiesen, z.B. BURKHART (1997) oder OESTEREICH (1998).

### **3.1.1.3 Produktmodellierung**

Bei der Beschreibung der geometrischen Gestalt von Produkten oder Betriebsmitteln hat sich im Konstruktionsablauf eine mehrstufige Vorgehensweise etabliert: Werden anfangs Konzeptskizzen und Hülleometrien zur groben Abschätzung eingesetzt, erfolgt später im Entwicklungsverlauf eine Detaillierung durch bemaßte Entwurfszeichnung und eine Ausarbeitung mit Toleranzen (vgl. VDI 2221, Kapitel 3.3.4). Die Repräsentation erfolgt in modernen Entwicklungen zunehmend in rechnergestützten Konstruktionswerkzeugen (CAD), sodass der Begriff „Zeichnung“ durch „Modell“ ersetzt wird. Das Modell ist zunächst die rechnerinterne Repräsentation der Geometrie, die sich durch das CAD-System erzeugen, verändern und anzeigen lässt. In diesem Zusammenhang wird auch der Begriff „Datenmodell“ zu „Produktmodell“ konvertiert. Im betrieblichen Umfeld hat sich durch die CIM<sup>9</sup>-Bewegung der Begriff des Produktmodells etabliert. Die Produktdaten werden unterschieden in produktbeschreibende Daten - als Ergebnis des Konstruktionsprozesses - und produktionsbeschreibende Daten, die die zeitabhängigen Abläufe zur Produkterstellung enthalten (VDI 1990, S. 11). Die Leistungsfähigkeit eines Rechnerwerkzeuges hängt sehr stark vom Aufbau und den Optionen dieses Produktmodells ab.

Zur Erstellung von Produktmodellen gibt es einige Ansätze, die aber bislang fast ausschließlich für den Bereich der produktbeschreibenden Daten angewandt werden können. Als wichtigste Vertreter seien IGES, SET, VDAFS und CAD<sup>11</sup> genannt (VDI 1990, S.12ff, SCHOLZ-REITER 1991, S. 53ff, MILBERG 1992, S. 90ff.). Seit Beginn der 90er Jahre ist man bestrebt, mit dem Standard for the

---

<sup>9</sup> Die Abkürzung CIM steht für **Computer Integrated Manufacturing**. Die Vision war eine durchgängige Rechnerunterstützung von der Produktidee bis zum Verkauf, also während des gesamten Produktlebenszyklus (z.B. KRALLMANN 1990, MILBERG & KOEPPER 1990, MILBERG 1992). In Deutschland wurde der Begriff erstmals 1985 auf der Hannover Messe verbreitet (GEITNER 1987, S. 307).

Exchange of Product Model Data (STEP) (ISO 10303-1) eine Vereinheitlichung der unterschiedlichen Standards zu erreichen (GRABOWSKI 1990, EVERSHIME U. A. 1993, GRABOWSKI U. A. 1994a, GRABOWSKI U. A. 1994b, KRAUSE U. A. 1996 A).

Allerdings ist zu beobachten, dass die großen CAD-Systeme wohl aus marktstrategischen Überlegungen nach wie vor ihre eigenen Formate einsetzen. Einerseits beinhaltet das dem System zugrundeliegende Modell einen elementaren Teil des Know-hows der Entwicklung und andererseits könnten die individuellen Leistungsmerkmale der Systeme mit dem STEP-Modell nicht unbedingt realisiert werden. STEP wird somit als Kompromisslösung lediglich ein Austauschformat bleiben, wenngleich der Datenverlust bei Verwendung eines STEP-basierten Modells bereits vorprogrammiert ist (BENN 1997).

Mittlerweile umfasst die Beschreibungsmöglichkeit in den Rechnerwerkzeugen weit mehr als die rein geometrische Abmessung. So lassen sich etwa auch funktionale Zusammenhänge aller Art über sogenannte Features abbilden. Features bestehen aus Form-Features, die gegebenenfalls zusätzlich mit Semantik belegt werden können (FORREST 1988). Das Form-Feature ist die „strukturorientierte Gruppierung geometrischer Elemente ohne jegliche Semantik (SPUR & KRAUSE 1997, S. 176)“. Anwendung findet diese Technologie sowohl innerhalb der eigentlichen Produktgestaltung (z.B. LINDEMANN U. A. 1998) als auch beispielsweise in Verbindung mit der Produktionsplanung über Fertigungs-Features (HAASIS 1997, S. 63 u. 77, VAJNA 1997, S. 55) und Montage-Features (FOX & BLEY 1994, MATTHES U. A. 1997) oder mit der Service-Planung (YANG & MAREFAT 1994). Das Bezugsobjekt der Features ist aber bislang stets das Produkt, nicht etwa die Fertigungseinrichtung.

Im Bereich der Fertigungstechnik bestehen derzeit Normierungsbestrebungen für ein Datenschema, das unter dem Namen MANDATE eine konsistente Ergänzung zu STEP bieten soll und die statische Modellierung von Ressourcen sowie der dynamischen Abbildung des Materialflusses und der Steuerung umfasst (CUTTING-DECELLE & MICHEL 1999). Die mangelnde Akzeptanz des STEP-Standards bei den kommerziellen Systemen lassen hier starke Zweifel an einer schnellen Etablierung aufkommen.

#### 3.1.1.4 Modellierungsmethoden für Prozesse

In den 70er Jahren wurde von D. Ross die **Structured Analysis and Design Technique** (SADT) eingeführt. Hierauf basieren einige grafische Ansätze zur System- und Prozessbeschreibung. Die bekanntesten sind die im Rahmen des Integrated Computer Aided Manufacturing-Programms der amerikanischen Luftwaffe entwickelten Definitionssprachen **IDEFx** (SOFTECH 1981, MARCA & McGOWAN 1988). Die bekanntesten Vertreter sind IDEF0 für die Beschreibung von Funktionen, IDEF1X für Informationen und IDEF2 für dynamisches Verhalten von Systemen. Die Notation wird auch für Simulations- und Steuerungszwecke in Rechnersystemen eingesetzt (z. B. CHEN-LEONG U. A. 1998). Nachteilig für die Praxis sind jedoch die lediglich eingeschränkte Darstellbarkeit von übergreifenden Abläufen, die fehlende Darstellungsmöglichkeit dynamischer Veränderungen der Systeme und der hohe Erstellungsaufwand für die Diagramme (EVERSHEIM 1996, S. 7-130f).

Die **Integrierte Unternehmensmodellierung** (IUM) ist objektorientiert aufgebaut. Sie wird insbesondere auf Geschäftsprozessebene etwa zur Abbildung von Produktentwicklungsprozessen mit den drei Objekten Produkt, Ressource und Auftrag eingesetzt (SPUR U. A. 1993). Diese Prozessbeschreibung eignet sich aufgrund ihrer Struktur nicht zur Beschreibung von automatischen Produktionssystemen und ihrer Steuerung.

Weitere Modellierungsmethoden für Abläufe gibt es aus dem Umfeld des Projektmanagements / Geschäftsprozessmodellierung (z.B. Netzplantechnik, ARIS, PNEP, SOM, etc.). Übersichten hierzu finden sich bei EVERSHHEIM (1996) sowie VOSSEN & BECKER (1996). Diese Ansätze bauen teilweise auf anderen auf und sind in der Regel für Arbeitsabläufe gedacht, an denen Menschen beteiligt sind.

Darüber hinaus gibt es allgemeine Modellierungsansätze zur Abbildung von Abläufen in der Softwareentwicklung (z.B. Datenfluss- und Programmablaufpläne nach DIN 6601, Struktogramme nach Nassi-Shneidermann). Eine Übersicht bietet beispielsweise GRABOWSKI (1995). Aufgrund ihrer Allgemeingültigkeit sind sie für die effiziente Modellierung von Produktionsabläufen nicht einzusetzen.

Ebenfalls aus dem Umfeld der mathematisch/informatischen Beschreibungs-techniken stammen die **Petri-Netze**<sup>10</sup> (PETRI 1962). Sie erfreuen sich bei der Modellierung von Prozessen (automatisierungstechnische wie geschäftsprozessorientierte) wachsender Beliebtheit, nicht zuletzt deshalb, weil zahlreiche Dialekte und Modifikationen für die diversen Anwendungsbereiche generiert wurden (z.B. CHEN 1997, ELMARAGHY U. A. 1998, EVERSHHEIM & HACK 1996, FINOTTO & CRESTANI 1996, MORI U. A. 1998, WANG 1997, XIROUCHAKIS U. A. 1998 sowie zahlreiche deutsche Beiträge in SCHNIEDER & ABEL 1997). Da die Netze teilweise schwer zu interpretieren sind, gibt es Rechnerwerkzeuge, die beispielsweise SADT-Darstellungen intern als Petri-Netze mit höherer Funktionalität verwalten (EVERSHHEIM 1996, S. 7-132).

### *3.1.2 Datentechnische Kommunikation zwischen Computerprogrammen*

Im Folgenden werden elementare Modelle und Mechanismen der Kommunikation kurz vorgestellt, welche später (s. Kapitel 3.2, 3.4 - 3.6 und 4) als Grundlage für unterschiedliche Konzepte zum Einsatz kommen.

---

<sup>10</sup> Die Petri-Netze sind eine mathematische Spezifikation zur Beschreibung von Eigenschaften und Verhalten informationsverarbeitender, diskreter Systeme. Die Darstellung erfolgt in grafentheoretischer Form mit aktiven und passiven Knoten sowie verbindenden Kanten. Dies ermöglicht eine Analyse des dynamischen Verhaltens (GRABOWSKI 1996, S. 17-43). Grundsätzlich gibt es vier Arten von Petri-Netzen: Bedingungs-Ereignis-Netze, Stellen-Transitionen-Netze, Prädikat-Transitionen-Netze und Kanal-Instanz-Netze (EVERSHHEIM 1996, S. 7-132).

### 3.1.2.1 ISO-OSI-Modell

Das **OSI-Modell** (Open System Interconnection) der ISO 7498 (1984) bildet die Grundlage moderner Rechnerkommunikationskonzepte. In sieben aufeinander aufbauenden Schichten werden die zu übertragenden Daten aus der Sender-Anwendung (z.B. Telnet oder Ftp) in Schicht 7 bis auf die Bit-Ebene (Schicht 1) aufbereitet. Innerhalb der Schicht 1 findet dann auch der physikalische Transport statt. Beim Empfänger kommen die Bit-Informationen ebenfalls in der Schicht 1 an und werden dann in umgekehrter Reihenfolge bis zur Anwendung in Schicht 7 aufbereitet (s. Abbildung 7). Jede niedrigere Schicht hat eigene Protokollbytes und packt das Datenfeld der übergeordneten Schicht als komplettes Paket definiert dazwischen. Aus diesem Grund wird auch von geschachtelten Protokollen gesprochen (FURRER 1998, S. 29). Die übertragene Informationsmenge wird umso größer, je niedriger die Schicht liegt.

Schicht 7	b	Anwendungsprogramm	
	a	ALI / API	
Schicht 6		Presentation	Bietet Unabhängigkeit von der Darstellung
Schicht 5		Session	Aufbau und Abbau von Verbindungen
Schicht 4		Transport	Fehlerfreie, sequenz-gerechte Übertragung
Schicht 3		Network	Adressierung, Pfadsuche, Pakets
Schicht 2		Data Link	Übertragung von Datenblöcken
Schicht 1		Physical Link	Übertragung von Bitmustern

Abbildung 7: Das ISO/OSI Referenzmodell (nach FURRER 1998, S. 10)

Innerhalb des Referenz-Modells ist es möglich, zwischen den einzelnen Schichten logische Verbindungen zu ziehen und daher virtuelle Datentransfers beispielsweise in der 4. oder 5. Schicht zu definieren. Die darunterliegenden Schichten werden dann nicht mehr betrachtet. Hierfür wird auf komplett gekapselte unterlagerte Transportsysteme zurückgegriffen, die eine Aufbereitung der restlichen (niedrigeren) Schichten übernehmen.

### 3.1.2.2 TCP/IP - Ethernet

Ein Beispiel für ein gekapseltes Transportssystem ist das **Transmission Control Protocol/Internet Protocol** (TCP/IP). Dieses umfasst im Prinzip die Schichten 1 mit 4 des ISO/OSI-Referenzmodells (FURRER 1998, S. 27 - 46).

**Ethernet** ist eine standardisierte Kommunikationsinfrastruktur mit verschiedenen Kommunikationsmedien (Koaxialkabel, Lichtwellenleiter, Funkverbindung...). Das Konzept wurde Mitte der 70er Jahre von Robert M. Metcalfe bei der Firma Xerox in USA entwickelt, um die bis dahin verbreiteten Punkt-zu-Punkt Verbindungskonzepte abzulösen (FURRER 1998, S. 15 f). Das Ethernet ordnet sich in der Schicht 1 des ISO/OSI-Referenzmodells ein. Seit den Anfängen wurde die Leistungsfähigkeit des Ethernet erheblich gesteigert. Ehe-

dem 3 Mbit/s stehen heute 100 Mbit/s und im Prototypenstadium sogar 1000 Mbit/s an Übertragungskapazität gegenüber, die sogar Echtzeit-Dienste ermöglichen (HIRSCHMANN 1999).

Ethernet-TCP/IP ist ein weltweit etabliertes Kommunikationssystem. Durch den Einsatz eines Predictable Ethernet-TCP/IP wird jedem Teilnehmer eine Lastbegrenzung auferlegt, sodass für die Steuerungsebene in der Automatisierungstechnik die Ethernet-Technologie auch mit 100 Mbit/s möglich ist. Im Gesamtverbund eines Unternehmensnetzes ist das Predictable-Ethernet vom restlichen Ethernet über eine Bridge zu trennen, um generell den Datenverkehr in der zeitkritischen Anwendungswelt zu minimieren (s. Abbildung 8). Die Hardware- und Protokollimplementierung ist aber in beiden Netzen identisch (FURRER 1998, S. 12 - 13).

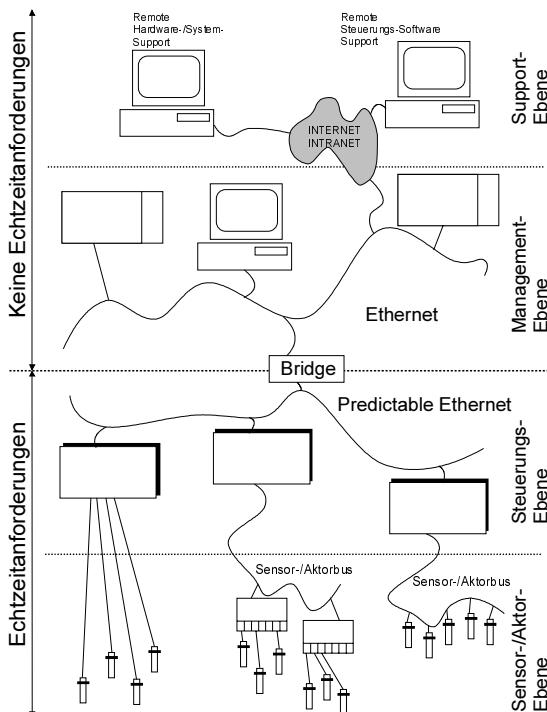


Abbildung 8: Ethernet für zeitkritische Anwendungen  
(nach FURRER 1998, S. 12)

Nach BEUDERT 1999 gewinnt das Kommunikationsprotokoll insbesondere durch den zunehmenden Verbreitungsgrad von Microsoft-Anwendungen im Automatisierungsbereich zusätzliches Verbreitungspotential: „Mit dem Einzug der PC-Technik in die Leitebenen von Industrieanlagen hat das Internet und damit das TCP/IP-Protokoll seinen Siegeszug angetreten. Inzwischen werden Automatisierungsgeräte via TCP/IP vernetzt und verdrängen bisherige Buslösungen.“

sungen wie beispielsweise ‚Sinec H1‘. [...] Das bisher als Nachteil angesehene fehlende Echtzeitverhalten von TCP/IP kann in Teilen durch die enorme Übertragungskapazität und durch redundante Netzwerkkonzepte aufgefangen werden (S. 39“)

#### 3.1.2.3 CORBA

Die **Common Object Request Broker Architecture** (CORBA) ist ein Standard für die Verteilung und Zusammenarbeit objektorientierter Softwarebausteine in Rechnernetzwerken (OMG 1995). Dabei werden die Schnittstellen von Client- und Serverapplikation in der plattformunabhängigen Beschreibungssprache „Interface Definition Language (IDL)“ erstellt, die auf jeder Rechnerplattform von einem spezifischen Compiler übersetzt wird. Somit ist sichergestellt, dass die Kommunikation zwischen Client und Server stets funktioniert, egal auf welchem Rechner im heterogenen Netz diese gerade laufen. Für eine detailliertere Beschreibung und Anwendung sei auf REDLICH (1996) verwiesen.

Die CORBA-Objekte können entweder komplett eigene Übertragungsprotokolle definiert bekommen oder aber sich auf etablierte Systeme wie TCP/IP (s. Kapitel 3.1.2.2) abstützen.

Für den Programmierer von objektorientierten Rechneranwendungen bietet der CORBA-Standard den Vorteil, dass er nach dem Anlegen der entsprechenden IDL-Spezifikationen die CORBA-Objekte genauso in sein Systemkonzept integrieren kann, als wären es gewöhnliche Software-Objekte seiner Applikation. Lediglich die Instanzierungs- und Destruktionsvorgänge der einzelnen Klassen unterscheiden sich geringfügig. Ansonsten wird die Konsequenz der Objektorientierung nicht dadurch unterbrochen, dass mit anderen Programmen Daten ausgetauscht werden, wie es beispielsweise bei der Verwendung von Remote Procedure Calls (RPC) (BLOOMER 1992) der Fall wäre.

#### 3.1.3 Resümee

In diesem Teilkapitel wurden ausgewählte Ansätze der Datenmodellierung und Kommunikationsmechanismen für Computerprogramme vorgestellt. Die Selektion orientierte sich daran, eine Basis für das Verständnis der später untersuchten Ansätze zu legen.

## 3.2 Steuerungstechnische Grundlagen

### 3.2.1 Steuerungsarten

Der Aufbau einer **Steuerungseinrichtung** wird nach VDI/VDE 3683 folgendermaßen dargestellt: „... eine Folge von Funktionsblöcken [...], wobei die zu verarbeitenden Signale dem Eingang als Bedienungssignale (z.B. von Tastern, Schaltern) und als Rückmelde-Signale (z.B. von Grenzwertschaltern, Sensoren usw.) zugeführt werden.“ Abbildung 9 zeigt diesen Zusammenhang.

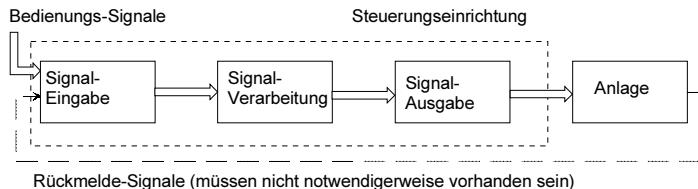


Abbildung 9: Steuerungseinrichtung (nach VDI 3683)

Die DIN 19237 unterscheidet bei der Signalverarbeitung zwischen Synchrone, Asynchrone, Verknüpfungs- und Ablaufsteuerung.

Eine **Ablaufsteuerung** ist hier beschrieben als „Steuerung mit zwangsläufig schrittweisem Ablauf, bei der das Weiterschalten von einem Schritt auf den programmgemäß folgenden abhängig von Weiterschaltbedingungen erfolgt. Die Schrittfolge kann in besonderer Weise programmiert sein, z.B. mit Sprüngen, Schleifen, Verzweigungen.“ Ein Ablaufschritt ist dabei die „kleinste funktionelle Einheit des Programms.“

Die in dieser Arbeit im Rahmen einer Montageplanung erstellte Steuerung für Montageanlagen entspricht daher genau dem Begriff der Ablaufsteuerung.

### 3.2.2 Steuerungsstrukturen

#### 3.2.2.1 Hierarchische Einteilung

Im industriellen Einsatz werden Steuerungen häufig in einem hierarchischen Verbund eingesetzt. In der DIN 19237 sind drei Hierarchiestufen genannt:

1. **Einzel-, Antriebssteuerung:** „Funktionseinheit zum Steuern eines einzelnen Stellglieds.“ Hier erfolgt die Einwirkung auf den Prozess. Diese Komponenten sind formal in der Einzelsteuerungsebene angeordnet.
2. **Gruppensteuerung:** „Funktionseinheit zum Steuern eines zusammenhängenden Teilprozesses, die den dazugehörigen Einzel- oder Antriebssteuerungen übergeordnet ist.“ Gegebenenfalls können die Gruppensteuerungen bei komplexen Aufgaben untereinander hierarchisch angeordnet werden. Insgesamt sind sie in der Gruppensteuerungsebene enthalten.
3. **Leitsteuerung:** „Funktionseinheit zum Steuern des Gesamtprozesses, die der Gruppensteuerungsebene übergeordnet ist.“

Durch die intensive Beschäftigung mit dem Gedanken der rechnerintegrierten Produktion entstanden zudem noch einige detailliertere Untergliederungen:

MILBERG (1992, S. 128) nennt insgesamt fünf Stufen (s. Abbildung 4)<sup>11</sup>, wobei die **Steuerungs-** und die **Aktor-/Sensorebene** eine Verfeinerung der Einzel-

---

<sup>11</sup> Diese Einteilung wurde bereits für die anschaulichere Darlegung des Betrachtungsbereichs der Arbeit benötigt und deswegen aus dem Kapitel 3 in das Kapitel 2.3 vorgezogen.

steuerungsebene der DIN-Definition darstellen. Die Zellensteuerung entspricht im Wesentlichen der Gruppensteuerung der DIN, beide setzen eine Leitsteuerung ein. Additiv beschreibt die Planungsebene hier die nächsthöhere Hierarchie; diese Einteilung ist also eine Erweiterung der Definition nach DIN.

PRITSCHOW (1991) sieht sogar sieben Ebenen, wobei er über der Planungsebene von Milberg die gesamte **Fabriksteuerung** ansiedelt und unterhalb der Zellensteuerung die Aufgliederung in **Maschinesteuerung**, die **Einzelsteuerung** und schließlich die **Prozessebene** mit den einzelnen Antrieben vornimmt. Der Begriff der Einzelsteuerung nach DIN würde hier alle drei Ebenen umfassen.

#### 3.2.2.2 Aufgaben der Zellen- und Leitebene

Entsprechend des Betrachtungsschwerpunktes dieser Arbeit (s. Kapitel 2.2) sollen hier die Aufgaben der obersten und mittleren Ebene der Steuerungshierarchie nach DIN 19237 kurz aufgezeigt werden.

In der Leitebene definiert BENDER (1996, S. 10-92) folgende sechs Aufgaben, die über ein elektronisches Leitsystem unterstützt werden:

- **Belegungsplanung** (Datenübernahme aus dem PPS<sup>12</sup>, Kapazitätsabgleich, Reihenfolgeermittlung, Terminierung)
- **Arbeitsverteilung** (Auftragsveranlassung, Arbeitspapiere drucken, BDE)
- **Fortschrittsüberwachung** (Anlagenvisualisierung)
- **Materialflussteuerung** (Transportaufträge, Lagerverwaltung)
- **Betriebsmittelverwaltung** (BM-Datenbank, Bereitstellorganisation, Standzeitberechnung)
- **NC-Programm-Verwaltung** (Schnittstelle zu NC-Programmiersystem, NC-Programm-Datenbank)

Auf der darunterliegenden Zellenebene befinden sich nach BENDER „mehrere, mit eigener Steuerungsintrigenz ausgestattete Komponenten (1996, S. 10-93).“ Die zugehörige, den Komponenten übergeordnete Zellensteuerung sorgt in diesem Konzept „für das koordinierte Zusammenwirken dieser Komponenten während der Auftragsdurchführung. Sie ist Bestandteil der Zelle und ermöglicht so ein weitgehend autonomes Arbeiten (S. 10-93).“ Die vier wesentlichen Aufgaben sind **Auftragsdisposition**, **Ablaufsteuerung**, **Diagnose** und **Verwaltungsfunktionen** (s. Abbildung 10).

---

<sup>12</sup> Produktionsplanungs- und Steuerungssystem (PPS)

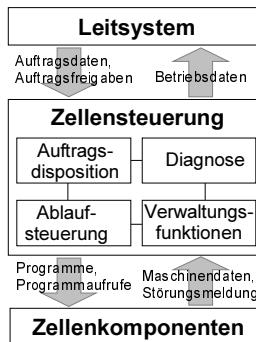


Abbildung 10: Funktionen eines Zellensteuerungssystems  
(nach BENDER 1996, S. 10-93)

Das Thema **Zellenrechner** fand laut GROHA (1988) bereits ab dem Jahr 1983 den Weg in die wissenschaftliche Diskussion (S. 13). Er selbst definierte eine Dreiteilung der Kernaufgaben eines Zellenrechners (S. 38):

- **Auftragseinplanung** (Einlastung, Disposition)
- **Auftragsdurchführung** (Vorbereitung, Bearbeitung)
- **Diagnose** (Fehlerbehandlung, Austesten)

GROHA (1988) und BENDER (1996) geben jedoch keine Hinweise, wie im Rahmen einer Produktionsplanung die einzelnen Teifunktionalitäten systematisch geplant und verifiziert werden können, demzufolge werden auch keine Hilfsmittel präsentiert.

### 3.2.3 (Programmier-)sprachen / semantisch-syntaktische Kommunikationskonzepte

#### 3.2.3.1 Manufacturing Message Specification

Zu Beginn der 90er Jahre wurde die **Manufacturing Message Specification** (MMS) in der ISO 9506-1 standardisiert. Die MMS ist ein objektorientiert aufgebautes Modell, das „Kommunikationsdienste zum Strukturieren, zum Betrieb und zum Modifizieren verteilter Automatisierungssysteme (SCHWARZ 1991, S. 369)“ definiert. Die Grundidee dabei ist, dass die unterschiedlichen Systeme unabhängig von ihrem Hersteller oder konkreten Einsatzgebiet alle über eine einheitliche Kommunikationsschnittstelle angesprochen werden können und einen vergleichbaren Leistungsumfang bereitstellen<sup>13</sup>. Dem Konzept liegt das

---

<sup>13</sup> Eine ähnliche Idee verfolgt gegenwärtig beispielsweise die Firma Sun Microsystems, deren Programmiersprache „Java“ für das Internet definiert wurde und unabhängig von der Computerplattform ausführbar ist. Eine sogenannte „Java Virtual Machine“ auf den jeweiligen Rechnern setzt das allgemeingültige, über das Internet verbreitete Programm dann rechnerspezifisch um. Java ist jedoch eine universelle Programmiersprache, in der die hier betrachteten

### 3.2 Steuerungstechnische Grundlagen

---

Client-Server-Prinzip zugrunde. Dabei fungiert eine Automatisierungskomponente als Server, der definierte Dienste anbietet. Diese Komponente wird im MMS-Modell als **Virtual Manufacturing Device** (VMD) bezeichnet und ist ein sog. **MMS-Objekt**. Über MMS kann nun das gesamte extern sichtbare Verhalten der Automatisierungskomponente nachgebildet werden. Dazu gibt es die **MMS-Dienste**, mit denen eine Definition, Benutzung und Modifikation der MMS-Objekte möglich ist. Daneben benötigt man weitere, teilweise unterlagernde MMS-Objekte:

- Eine **Program Invocation** (PI) ist ein virtueller Prozess, der eine Programmabarbeitung repräsentiert und entsprechende Stati tragen kann: Idle, Starting, Running, Stopping, Stopped, Resuming, Unrunnable.
- Eine **Domain** ist ein Speicherbereich im Steuerungsrechner, der Programme oder Daten enthält. Mehrere Domains zusammengenommen ergeben eine Programm Invocation.

In gewisser Weise kann man somit Domains mit den Unterprogrammen oder Funktionen der klassischen Programmierung vergleichen. Die PI bildet den übergeordneten Rahmen, der aus den Einzelteilen das auszuführende Programm für die Automatisierungskomponente bildet.

Jedes der MMS-Objekte hat definierte Attribute. Bei der Program Invocation sind die wichtigsten Attribute der **Status** sowie die **List\_of\_Domains**. Die einzelnen MMS-Dienste greifen nun gemäß dem MMS-Protokoll auf die MMS-Objekte und MMS-Variablen zu. Für eine weitergehende Beschreibung der ISO-Norm sei auf SCHWARZ 1991 und ESPRIT 1995 verwiesen.

Die wesentlichen Eigenschaften von MMS fasst SCHWARZ (1991, S. 370) folgendermaßen zusammen:

- „allgemein verfügbare und erprobte Spezifikation.
- Verständigung der Entwickler, Anwender,... durch einen Standard.
- Verständigung der Komponenten durch einen Standard.
- durchgängige Modellierung für alle Automatisierungsgeräte (kleine – große, alte – neue).
- hohe Flexibilität durch eine Vielzahl von Funktionen.
- einheitliche System-Spezifikation, -Dokumentation und -Schulung.
- einmal lernen aber immer wieder anwenden.
- einheitliche Implementierung von Programmen für die Bearbeitung von Kommunikationsdiensten.
- durchgängig anwendbar über verschiedene Kommunikationssysteme“.

---

steuerungsspezifischen Objekte und deren Beziehungen untereinander nicht definiert sind. Für die Industrieautomatisierung ist keine nutzbare Spezifikation vorgegeben.

Zum MMS Grundkonzept wurden diverse Erweiterungen definiert, beispielsweise für NC-Maschinen oder Robotersteuerungen (SOMMER & BÄRNREUTHER 1993 A & B). Für die Robotererweiterung kamen die MMS-Objekte **Roboter-arm** sowie **Controlling PI** und **Controlled PI** hinzu, die eine zusätzliche Hierarchisierung der Programme ermöglichen (ISO 9506-3). BOLLER (1993) sieht jedoch bei dieser Erweiterung eine Erschwernis für die Umsetzung und es sind auch nur wenige Implementierungen bekannt.

MANSOUR U. A. (1998) erweitern in einem eigenen Ansatz die klassische MMS für die Anwendung zu einer Robotersteuerung. Aus einem OMT-Modell der MMS und einem OMT-Modell eines Roboters synthetisieren sie ein neues Modell. Die Klasse *Roboter* wird von *VMD* abgeleitet, die *Klasse Task Program von Program Invocation*. Der neue *Roboter* hat nun zusätzliche MMS-Attribute. Über Anwendungen wird auch dort nicht berichtet.

KUBA (1997) benutzt sogar den MMS-Umfang, um per interaktivem Dialog auch Werker in der Montage informations- und kommunikationstechnisch zu integrieren. Dort werden die entsprechenden Arbeitsaufträge am Arbeitsplatz in einem Terminal visualisiert und per Eingabe quittiert.

### 3.2.3.2 Roboterprogrammierung

Bei der Programmierung von Robotern unterscheidet man prinzipiell zwischen dem **Online-** und dem **Offline-Betrieb**. Im ersten Fall werden die eingehenden Signale direkt in Bewegungsänderungen umgesetzt, im zweiten Fall wird das Programm zunächst separat erzeugt, im Idealfall verifiziert und dann erst im Steuerungsrechner zur Ausführung gebracht. In der Einteilungssystematik einzelner Verfahren gibt es unterschiedliche Auffassungen, für eine Übersicht sei an dieser Stelle auf DAMMERTZ (1996, S. 5 – 17) verwiesen.

Entsprechend des im Rahmen dieser Arbeit später dargestellten Anwendungsszenarios wird unter Online-Programmierung die Manipulation über das Handbediengerät des Roboters, das Ausführen von Kommandos auf Betriebssystemebene des Steuerungsrechners oder das Ablauen eines separat erstellten Programms mit Befehlen aus der Programmiersprache verstanden.

Die Offline-Programmierung umfasst diese Programmerstellung. Notwendig hierfür sind entweder nur ein Texteditor für die Eingabe oder aber ein 3D-Simulationssystem (s. Kapitel 3.4.1.2) für die unmittelbare Verifizierung des Bewegungsablaufs vor der realen Ausführung.

Wie bereits erwähnt, erfolgt die Kontrolle der Roboter von einem Steuerungsrechner. Dieser ermittelt aus den jeweiligen Zielkoordinaten die Bewegungsbahn, setzt diese in die Bewegung der einzelnen Achsen des Roboters um und sorgt für die entsprechende Regelung der Leistungsströme in den Motoren.

Wie alle Computer, verfügt auch ein derartiger Steuerungsrechner über ein Betriebssystem. Dies übernimmt die Dateiverwaltung und überwacht die Ausführung der Programme. Meist können in mehreren Tasks unterschiedliche Programme parallel abgearbeitet werden, wobei lediglich immer nur einer Task die Kontrolle über den Roboterarm zugewiesen werden kann.

### 3.2 Steuerungstechnische Grundlagen

Die auszuführenden Programme werden in speziellen Programmiersprachen erstellt. Diese sind meist herstellerspezifisch geprägt und erinnern ihrem Wesen nach an klassische Programmiersprachen wie BASIC oder FORTRAN. Es können Hauptprogramme angelegt werden, die in Unterprogramme verzweigen und wieder zurückspringen. In einer konzertierten Aktion wurde eine einheitliche Sprache für Roboter, die **Industrial Robot Language (IRL)**, entworfen und normiert (DIN 66312-1).

Derzeit gibt es Normierungsbestrebungen für eine grafische Benutzeroberfläche von Roboterprogrammiersystemen, wie sie im Büroalltag durch den Einzug der Windows-Software bereits etabliert sind. Hier erfolgt eine Definition der Symbole für die Kategorien Programmierung, Bewegung, Ein-/ Ausgabe sowie die unterschiedlichen Anwendungsarten (Schweißen, Montieren, Kleben, Lackieren) und Sonstiges (ISO/DIS 15187). Die einzelnen Programme sind aber nach wie vor in der gerätespezifischen Programmiersprache zu erstellen.

#### 3.2.3.3 SPS-Programmierung nach IEC 1131-3

Die IEC 1131 ist der erste international akzeptierte Standard für die Programmierung von speicherprogrammierten Steuerungen (SPS). In Teil 3 sind formale, semantische und syntaktische Definitionen für das grundlegende Softwaremodell der Steuerung enthalten, ebenso eine Reihe von anwendbaren Programmiersprachen (DIN EN 61131-3). In dieser Norm haben „die Methoden moderner Programmiersprachen Einzug gehalten (PFEIFFER 1997, S. 95)“. Das Programmierkonzept nach IEC 1131-3 wird von JOHN & TIEGELKAMP (1995, S. 22ff) vorgestellt. Es besteht aus **Programmorganisationseinheiten** (POE). Diese werden in drei Ausprägungen eingesetzt: **Funktion** (FUN), **Funktionsbaustein** (FB) und **Programm** (PROG) (s. Abbildung 11).

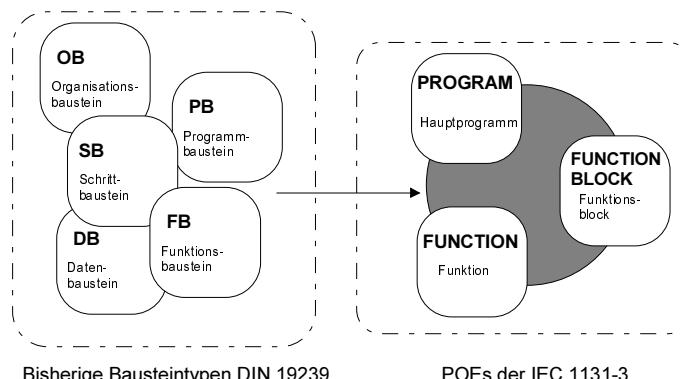


Abbildung 11: Übergang von Bausteintypen der DIN 19239 zu POEs der IEC 1131-3 (JOHN & TIEGELKAMP 1995, S. 30)

Dabei weisen Funktionen die geringste Funktionalität auf. Sie geben bei gleichem Eingangswert immer dasselbe Ergebnis zurück. Die Funktionsbausteine dagegen werden als Instanzen mit der Möglichkeit zur lokalen Daten-

speicherung eingesetzt. Ein Programm ist der Kopf eines SPS-Programms und besitzt die Möglichkeit, auf die SPS-Peripherie zuzugreifen und dies den übrigen POE bereitzustellen. Ähnlich wie beispielsweise in der Programmiersprache C sind häufig benötigte Standard-Funktionen und -Funktionsbausteine vordefiniert. Variablen sind in verschiedenen Datentypen (Bool, Integer,...) deklarierbar. Die IEC 1131-3 vereinfachte bisherige Konzepte wie etwa das der DIN 19239 (s. Abbildung 11).

Die Programmgenerierung für die einzelnen POE kann durch eine der fünf zulässigen Programmiersprachen erfolgen: Ablaufsprache (AS), Kontaktplan (KOP), Funktionsbausteinsprache (FBS), Anweisungsliste (AWL) und Strukturierter Text (ST). Diese können je nach Einsatzbereich und Kenntnisse des Programmierers ausgewählt werden. Eine umfassende Einführung geben JOHN & TIEGELKAMP (1995, S. 100-202).

Mit dieser Norm ist es möglich, komplexe Steuerungsprogramme modular aufzubauen, um die Übersichtlichkeit und Änderbarkeit zu erhöhen. Durch eine Hierarchisierung der Funktionsbausteine lässt sich bei entsprechender Leistungsfähigkeit der Hardware eine Steuerungshierarchie etwa von Zellensteuerung und Komponentensteuerung innerhalb einer SPS abbilden.

### **3.2.4 Kommunikation für Steuerungskomponenten**

Für die Kommunikation von Steuerungskomponenten im industriellen Einsatz untereinander gibt es eine Vielzahl verschiedener Ansätze und Standards. In diesem Teilkapitel werden lediglich die für diese Arbeit relevanten<sup>14</sup> herausgegriffen und kurz vorgestellt.

#### **3.2.4.1 Manufacturing Automation Protocol**

SCHOLZ (1990) gibt einen Abriss der Entwicklung des **Manufacturing Automation Protocol** (MAP). Danach erfolgte die Initiative für einen standardisierten Kommunikationsmechanismus in der Fertigung im Juli 1980 bei der Firma General Motors in USA. Das in den folgenden acht Jahren unter der Federführung von GM erarbeitete MAP-Protokoll orientiert sich am ISO-OSI-Modell. MAP spezifiziert dabei aber lediglich die 7. Schicht sowie die Schichten 1 und 2. In der 7. Schicht werden die drei Protokolle ACSE (Application Control Service Element), FTAM (File Transfer Access and Management) und MMS (s. Kapitel 3.2.3.1) vorgesehen. Nicht zuletzt hier liegt der vermeintliche Vorteil des Konzeptes: „Der Erfolg von MAP wird durch die ‚technologische Sprache‘ MMS gewährleistet (SCHMIDT 1993)“.

MAP versteht sich als Hintergrundnetz (backbone), das Automatisierungsseln untereinander verbindet bzw. eine Verbindung zu übergeordneten Leitebenen darstellt. „Das MAP-Backbone eignet sich vor allem für die Vernetzung

---

<sup>14</sup> Insbesondere das Gebiet der Feldbusse sowie die Microsoft-spezifische Kommunikationsarchitektur OPC bleiben ausgeklammert, da sie für die Umsetzung des Gesamtkonzeptes mit Planungssystem, Simulation und realer Steuerung nicht geeignet sind. Diese Standards sind nicht universell genug.

von Rechnern im Bereich der Führungsebene, wie Werks-, Bereichs- und Zellenrechner, für die nicht zeitkritische Übertragung von Dateien und NC-Programmen (SCHOLZ 1990, S. 28).“ In den einzelnen Inseln können dann auch Subnetze einer anderen Architektur zum Einsatz kommen, die per Router eingebunden werden. Zu anderen homogenen Netzstrukturen gibt es Gateways. (SCHOLZ 1990, S. 27 - 28).

Für die notwendige Übersetzung der geräteneutralen Sprache an die spezielle Komponente (Treiber-Entwicklung) wurden auch Werkzeuge entwickelt. So stellen WECK & FRIEDRICH (1997) das Werkzeug **MMS 3D** vor, welches für ein beliebiges automatisiertes Betriebsmittel, das in eine MMS-Umgebung eingebracht werden soll, die maschinenspezifische Umsetzung in einem MMS-Device-Driver unterstützt. MMS 3D besteht aus verschiedenen Editoren, die die entsprechende Konfiguration vereinfachen und letztendlich sogar den ausführbaren Code des MMS-Servers erzeugen. Der Server kann dann mittels MAP/MMS-Interface angesprochen werden. Dieses Werkzeug verspricht, eine einfache Hilfe bei der Komponentenintegration auf MMS-Ebene zu offerieren.

Die Kombination von MMS mit dem informationstechnischen Übertragungsprotokoll MAP hat sich aber zu Beginn der 90er Jahre zwar in einigen Pilotinstallationen (z. B. MILBERG & SCHÄFFER 1991, MALLE 1995), nicht jedoch flächendeckend in der Industrie durchsetzen können. Dies wurde damals schon in zahlreichen kritischen Anmerkungen prophezeit bzw. befürchtet:

„Die Realisierung aller 7 Schichten für einfache und damit billige an das MAP-Netz anzuschließende intelligente Geräte, wie z. B. speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) würde außerdem einen unangemessen hohen Kostenaufwand bedeuten. [...] Generell sollte die Einschätzung der Einsatzmöglichkeiten von MAP für den einzelnen Anwender nicht zu optimistisch sein. Es muß klar gesagt werden, dass MAP-konforme Produkte zur Integration beliebiger Hardware kaum gekauft werden können (SCHOLZ 1990, S. 27 – 28).“

- Ein Justieren der Parameter für eine funktionierende Kommunikation erfordert jedoch spezielles Know-How.

- Die Administration der Adressen, Objekte und Kommunikationsbeziehungen ist aufgrund der unterschiedlichen Konfigurationssysteme in einer Multivendoranlage nicht direkt möglich. (SCHMIDT 1993)“

„Weiterhin wirkt sich das noch geringe Produktangebot, insbesondere bei Steuerungen (SPS, CNC) mit integrierter MAP- und MMS-Funktionalität, hemmend auf den verbreitenden Einsatz von MAP aus. Außerdem wird sich die restriktive MAP-Spezifikation im Bereich der OSI-Schichten 1 und 2 [...] sehr negativ auf die Akzeptanz von MAP aus. [...] Es ist daher denkbar, dass sich die MAP-Architektur nicht in ‚Reinkultur‘, sondern möglicherweise als ‚MMS auf Token Ring bzw. Ethernet‘ durchsetzen wird (HUG 1991, S. 25).“

#### 3.2.5 Resümee

Dieses Teilkapitel bereitet die für die vorliegende Arbeit wichtigen Aspekte aus dem Bereich der steuerungstechnischen Grundlagen auf. Analog zum voran-

gegangenen Teilkapitel 3.1 besteht die Motivation darin, die relevanten Techniken komprimiert darzustellen. Die im weiteren Verlauf der Arbeit erwähnten Konzepte und Systeme bauen auf diesen Grundlagen auf.

### **3.3 Entwicklungs- und Planungsvorgehensweisen**

Nach der Vorstellung der technischen Basis sollen in diesem Teilkapitel grundlegende methodische Vorgehensweisen vorgestellt werden, die einen übergreifenden Anwendungsbereich haben.

#### **3.3.1 Grundlagen**

Die Erkenntnistheorie unterscheidet grundsätzlich zwischen Aufgaben und Problemen. Nach BROCKHAUS (1996) ist eine Aufgabe "allg.: Pflicht, Anforderung, zu erledigende Arbeit". Das Problem wird von BROCKHAUS (1996) definiert als "schwierige Aufgabe, komplizierte Fragestellung; nicht gelöste Frage, beruhend auf dem Wissen oder der Erkenntnis, dass das verfügbare Wissen nicht ausreicht, um eine gestellte Aufgabe zu bewältigen oder einen Zusammenhang zu durchschauen, dessen Verständnis erstrebzt wird. [...] Das P. ist Ausgangspunkt des Fragens und Forschens, v.a. in der Wissenschaft." EHRLENSPIEL (1995, S. 46ff) sieht Aufgaben als geistige Anforderungen, für deren Bewältigung Methoden und Mittel bekannt sind. Bei einem Problem sind diese Mittel nicht bekannt, oftmals ist der erwünschte Endzustand nicht genau zu beschreiben (z. B.: „Unsere Firma muß konkurrenzfähig werden!“).

Für die Lösung von Problemen wurden diverse Vorgehensmuster entworfen, beispielsweise der Problemlösungszyklus der Systemtechnik (DAENZER & HUBER 1992) oder der Vorgehenszyklus nach EHRLENSPIEL (1995, S. 78ff). Die Produktentwicklung und Montageplanung enthält Problem- und Aufgabenstellungen für den Planer. Die grundlegenden Muster der oben erwähnten Zyklen (Möglichkeiten suchen, analysieren, bewerten, entscheiden) werden prinzipiell in den spezifischen Vorgehensweisen adaptiert und angewandt.

**Beurteilung:** Die Planung von automatisierten Montagevorgängen enthält Aufgaben und Probleme, die vom Planer zu lösen sind. Die allgemeinen Vorgehensweisen müssen aber für diesen Anwendungsfall aufbereitet werden, um eine Hilfestellung zu geben.

#### **3.3.2 Allgemeine Fabrikplanung**

AGGTELEY (1987, S. 30 - 35) definiert als übergeordnete Leitlinie eine Planungspyramide. Hier werden nach der Initiative die Phasen Vorarbeiten, Projektstudie und Ausführungsplanung erledigt. Am Ende der drei Phasen stehen die drei (Zwischen-)ergebnisse Aufgabenstellung, Entscheidung bzw. Betriebsbeginn, die für die jeweils anschließende Phase die Grundlage bilden. KETTNER U. A. (1984, S. 10ff) sehen für die Fabrikplanung die drei Bereiche Generalbebauungsplan (Gesamtbetrieb), Grobplanung (Fertigungswerkstätten) und Feinplanung (Maschinenarbeitsplätze) vor. Für jeden dieser Bereiche gibt es sowohl eine Idealplanung, die auf abstrakten Strukturen basiert sowie eine Realplanung, welche z.B. die tatsächlichen Abmessungen der Anlagen berücksichtigt.

### 3.3 Entwicklungs- und Planungsvorgehensweisen

sichtigt. Den Ablauf vom Generalbebauungsplan zur Feinplanung nennen sie **analytische Planung** (vom Ganzen zum Detail), die entgegengesetzte Vorgehensweise **synthetische Planung** (vom Detail zum Ganzen) (S.11).

**Beurteilung:** Die Unterscheidung in analytische und synthetische Planung zeigt auf, dass man aus unterschiedlichen Richtungen vorstoßen kann, um zum Ziel zu gelangen. Diese Idee wird später in ähnlicher Weise aufgegriffen.

#### **3.3.3 REFA-Standardvorgehen**

Als grundsätzliches Vorgehen werden die sequentiellen Planungsschritte ‚Vorplanung‘, ‚Grobplanung‘, ‚Feinplanung‘ und ‚Steuerung der Aufgabendurchführung‘ genannt (REFA 1974a, S. 31).

Das ‚REFA-Standardprogramm Planung und Steuerung‘ umfasst sechs Stufen (S. 35):

1. **Ziele und Aufgaben analysieren** (Problemphase)
2. **Planungs- und Steuerungsrahmen bestimmen** (Abgrenzungsphase)
3. **Aufgabendurchführung planen**, einschließlich Arbeitssysteme gestalten (Bewertungs- Auswahl- und Kontrollphase)
4. **Aufgabendurchführung veranlassen**
5. **Aufgabendurchführung überwachen**
6. **Aufgabendurchführung sicherstellen**

Dieses allgemeine Programm wird für einzelne Bereiche konkretisiert (s. Kapitel 3.3.5).

**Beurteilung:** Auch dieses Verfahren kann erst in einer präzisierten Form dem Planer bei seiner Arbeit helfen. Der Betrachtungsraum geht über die eigentliche Planung hinaus und enthält auch die Umsetzung. Somit ist auf dieser abstrakten Beschreibungsebene eine Durchgängigkeit von der Idee zur Realisierung skizziert (vgl. Forderung 3 aus Kapitel 2.5.3).

#### **3.3.4 VDI-Richtlinie 2221**

Im Maschinenbau wird als Standard-Vorgehensweise bei der Entwicklung oftmals die VDI-Richtlinie 2221 zitiert. Diese besteht aus vier Phasen, die in sieben Arbeitsabschnitte unterteilt sind. Eine Übersicht gibt die Abbildung 12 (VDI 2221).

Das Prinzip der Vorgehensweise besteht darin, von der abstrakten Überlegung und strukturellen Beziehungen aus eine Konkretisierung zu erhalten und schließlich die Umsetzung anzustoßen. Aufgrund des Anspruchs der Richtlinie, für technische Systeme Gültigkeit zu besitzen, muss die Beschreibung auf einem eher abstrakten Niveau bleiben. Für die jeweiligen Einsatzgebiete ist im Einzelfall eine spezifische Transkription notwendig, um eine verständliche Arbeitsanleitung daraus zu generieren. Das zu gestaltende technische System wird als Produkt bezeichnet.

Für einzelne Disziplinen sind spezielle Adaptionen erfolgt (z.B. VDI 2222: Konstruktionsmethodik, VDI 2422: Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik) bzw. in Vorbereitung (VDI 2223: Methodisches Entwerfen technischer Produkte, Richtlinie zur Produktentwicklung Mechatronik).

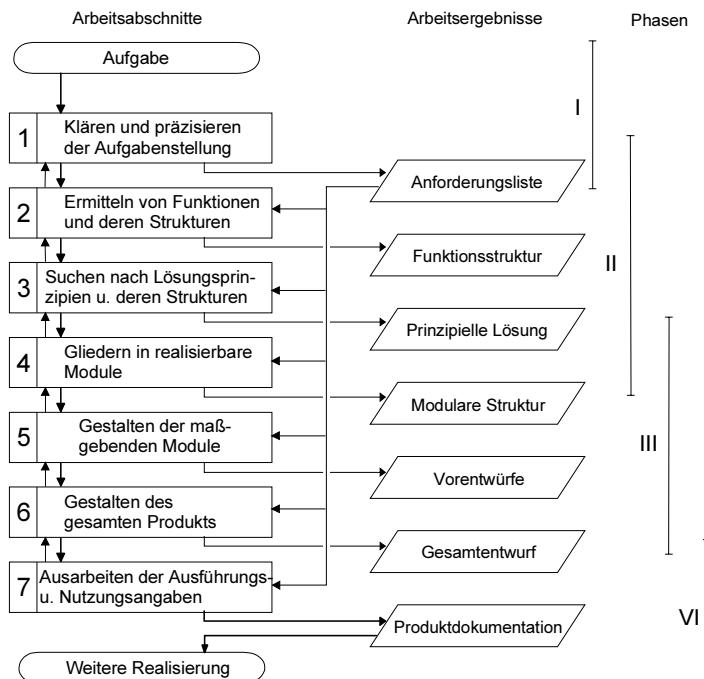


Abbildung 12: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (nach VDI 2221)

**Beurteilung:** Diese Vorgehensweise ist bereits konkreter als das REFA-Standardprogramm. Allerdings wird aus der Funktionsstruktur sehr schnell zum statischen Produkt übergegangen, sodass im Anwendungsfall der Montageplanung der Gestaltung des Montagevorgangs kaum mehr Aufmerksamkeit geschenkt wird, vielmehr den einzelnen Anlagenkomponenten.

### 3.3.5 Ansätze zur Arbeitsplanung

Die **Arbeitsplanung** wird von EVERSHIEIM (1989) organisatorisch als Teil der **Arbeitsvorbereitung** gesehen. Er unterscheidet zwischen **Arbeitssystem** und **Arbeitsablaufplanung**. Die Arbeitssystemplanung sorgt für die wirtschaftliche Gestaltung der Bereiche Fertigung und Montage. Wesentlich für die Arbeitsablaufplanung ist die Umsetzung von Produktinformationen in die Informationen für Fertigung und Montage. Zu den Aufgaben der Arbeitsablaufplanung gehören die Planungsvorbereitung, Stücklistenverarbeitung, Arbeitsplan-

### 3.3 Entwicklungs- und Planungsvorgehensweisen

erstellung, Betriebsmittelplanung, Programmierung, Prüfplanung und Kostenplanung.

REFA (1974b, S. 194) nennt sechs Schritte bei der Ablaufplanung:

- 1. Zielsetzung und Aufgabe formulieren:**  
Klären der Systemgröße, des Planungshorizonts bzw. der Planungsebene und der Minimalforderungen.
- 2. Aufgaben in Teilbereiche gliedern und Planungsebenen zuordnen:**  
Gliederung als Vorstufe der Ablaufplanung. Wichtigkeit steigt mit Komplexität der Aufgabe.
- 3. Ablaufplanung für Teilaufgaben durchführen:**  
Planung der logischen Auffeinanderfolge.
- 4. Zeiten für Mengeneinheiten ermitteln:**  
Ermittlung der Zeiten für die Durchführung der Aufgaben am Arbeitsplatz samt Zwischen- und Zusatzzeiten.
- 5. Bedarf je Mengeneinheit ermitteln:**  
Ermittlung des Bedarfs an Personal, Betriebsmitteln, Material, Informationen und Energie.
- 6. Teilaufgaben in Ablaufplänen vermaschen:**  
Pläne als Ergebnis der Planung, z.B. Programmablaufplan, Arbeitsplan.

Erst im sechsten Schritt wird der eigentliche Arbeitsplan erstellt. Hierfür gibt es ein allgemeingültiges Standardprogramm (S. 247), welches seinerseits im Kern aus fünf Elementen besteht:

- **Ausgangsmaterial** festlegen
- **Wirtschaftlichen Fertigungsablauf** festlegen
- **Arbeitssysteme** auswählen
- **Soll-Arbeitsablauf in Vorgänge** gliedern und beschreiben
- **Soll-Zeiten und -Anforderungswerte** bestimmen

Dieser REFA-Ansatz entstand Anfang der 70er Jahre, sodass auf Besonderheiten durch den verstärkten Rechnereinsatz in der Produktion, wie er in der darauffolgenden Dekade Einzug hielt, freilich noch nicht eingegangen wurde.

MILBERG (1992) definiert in diesem Kontext zusätzlich die unterschiedlichen Planungsarten **Neu-, Varianten-, Ähnlichkeits- und Wiederholungsplanung** (S. 63). Dabei zieht er offensichtlich Analogieschlüsse zu den Konstruktionsarten Neu-, Anpassungs- und Variantenkonstruktion (z.B. PAHL & BEITZ 1986, S. 4). Die Arbeitsplanerstellung differenziert er in die aufeinanderfolgenden Schritte Zeichnung interpretieren, Rohteilbestimmung, Arbeitsvorgangsermittlung, Maschinenauswahl, Sonderwerkzeugplanung, Vorrichtungsplanung und Vorgabezeitbestimmung. Die Generierung der NC-Programme ergibt sich aus der Detaillierung des Arbeitsplanes (S. 73) und erfolgt über Weg- und Schaltinformationen oder eine Programmiersprache. Simulationen der Bearbeitung sichern das Ergebnis frühzeitig ab. Je nach eingesetztem CAD-Werkzeug und

Hilfskomponenten ergeben sich mehrere Pfade von den CAD-Daten zum NC-Code nach DIN 66025 (S. 96).

**Beurteilung:** Insbesondere die Planungsansätze von EVERSHIM (1989) und MILBERG (1992) eignen sich bei genauem Hinsehen hauptsächlich für die Teilefertigung. Hier gibt es meist Maschinen mit definierten Leistungsspektren, die bereits im Unternehmen vorhanden sind und für die unterschiedlichsten Aufträge bereitstehen. Für Spezialfälle werden ggf. Sonderwerkzeuge hinzugezogen. Als Eingangsinformation der Programmierung genügt die Geometrieinformation. Die in der Montage zusätzlich benötigte Reihenfolgebeziehung des Zusammenbaus sowie die Bewegungsplanung für die Handhabungsschritte wird explizit nicht unterstützt. Meist werden die Bearbeitungsaufgaben in einer Zelle erfüllt. Eine Verkettung unterschiedlicher Maschinen und deren jeweiliger Steuerung muss der Arbeitsplaner nicht behandeln. Die Planungsmethode ist in allen Darstellungen auf sehr abstraktem Niveau gehalten und nicht in einzelne Handlungsanweisungen heruntergebrochen.

## 3.4 Montageplanung

Die nachfolgend aufgeführten Ansätze für die Montageplanung umfassen im Wesentlichen die Gestaltung sowohl von geometrisch beschreibbaren Montageanlagen als auch den darin stattfindenden Prozessen. Vorgehensweisen und Werkzeuge, die sich fast ausschließlich auf die Planung von Abläufen beschränken, ohne Unterstützung für die Planung der Anlagenhardware anzubieten, sind im darauffolgenden Teilkapitel 3.5 aufgenommen.

### 3.4.1 Kommerzielle Ansätze

#### 3.4.1.1 Werkzeuge zur Planung manueller Arbeitssysteme

In Deutschland sehr weit verbreitet ist die Produktfamilie **ERGOPlan** (MENGES & BAUER 1998), die aus dem Hochschulprototyp **IAOMAS** (Interaktive Oberfläche zur Planung und Gestaltung manueller Arbeitssysteme) (LAY U. A. 1989) entstand. Es können in verschiedenen Modulen die Aufgaben der Produktstrukturierung, Betriebsmittelauswahl und Layoutgenerierung, Arbeitsplangestaltung sowie Zeit- und Kostenanalysen bearbeitet werden. Neben dem Produktionslayout und der Betriebsmittelstückliste werden sogar die Daten für die übergeordnete Produktionssteuerung mittels PPS-System generiert (LAY & MENGES 1989).

Die Montageplanung orientiert sich dabei an der Produktstruktur, die zunächst nach Montagegesichtspunkten zu strukturieren ist. In die Produktstruktur werden zwischen den Komponenten die Montagetätigkeiten eingefügt. Diese definieren die Montageaufgabe, die Werkzeuge, Betriebsmittel und Hilfsmittel sowie die Dauer.

Strategische Entwicklungspartner als Anwender bzw. Auftraggeber neuer Funktionalitäten wie etwa zur Integration von Simulationstools oder dem ERGOPlan Planungsmodul **ERGOPro** für die Produktstrukturierung und Vorranggrafenerstellung, 3D-Visualisierung von Produktkomponenten und Target Cos-

### 3.4 Montageplanung

---

ting (EAI-DELTA 1999) sind die Firmen Braun (z. B. SILBERNAGEL 1998) und Bosch (KILLE 1999, WAGNER 1999).

**Beurteilung:** ERGOPlan hat seinen Schwerpunkt auf die Gestaltung von manuellen Arbeitssystemen gelegt. Aus diesem Grund ist eine dynamische Kinetiksimulation nur für Menschmodelle möglich. Automatisierte Betriebsmittel und deren Bewegungsablauf können nicht betrachtet werden. Durch die gemischte Darstellung von Produktstruktur und Montageablauf wird die Transparenz gemindert. Da die detaillierten Abläufe und Bewegungen in der Anlage mit diesem System nicht beplant werden können, ist für die Entwicklung der Steuerung ein neues Modell in einem anderen Werkzeug unumgänglich.

Als weiteres System wird **TiCon** von der MTM Vereinigung angeboten (MTM 1999). Dieses Werkzeug ermittelt die Vorgabezeiten für manuelle Montageoperationen. Die Reihenfolgestruktur ist als Baum aufgeführt, die restlichen Interaktionen erfolgen über tabellarische Felder.

**Beurteilung:** Aufgrund seines thematischen Fokus ist TiCon ausschließlich für manuelle Plätze ausgelegt. Eine Behandlung automatisierter Stationen liegt außerhalb des Anwendungsfeldes und wird nicht angestrebt.

#### 3.4.1.2 3D-Simulationswerkzeuge

Die 3D-Simulationswerkzeuge **eM-Workplace**<sup>15</sup> und **eM-Human** von Tecnomatix werden im Rahmen der Montageplanung zur Layoutplanung und Offline-Programmierung automatisierter Betriebsmittel sowie für Ergonomieuntersuchungen bei manueller Montage eingesetzt (GEYER 1998, ROßGODERER 1999). Ähnliche Produkte gibt es von einigen weiteren Firmen, wie etwa Deneb mit dem System **IGRIP** und der Erweiterung ERGO oder EAI mit dem Menschmodell **Jack**.

**Beurteilung:** Die großen Defizite der 3D-Simulationssysteme bestehen derzeit darin, dass eine systematische Aufbereitung des Ablaufes nicht möglich ist. Dieser wird implizit über die Bewegungsprogramme der Werker bzw. Maschinen abgebildet.

#### 3.4.2 Forschungsansätze

Die nachfolgend aufgeführten Methodiken zur Montageplanung sind einzelnen Autoren zugeordnet. In einigen Fällen ist es jedoch interessanter, die Evolution der Ansätze innerhalb der Forschungseinrichtungen zu verfolgen, dort erfolgt die Ordnung nach dem jeweiligen Institut.

#### 3.4.2.1 Allgemeine Montageplanungsmethodiken

BULLINGER (1986) veröffentlichte eine allgemeine Montageplanungsmethodik. Diese besteht aus den folgenden sechs Abschnitten:

---

<sup>15</sup> Produktnname bis März 2000: **AnySIM**, **AnyPlan** und **AnyMan** bzw. **ROBCAD**

- Konzeption
- Ablaufplanung
- Montagesystementwurf
- Ausarbeitung
- Realisierung
- Betrieb

Bereits während der Konzeption werden hier Prinziplösungen für das Montagesystem entworfen, für die bereits die Fragen der Dimensionierung, Kapazitätsteilung, Pufferbestimmung, Aufteilung zu Vor- bzw. Endmontage und Aspekte der Mechanisierung zu beantworten sind (S. 67 ff). Für die Ablaufplanung wird erst ein Grobvorranggraf erstellt, dessen Einzelknoten in Form von Teilverrichtungen detaillierbar sind. Hier werden die Montagemittel und Vorgabezeiten ergänzt, sodass der Arbeitsplan unmittelbar erstellt werden kann (S. 104).

Die Integrierte Montageplanung nach SELIGER (1988) startet unter der Voraussetzung, dass das Produkt bereits konstruiert ist und setzt zunächst auf eine produktbezogene Beschreibung des Montageablaufs durch die fünf Standardfunktionen Bearbeiten, Montieren, Fördern, Prüfen und Liegen. Somit steht die Ablauforganisation innerhalb der Montage im Vordergrund. Für jede Funktion muss nun ein geeigneter Funktionsträger (= Betriebsmittel) gefunden werden. „Die montagetechnischen Produktionsanlagen werden um die 3-D-Explosionsdarstellung des neuen Produkts herum konzipiert. Die Abläufe werden zunächst lösungsneutral nach Maßgabe der Stückliste im Vorranggrafen beschrieben [...] (SELIGER 1990, S. 85)“. Das Planungswerkzeug **MOSYS** unterstützt den Vorgang und ermöglicht eine Layoutplanung für die Montagezellen. Dabei geht es im Wesentlichen um die technische Durchführbarkeit der Montageaufgabe bei der gegebenen Betriebsmittelkinematik; ergänzende Kostenanalysen werden angedeutet.

DEUTSCHLÄNDER (1989) stellt eine siebenstufige „Systematik für Montagepläneungen (S. 46 ff)" vor. Diesen Stufen werden insgesamt 78 Arbeitsschritte zugeordnet, die es abzuarbeiten gilt. Speziell für die Montageablaufplanung sieht er eine Vorgehensweise in fünf Teilschritten vor (S. 67):

- Analyse der Kontaktflächen und Fügepartner
- Bestimmung eines Basisteils
- Erarbeitung von Montageteilaufgaben
- Ermittlung der Basisteilorientierung
- Abschätzung der Montagezeit

Der Produktaufbau und die geometrischen Daten entstammen einem CAD-System. Die Ergebnisse sollen bei Rechnerunterstützung in eine Datenbank geschrieben werden. Für die Bearbeitung steht regelbasiertes Wissen im System bereit, das menügestützt von einem Expertensystem abgerufen werden

kann. Die Visualisierung des Montageablaufs stützt sich auf die Symbole der VDI 2860.

**Beurteilung:** BULLINGER (1986) gibt ausführliche Hilfestellungen zur Auswahl und Gestaltung manueller und automatisierter Montagestationen. Die Realisierung und Überführung in den Betrieb sind Bestandteil der Methodik, sodass eine Planungsbewertung und damit Lerneffekte vorgesehen sind. Es wird allerdings nicht auf die Thematik der Steuerungsplanung eingegangen. Ein durchgängiges Werkzeug zur Planungsunterstützung findet keine Erwähnung.

Bei SELIGER wird eine prinzipielle Trennung zwischen den Elementen Produkt, Ablauf und Betriebsmittel getroffen. Das Produkt hat – nach allgemeinen Kriterien ‚montagegerecht‘ konstruiert – eindeutig die dominante Rolle im Planungsablauf inne, alles andere ist darauf abzustimmen. Abschließend fordert er die Weiterentwicklung der Planungswerzeuge für die dynamische Simulation von Montageprozessen, ein Indiz dafür, dass der Beitrag im Jahre 1988 dem Stand der Technik noch weit voraus war. Weil damals die technologischen Möglichkeiten nicht gegeben waren, konnten freilich auch keine Ideen für die Planung der Steuerungssoftware und deren Test an simulierten und später realen Anlagen entwickelt werden.

DEUTSCHLÄNDERS (1989) Planungsansatz sieht den Ablaufplan als eigenständiges Planungsobjekt vor. Der Planungsablauf fußt auf den Daten aus der Produktkonstruktion. Eine Unterstützung der Steuerungsplanung für automatisierte Betriebsmittel wird nicht vorgestellt.

#### 3.4.2.2 Rechnerbasierte Montageplanung

In dieser Kategorie werden Planungsansätze vorgestellt, die stark auf das eingesetzte Planungswerzeug zugeschnitten und daher spezifisch formuliert sind.

TÖNSHOFF U. A. (1992) definieren eine fünfstufige Vorgehensweise zur Montageplanung, die an der Bedienung eines Rechnerwerkzeugs orientiert wird:

- Die Teileliste und Zeichnungen werden analysiert, um die Montageaufgabe beschreiben zu können.
- Die Geometriedaten werden eingegeben und eine automatische Generierung der Fügeposition wird durchgeführt.
- Weitere Technologiedaten wie Fügeart, technische Funktion, Fügerichtung und evtl. Unterbaugruppen werden eingegeben. Daraus wird eine komplette Beschreibung generiert in der Form Teil – Unterbaugruppe – Operation.
- Die Montagereihenfolge wird nach drei Kriterienblöcken festgelegt. Der erste Block sind die Montagetechnologien, die nach aufgabenspezifischen, objektbezogenen und organisatorischen Regeln festgelegt werden.
- Das Fügeverfahren wird gemäß einer Prioritätenliste ausgewählt.

Der Zellenaufbau geschieht unter dem Gesichtspunkt des minimalen Wegs für den Roboter. Die Roboterbewegungen werden mit VDI 2860-Symbolen und zusammengesetzten Sequenzen beschrieben. Zusätzlich erfolgt die Eingabe von Parametern wie Positionen, Geschwindigkeit, Kraft, Prozesszeit, Klebe- spur etc. Hieraus soll sich ein Roboterprogramm ableiten lassen. PARK (1992) modifiziert in seiner Dissertation das Vorgehen für sein Konzept zur rechnerbasierten Montageplanung, innerhalb der das Roboterprogramm automatisch erstellt werden soll. Ausgehend von der Montagevorgangsfolge werden die Betriebsmittel ausgewählt und optimal platziert, daraus sollen sich die Verfahrzeit und schließlich das Roboterprogramm ermitteln lassen. Die Details seiner Systemimplementierung bleiben jedoch unerwähnt.

GREWAL U. A. (1995) entwickelten das Montageplanungs-Tool **Assembly Planning** für UNIX-Rechner. Der Montageprozess besteht in diesem Ansatz zahlenmäßig aus mehr Einzelaufgaben, als Einzelteile im Endprodukt stecken, da sog. „transiente“ Aufgaben als Zwischenoperationen neben den eigentlichen Fügevorgängen zur Erreichung der Qualität etc. notwendig sind. Den „Backbone“ der Montageplanung bilden die Einzelaufgaben (Tasks), deren grafische Darstellung mit Icons für Produkttyp und Prozessschritt erfolgt. In dem Werkzeug werden die Teile interaktiv mittels Icons klassifiziert.

Die Vorgehensweise der Montageplanung erfolgt in drei Schritten: Aus dem Produkt werden die notwendigen Montageaufgaben ermittelt und dann in einem Montageablauf angeordnet. Zuletzt geschieht die Zuweisung der Betriebsmittel. Zeitwerte für die Bearbeitungsdauern können gemäß MTM hinterlegt werden. Eine Funktion für die Austaktung der geplanten Anlage ist vorgesehen.

Am wbk Karlsruhe wurde im Rahmen der Systeme **KNOSPE** (Knowledge-based System Plannig Environment) (GANGHOFF 1993) und dem darauf aufgesetzten **KOMPASS-2** (Konstruktions- und Montageplanungssystem) (BERNHART 1993) ebenfalls an einer Unterstützung für den Montageplaner gearbeitet.

KNOSPE erhebt den Anspruch, ein allgemeines Planungssystem für produktionstechnische Aufgabenstellungen (GANGHOFF 1993, S. 59; GANGHOFF U. A. 1996, S. 39) zu sein. In der konkreten Ausprägung ist es aber sehr stark auf die Fragestellungen der Montage ausgerichtet worden. Das System soll generisches Basiswissen bereitstellen, das durch Wissen aus der spezifischen Anwendungsdomäne erweitert werden kann. Ferner soll KNOSPE eine integrierte Problembearbeitung ermöglichen. Darunter wird die kombinierte Aktionsplanung und Konfigurierung verstanden. Der Planungsprozess soll effizient ablaufen und flexibel abgearbeitet werden, sogar der Grad der Systemunterstützung soll anpassbar sein. Der Benutzer soll jederzeit mit dem System interagieren können und den Planungsablauf unter Kontrolle behalten (GANGHOFF 1993, S. 59 - 61). Ein objektorientiertes Datenmodell bildet die informationstechnische Grundlage von KNOSPE. Dieses Konzept entstammt im Kern dem Vorgängersystem SYLLOGIST (SCHMIDT & GANGHOFF 1991).

Das System KOMPASS-2 adressiert im Bereich der Produktentwicklung in erster Linie die automatische Überprüfbarkeit der Montierbarkeit des Produktes, die Auswahl und Parametrisierung der Verbindungstechnologie, die Vari-

### 3.4 Montageplanung

---

antendarstellung sowie die Ermittlung variantenverursachter Kosten (BERNHART 1993, S. 115f). Im Anwendungsfeld der Montageplanung sollen

- aus Produktgeometrie und Verbindungstechnik die Vorgangsbeschreibungen abgeleitet und die hierfür prinzipiell einsetzbaren Betriebsmittel ausgewählt werden.
- sich die zeitlichen Relationen aus den Produktdaten ableiten.
- die Zeitanteile durch statistische und simulative Verfahren ermittelt werden.
- sich die notwendigen Planungsaufgaben für neue Varianten ermitteln und durch Vorschläge unterstützen lassen.

Das Vorgängermodell KOMPASS (FRIEDMANN 1989) sieht als zentralen Bestandteil die Analyse der gesamten Produktinformation zu Planungsbeginn zur Ermittlung der Montagereihenfolge. Daraus wird der Vorranggraf abgeleitet, welcher um weitere Operationen ergänzt werden kann.

**Beurteilung:** TÖNSHOFF U. A. (1992) sowie PARK (1992) geben leider keine Details, wie diese Umsetzung erfolgt, ebenso keine Information über die Kommunikationsform. Der Ansatz ist auf eine Robotersteuerung beschränkt. Andere Komponenten (wie z.B. SPS) können offensichtlich nicht angesteuert werden. Da alle Grafiken in der Arbeit von PARK den Arbeitsraum eines SCARA-Roboters in Draufsicht zeigen, ist davon auszugehen, dass kein 3D-Simulationsprogramm zu diesem System gehört.

Im System von GREWAL U. A. (1995) ist weder eine datentechnische Kopplung zu einem CAD-System zur Übernahme von Produktinformationen (Struktur, Geometrie) noch eine Anbindung einer 3D-Simulation für die Bewegungsplanung und Betriebsmittelanordnung vorhanden. Ansätze für die Übernahme der Vorgangsbeschreibung zur Steuerung der geplanten Anlage gibt es nicht. „Assembly Planning“ ist auf die abstrakte Ablaufdarstellung mittels Icons beschränkt und stellt eine Insellslösung dar.

KNOSPE allein ist ein sehr formal-wissenschaftlich aufgebautes Werkzeug, das erst in Kombination mit KOMPASS-2 zu einem für die Montageplanung einsetzbaren System wird.

KOMPASS-2 ist für die Anfangsphase der Montageplanung und für die Ermittlung der besten prinzipiellen Systemkonfiguration sehr gut geeignet. Insbesondere durch die Behandlung der Varianten und das aufwendige Kostenmodell ist es für diesen Anwendungsfall ein leistungsfähiges Werkzeug. Allerdings erscheint die Handhabung des Systems etwas kompliziert. Dies liegt an der Notwendigkeit der expliziten Dateneingabe für alle Planungsobjekte (gelöst über zahlreiche Dialogboxen zur Attributeingabe), die vom zugrundeliegenden System KNOSPE gefordert wird. Nur dann können die Algorithmen dieses Werkzeuges greifen. Die Detailplanung von Montagebewegungen, Simulation von Werker oder automatisiertem Betriebsmittel wird allerdings nicht explizit unterstützt. Ebenso fehlen Anknüpfungspunkte für die Anlagensteuerung.

### 3.4.2.3 Planung manueller Montageanlagen

In Karlsruhe wird am ifab seit Anfang der 90er Jahre an einer Planungskette für die Montageplanung gearbeitet (ZÜLCH & WALDHIER 1992, ZÜLCH U. A. 1998). Dabei werden sechs Planungsphasen in Anlehnung an das REFA-Modell (s. Kapitel 3.3.3) und offensichtlich auch BULLINGER (s. Kapitel 3.4.2.1) definiert.

Die logische Verkettung beginnt mit der Unterstützung der montagegerechten Erzeugniskonstruktion (System **SIMONA** für Konstruktion und Zusammenbau), und der organisatorischen Gestaltung (System **RAMONA** für die Arbeitsplatzteilung, Leistungsabstimmung und statische Bewertung). Es schließt sich die Optimierung der Systemstrukturen im System **DEMONA**, d.h. Ablauf-Simulation, dynamische Bewertung, Gestaltungshinweise und Optimierungsstrategien, an. Dieser folgt die Arbeitsplatzgestaltung manueller Arbeitssysteme im RechnerTool **EMMA** mit regelbasierter Auswahl der Arbeitsmittel sowie einer wirtschaftlichen und personalbezogenen Bewertung. Am Schluss der Planung steht die Präsentation der Planungsergebnisse (Werkzeug **CARLA** zur 3D-Darstellung der Planungsergebnisse, Generieren vermaßter Zeichnungen und Stücklisten).

Bei der dynamischen Planung und Bewertung mit DEMONA dienen als Gestaltungsparameter die Grobstruktur, die Montagekapazität, die Arbeitsteilung und die Leistungsabstimmung. Bewertet wird anhand der Kenngrößen Auslastung, Ausbringung, Durchlaufzeit, Termintreue und Auftragsbestand. Das Planungstool DEMONA besteht aus den drei Modulen zur Planung und einem Simulator. Als Simulator werden ein eigenes Tool (FEMOS) sowie alternativ das kommerzielle Tool WITNESS eingesetzt. Die Bewertung und Ableitung von Gestaltungshinweisen erfolgt regelbasiert.

**Beurteilung:** Generell liegt der Fokus der Planungskette auf manuellen Montagesystemen. Es ist kein Ansatz zur Planungsunterstützung für automatisierte Planungssysteme oder gar die Steuerungsplanung vorhanden.

### 3.4.2.4 Montageplanung bei Simultaneous Engineering

SCHUSTER (1992) brachte die Montageplanung konsequent in die Gedankenwelt des Simultaneous Engineering ein. Seine Planungsmethode besteht aus den drei großen Blöcken der vorläufigen Montageprozessplanung sowie einer groben und feinen Montageprozess- und -systemplanung (S. 48 ff). Diese drei Planungsabschnitte sind zeitlich jeweils nach den Konstruktionsphasen Konzept, Entwurf bzw. Detaillierung angeordnet (s. Abbildung 13).

Die Prozessplanung ermittelt dabei die Einzeltätigkeiten und mögliche Montagereihenfolge, gleichzeitig sollen aber auch schon Primärkomponenten<sup>16</sup> berücksichtigt werden. Abschließend erfolgt die Ablaufplanung in einer Ablaufstruktur und in der 3D-Simulation.

---

<sup>16</sup> **Primärkomponenten** definiert SCHUSTER (1992, S. 33) als direkt mit dem Produkt in Kontakt befindliche Betriebsmittel wie beispielsweise Greifer oder Werkstückträger.

### 3.4 Montageplanung

Für die Systemplanung werden die Abläufe auf mögliche Systemstrukturen „projiziert“, Sekundärkomponenten<sup>17</sup> ausgewählt und die Layoutplanung durchgeführt. Ferner findet hier eine „Analyse der nun auf konkrete Systeme bezogenen Abläufe“ statt (S. 49).

Sowohl die Montageprozessplanung als auch die Montagesystemplanung wird durch das Rechnerwerkzeug **COSEM** (Computergestützte Strukturierte Entwicklung von Montagesystemen) unterstützt. Dieses verfügt über eine Schnittstelle zum 3D-Simulationssystem USIS für die Layoutgestaltung, Bewegungssimulation und Offline-Programmierung (S. 58ff). Zudem gibt es ein Analysemodul für die Bewertung von anfallenden Zeiten und Kosten in der Montage. COSEM benutzt die relationale Datenbank INGRES.

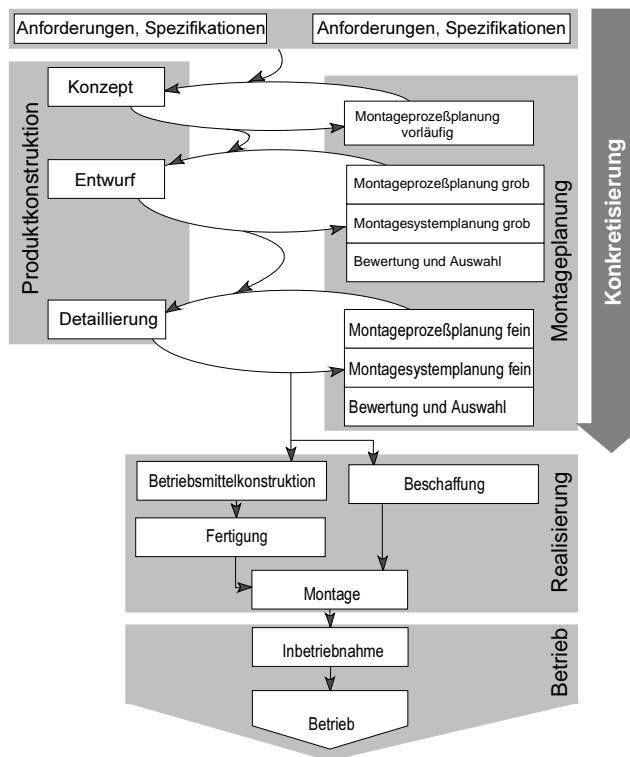


Abbildung 13: Richtlinie zur integrierten Entwicklung von Produkt und Montage (SCHUSTER 1992, S. 48)

<sup>17</sup> **Sekundärkomponenten** definiert SCHUSTER (1992, S. 33) als alle nicht direkt mit dem Produkt in Berührung kommenden Betriebsmittel.

RAMPERSAD (1995 A und 1995 B) beschreibt eine Vorgehensweise, die eine gleichzeitige Gestaltung von Produkt, Prozess und robotergestütztem Montagesystem fordert. Diese drei Kategorien nennt er Variablen des Integralen Montagemodells (s. Abbildung 14).

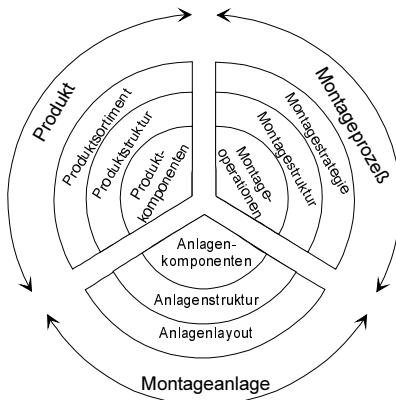


Abbildung 14: Das Integrale Montagemodell (RAMPERSAD 1995 A)

Dabei zerlegt er jede Variable in drei Elemente, die er auf jeweils unterschiedlichem Abstraktionsniveau ansetzt: Auf der obersten Ebene der Kategorie Produkt steht das Sortiment (Produkt und Varianten), danach die Produktstruktur und auf der untersten Ebene die Produktkomponenten. Analog gibt es bei der Montageanlage das Anlagenlayout, die Anlagenstruktur (Anlagenkomponenten, die wechselseitig in Beziehung zueinander stehen) und die Anlagenkomponenten, die als Subsysteme die Montagefunktionen erfüllen. Für den Montageprozess definiert er die Montagestrategie (Anlagenkonzept, Austaktung), die Montagestruktur (Reihenfolge der Montageoperationen) und die Montageoperationen (Zuführen, Handhaben, Fügen, etc.). Die Beziehungen zu den Elementen der anderen Variablen finden in jeder Kombination statt, die stärksten Verbindungen jedoch stets auf der gleichen Abstraktionsstufe (z.B. Produktstruktur – Montagestruktur – Anlagenstruktur).

Die vorgeschlagene Planungsweise soll nun die einzelnen Modellvariablen definieren. Dafür sieht er einen „konzentrischen Entwurfsablauf“ (RAMPERSAD 1995 A, S. 22) vor, der nach dem Ergebnis der vorgeschalteten Marktorschung bei der Definition der Montageanlage startet. Alle Segmente der obigen Abbildung 14 werden zunächst auf gleichem Abstraktionslevel durchlaufen, somit ergibt sich das Bild einer nach innen laufenden Spirale. Das Vorgehensmodell ist für die „Entwicklung einer neuen Montageanlage, basierend auf einer existenten Produktidee (RAMPERSAD 1995 A, S. 24)“ aufgebaut.

Für das Produkt sieht RAMPERSAD sieben Planungsschritte vor, die er auf dem Schnittpunkt der Spirale mit der Achse des Produktes vermerkt hat. Analog gibt es für den Montageprozess ebenfalls sieben Schritte. Bei der Montageanlage sind 15 Punkte abzuarbeiten. Die meisten davon erfolgen nach Abschluss

### 3.4 Montageplanung

---

der Produkt- und Prozessdefinition; dadurch weicht der Graf im Zentrum stark von einer Spirale ab.

Als Rechnerunterstützung formuliert RAMPERSAD (1995 B) lediglich eine Ablaufsimulation der Montageanlage mit einem Modell aus colorierten Petri-Netzen. Ein Werkzeug zur Unterstützung des gesamten Montageprozesses ist nicht erwähnt.

FELDMANN (1996) entwickelte als Grundlage für die vorliegende Arbeit eine auf die Konstruktion abgestimmte Montageplanungsmethodik, die ihrerseits als „direkte Fortführung (S. 49)“ der Arbeit von SCHUSTER (1992) zu sehen ist. Das Ergebnis ist ein Baukasten für die Montageplanung mit Planungsaufgaben als Bausteinen, die methodisch unterstützt zur Erstellung von projektbezogenen Vorgehensplänen verwendet werden können (S. 59). Die einzelnen Planungsaufgaben sind untereinander vernetzt. Die Konstruktionsergebnisse, auf die der Planer zu Beginn einer Planungsaufgabe angewiesen ist, sind mit dem Ziel, die Abstimmung zwischen Konstruktion und Montageplanung zu verbessern, spezifiziert worden.

Neben den allgemeinen Projektrahmendaten bilden die folgenden Arbeitsergebnisse des Konstrukteurs die Meilensteine für den Ablauf der Montageplanung (REINHART & FELDMANN 1995 B):

- Produktstruktur
- Erste Geometrie eines Einzelteils
- Erste Baugruppen
- Abgeschlossene Konstruktion mit kompletten Produktdaten.

Diese Zwischenergebnisse sind Eingangsgrößen für FELDMANNS **Fünf-Schichten-Methode** der Montageplanung (1996, S. 59 – 90). Die Arbeitspakete einer Schicht bauen auf diesen Konstruktionsergebnissen und den bereits innerhalb der Montageplanung erzeugten Daten auf.

Die Schichten sind dadurch charakterisiert, dass sie sich bis zum Ende des Montageplanungsprozesses durchziehen. Dadurch wird angedeutet, dass der Montageplaner immer in mehreren Schichten gleichzeitig arbeiten kann, wenn beispielsweise für Teilbereiche des Produkts schon erheblich detailliertere Informationen vorliegen. Es sind auch Rücksprünge zu früher bearbeiteten Aufgaben möglich, die dann schichtenübergreifend erfolgen.

Abbildung 15 zeigt eine vereinfachte Darstellung der erarbeiteten Methodik. Auf der linken Seite ist die Konstruktion mit den Zwischenergebnissen (Produktstruktur, Einzelgeometrie, Zusammenbauzeichnungen, vollständige Produktdaten) des Konstruktionsprozesses dargestellt, ebenso sind auch Rückmeldungen an die Konstruktion vorgesehen.

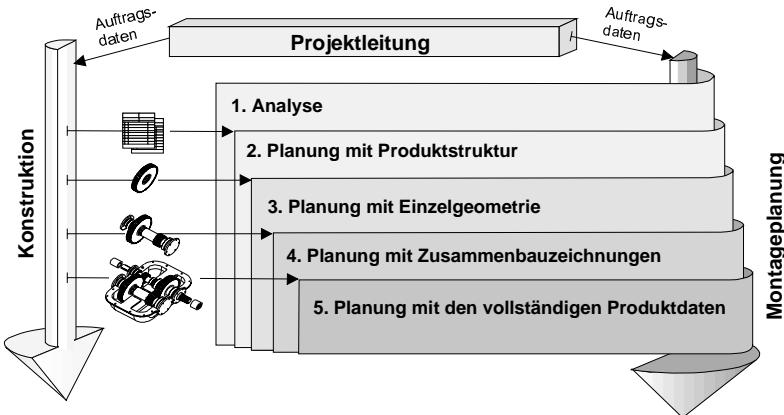


Abbildung 15: Die Fünf-Schichten-Methode der Montageplanung  
(FELDMANN 1996, S. 75)

Als Werkzeug für den Planer stellt FELDMANN (1996, S. 113 – 118) das System **CosMonAut** (Computersystem zur **Montage-Automatisierung**) vor. Dieses versteht sich als Integrationskern in einem Rechnersystemverbund, dem auch das CAD-System Pro/Engineer, das 3D-Simulationssystem USIS (bzw. AnySIM) [CUIPER U. A. 1996] und das Betriebsmittelkonfigurationstool Konfimo angehören. CosMonAut ist objektorientiert aufgebaut (REINHART & FELDMANN 1995 A) und verwendet die objektorientierte Datenbank ONTOS.

Bei FELDMANN werden **objektbezogene Petri-Netze** als Sonderform der Stellen-Transitionsnetze (s. Kapitel 3.1.1.4) für die Beschreibung von Montageprozessen eingeführt<sup>18</sup> (1994 u. 1996, S. 98 – 109).

Diese Netze bestehen aus Stellen für die Repräsentation der diversen Zustände eines Objektes, in denen Aktionen (Bewegung, Warten,...) ausgeführt werden. Diese sind somit zeitbehaftet. Ferner gibt es Transitionen, die den Wechsel zur nächsten Stelle (=Aktion) überwachen. Dazwischen regeln Verbindungen (Kanten) die Reihenfolgebeziehung. Jedem Objekt des Montageprozesses, Betriebsmitteln wie Werkstücken, ist zunächst ein separates derartiges Netz zugewiesen, das sich isoliert aufbauen und betrachten lässt. Sind an einem Montageschritt ein Betriebsmittel und ein Werkstück gemeinsam beteiligt, werden die beiden Netze dort entsprechend verknüpft, um eine Synchronisation der Abläufe zu erzielen.

**Beurteilung:** SCHUSTER (1992) definiert die Montageplanung auf sehr abstraktem Niveau, lediglich in grobe Phasen unterteilt. Diese liegen im Entwicklungsfluss stets nach den Entwicklungsschritten der Produktkonstruktion. Für ihn gilt stets die Reihenfolge „Produkt -> Montageprozeß -> Montagesystem (S. 47)“. Die Prozessplanung wird als eigenständiger Planungsschritt eingeführt, aller-

<sup>18</sup> Diese Beschreibungstechnik wird auch in dieser Arbeit weiterverwendet, s. Kapitel 4.1.2.4.

dings erfolgt durch die Ausdehnung auf die Gestaltung der primären Betriebsmittel hier eine Überfrachtung des Begriffes zu Lasten der Montagesystemplanung. Bei der Beschreibung der Planungsunterstützung wird der genaue Funktionsumfang von COSEM nicht deutlich, insbesondere was den Unterschied von Konzeption und Umsetzung betrifft. Es gibt keine expliziten Hinweise, dass die in der Simulation offline erstellten Programme vom COSEM Prozessplanungsmodul verwaltet werden könnten.

RAMPERSAD (1995 A und 1995 B) stellt das Produkt, den Montageprozess und die Montageanlage als gleichwertige Planungsgrößen dar. Allerdings geht sein Ansatz von einem vorgegebenen Produkt aus, sodass die Aktivitäten, die das Produkt betreffen, fast ausnahmslos Analyseschritte sind. Eine Umkehrung der Laufrichtung der Spirale, wie es bei der Gestaltung eines Produktes, das auf einer existenten oder vorgegebenen Montageanlage zu produzieren ist, der Fall wäre, sieht er nicht vor. Die Rechnerunterstützung scheint auf die Ablaufsimulation der Anlage beschränkt zu sein. Die Punkte Realisierung und Operationalisierung der Montageanlage finden keine weitere Beachtung.

FELDMANN versteht die Montageplanung als Gegenpart zur Produktkonstruktion in einem Produktentwicklungsteam. Er trennt die anfallenden Arbeiten dann auf, ob sie sich mit dem Produkt oder der Montageanlage befassen (S. 11). Der Montagevorgang taucht in dem Modell nicht als eigenständiges Planungsobjekt auf. Prinzipiell werden in der Vorgehensweise auch Andeutungen gemacht, dass sie nicht nur für Neu-, sondern auch für Umplanungen einsetzbar sei. Die Einteilung der Schichten ist jedoch sehr stark von den Entwicklungsschritten der Produktkonstruktion abhängig. Der Planungsansatz endet beim rechnerinternen Modell des Produktes bzw. der Montageanlage. Die Realisierung und Inbetriebnahme bleibt ausdrücklich ausgeklammert (S. 11). FELDMANN deutet zwar an, die objektbezogenen Petri-Netze seien für eine Anlagensteuerung einsetzbar zu machen (1996, S. 131ff). Einschränkend weist er dann jedoch darauf hin, dass dies eine notwendige Weiterentwicklung darstellen würde (S. 136). Das Bestreben der vorliegenden Arbeit besteht darin, eben diesen Gedankengang auszubauen und umzusetzen (s. Kapitel 2.4).

#### 3.4.2.5 Montageplanung und Scheduling

VAN BRUSSEL (1990) betrachtet Planung und Scheduling im Produktionsumfeld. Dabei führt er die Kategorien Produktionsplanung und Produktionssteuerung ein, die zeitlich hintereinander ablaufen. Die Produktionsplanung teilt er weiter in Prozessplanung und Produktions-Scheduling ein; unter der Produktionssteuerung subsumiert er Prozess-Scheduling und Echtzeit-Kontrolle (s. Abbildung 16).

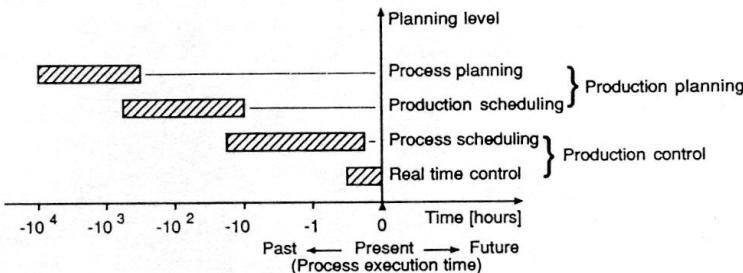


Abbildung 16: Zeitliche Einteilung (VAN BRUSSEL 1990, S. 637)

In einer sehr breit angelegten Betrachtung des Standes der Technik gibt er einen guten Überblick über die Arbeiten der späten 80er Jahre, darunter auch die der deutschen Forschergruppen von Bley, Eversheim, Spur, Seliger, Warnecke, Weule und Wiendahl. Er selbst schlägt „in Anlehnung an Warnecke und Wiendahl (S. 638)“ einen hierarchischen, zweistufigen Planungsablauf vor:

Die abstrakte Ebene ist die **Großplanung**, in der zunächst technologische, organisatorische, wirtschaftliche und personelle Kriterien gesammelt werden, die von der Montageanlage zu erfüllen sind. Das Montageproblem wird analysiert, die Montagereihenfolge ermittelt und ein Blocklayout aufgebaut.

Die zweite Ebene bildet die **Feinplanung**, in der die einzelnen Montagestationen detailliert werden. Die einzelnen Subsysteme werden optimiert und im nächsten Schritt in das Gesamtsystem mit dem Ziel der maximalen Gesamteffizienz integriert. Der letzte Schritt ist die Realisierung.

Das Vorgehen wird vom System **ASSEMBLY** unterstützt, welches in fünf Phasen den Planer begleiten soll (S. 638). Diese Phasen sind: ökonomische Be- trachtung von Montageprinzipien, technische Analyse des Produktes (basierend auf Zeit- und Bewegungsstudien, um dann Zeiten und Kosten abzuschätzen), Aufgabenverteilung und Abtaktung, Betriebsmittelauswahl und schließlich grafische Layoutbetrachtung (2D).

Für das Scheduling und die Echtzeit-Steuerung stellt VAN BRUSSEL die kombinierten Rechnersysteme **SESFAC** und **FACCS** vor. Als Steuerungskonzept verwendet er einen Zellenrechner, der mittels Treibern für die einzelnen Zellenkomponenten kommuniziert, die ihrerseits erst die gerätespezifische Umsetzung durchführen.

**Beurteilung:** Die vorgestellten Ideen entstanden in der klassischen CIM-Zeit, als die verfügbaren Rechnerleistungen eine rasche Umsetzung nicht ermöglichten. Die Durchgängigkeit von der Planung zum Betrieb scheint hier nicht gegeben. Insbesondere wird keine Verbindung der Systeme ASSEMBLY und FACCS explizit dargestellt. Es bleibt unklar, inwieweit FACCS das vorgestellte Steuerungskonzept bereits unterstützt oder ob es sich um getrennte Entwicklungen handelt. Die Steuerung ist nur mit realen Betriebsmitteln verknüpft, eine Verifikation in der Simulation ist nicht erkennbar.

### 3.4.2.6 Virtual Reality / 3D-Simulationssysteme

Die 3D-Simulationssysteme sind weitgehend nicht mehr Gegenstand derzeitiger Forschungsarbeiten, sondern bereits als Produkte am Markt etabliert (s. Kapitel 3.4.1.2). Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten streben nach einer Erhöhung des Bedienerkomforts durch den Einsatz von Virtual-Reality-Geräten zur Ein- und Ausgabe (HEGER 1996, FLAIG & THRAINSSON 1996, REINHART & ROßGODERER 1998).

## 3.5 Prozessplanung

Der Begriff **Prozessplanung** umfasst im Rahmen der Montageplanung zwei unterschiedliche Anwendungsfälle: Zunächst gilt es, den Ablauf des Entwicklungsprozesses bzw. der Montageplanung zu planen. Hier kommen die Methoden aus dem Umfeld der Geschäftsprozesse und des Projektmanagements zum Einsatz. Arbeitspakte werden geschnürt und Bearbeiter festgelegt. Läuft nun die Entwicklung gemäß der Planung ab, wird im Rahmen der Arbeitsplanung ebenfalls ein Modell eines Prozesses erstellt: das Modell des Produktionsprozesses. Hier erfolgt in analoger Weise die Definition der Bearbeitungsaufgaben für Werkstücke und die Zuweisung entsprechender Ressourcen. Die Produktionsprozesse betreffen die Teilefertigung ebenso wie die Montage. Im Weiteren werden Ansätze untersucht, die Modelle für die Montageprozessplanung bereitstellen.

### 3.5.1 Kommerzielle Ansätze der Montageprozessplanung

Unter dem Namen **eM-Planner**<sup>19</sup> wird derzeit ein Tool zur Fertigungsplanung entwickelt. TECNOMATIX (1999a) beschreibt die grundsätzliche Datenstruktur aus der Verknüpfung der drei Basisobjekte ‚Operation‘ (operation), ‚Teil‘ (part) und ‚Betriebsmittel‘ (resource). Es ist möglich, alle Basisobjekte ihrerseits hierarchisch zu Bäumen anzugeordnen. Dadurch lassen sich bei den Operationen die nötigen Vorgänge für das gesamte Produkt oder aber nur einer Unterbaugruppe untersuchen. Die Bauteile können in verschiedenen Baumstrukturen angeordnet werden, um einerseits die Konstruktionsstruktur und andererseits die Montagestruktur abzubilden. Durch die Hierarchisierung von Betriebsmitteln ist eine logische Zusammenfassung zu Zellen, Linien etc. realisierbar.

Die Funktionalität umfasst neben dem Navigieren durch die Strukturen ein Variantenmanagement sowie einen 2D-Layout-Editor und einen 3D-Viewer zur Ansicht der Geometrien. Zudem soll Process Planner Fertigungs-Features unterstützen, indem beispielsweise Schweißpunkte und Schraubverbindungen als explizite Objekte verwaltet und ebenso mit Operationen und Betriebsmitteln verknüpft werden können. Schnittstellen zu den 3D- und Ablaufsimulationsprodukten ROBCAD und Simple++ sind zu erwarten.

---

<sup>19</sup> Produktnname bis März 2000: Process Planner

Das System **RAPP** der Firma Deneb befand sich zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit<sup>20</sup> erst in der Entwicklung. Veröffentlichte Beschreibungen waren nicht erhältlich. Eine persönliche Nachfrage bei der deutschen Vertriebsniederlassung ergab, dass dieses System ungefähr den Funktionsumfang des Process Planners erhalten soll.

**Beurteilung:** Prinzipiell bleibt festzuhalten, dass diese Ansätze danach streben, im Wesentlichen den von FELDMANN (1996) beschriebenen Stand von CosMonAut (s. Kapitel 3.4.2.4) als kommerzielles System auf dem Markt zu platzieren. Beim Process Planner wurde für den Praxiseinsatz zusätzlich die Möglichkeit aufgenommen, Varianten eines Produktes und Planungsversionen zu behandeln. Bestrebungen hinsichtlich einer durchgängigen Planungsunterstützung bis hin zur Steuerung von realen Anlagen sind derzeit noch nicht erkennbar.

### **3.5.2 Forschungsansätze**

#### **3.5.2.1 Allgemeine Ansätze zur Ermittlung der Montagereihenfolge**

Zahlreiche Forscher befassen sich abstrakt mit der Ermittlung von Montagereihenfolgen. Diese Tätigkeit beansprucht laut einer Umfrage von AMMER (1982) über 25% der Zeit einer klassischen Montageplanung. Meist ist die Ermittlung der Ablaufstruktur aber lediglich ein Anwendungsbeispiel von automatisch ablaufenden, mathematisch orientierten Verfahren der Grafentheorie (z.B. MURAYAMA U. A. 1998, PETIT U. A. 1996, ZHAO & MASOOD 1999). Andere Verfahren versuchen, durch automatisches (kollisionsfreies) rekursives Zerlegen der Zusammenbauzeichnung im CAD-System und Auswerten der ggf. zusätzlich als Feature hinterlegten Informationen, Aufschlüsse über die optimale Prozessreihenfolge zu gewinnen (WEULE & FRIEDMANN 1987, FROMMHERZ & HORNBERGER 1988, BALDWIN U. A. 1991, HOMEM DE MELLO & SANDERSON 1991, KANAI U. A. 1996, CHO U. A. 1998, OU-YANG & CHANG 1999). Oftmals werden solche Systeme mit regelbasiertem Wissen ausgestattet, sodass weitere Kriterien für die Reihenfolgeermittlung herangezogen werden können. DÜRR & KOHL (1998) sehen in ihrem System sowohl Automatismen als auch Interaktionen des Anwenders vor. Sie befassen sich weniger mit der Planung des Montagesystems, sondern nutzen die Reihenfolgeinformation für die Montagesteuerung über ein PPS-System.

**Beurteilung:** Viele Ansätze zur Reihenfolgebestimmung in der Montage basieren auf mathematischen Algorithmen und sind bezüglich ihrer Praxistauglichkeit eher skeptisch zu betrachten. Die vorgestellten Ansätze hören fast ausnahmslos mit der Reihenfolgedarstellung als Endergebnis auf. Die eigentliche Planung der Montagevorgangsbeschreibung wird nicht mehr betrachtet.

---

<sup>20</sup> Stand: Ende 1999

#### 3.5.2.2 Rechnerbasierte Prozessplanung

THALER (1993) hat ein regelbasiertes Verfahren zur Montageablaufplanung in der Serienfertigung entwickelt, mit dem formalisierte Planungsentscheidungen zur Festlegung von Montageverfahren, -funktionen und -mittel abgerufen werden können. Das rechnerunterstützte Verfahren **MOGRAPH** (**M**ontageablaufplanung mit **g**raphenorientierten **O**ntscheidungslogiken) wurde als Baustein in das Planungssystem **IDAP** (**I**ntegrated **D**esign and **A**ssembly **P**lanning) (RICHTER 1992) integriert (THALER 1993, S. 71). IDAP unterstützt die Konstruktions schritte Produktidee, Grobentwurf, Feinentwurf und Ausarbeitung; auf der Seite der Montageplanung sind es die Arbeitsschritte Stücklistenumformung, Vorranggrafenerstellung, Feinablaufplanung, Leistungsabstimmung und Montagesystemplanung. MOGRAPH wird für die Planungsphase Feinablaufplanung eingesetzt. Es beinhaltet hierfür eine Vielzahl von Vorschriften, firmenspezifischer Richtlinien und Verfahrens- bzw. Betriebsmittelkatalogen in Form von Regeln. MOGRAPH eignet sich für die Neu-, Wiederhol- und Ähnlichkeitsplanung von Montageanlagen (THALER 1993, S. 76).

Für die Planung präsentiert THALER (1993) ein Verfahren mit Entscheidungs logik für die Montageprozessplanung. Dabei sind in modularen, produktneutra len Standard-Ablauffolgen Abläufe mehrerer Montageaufgaben zusammen gefasst, die gleiche, ähnliche oder varian tenabhängige Arbeitsgänge oder Teill verrichtungen erfordern. Mittels Entscheidungsregeln wird in der Planung dann festgelegt, welche Auswahl von Montageverfahren, -funktionen und -mittel im Arbeitsgang getroffen werden und welche Montagereihenfolge zu berücksichtigen ist. Bei der Anwendung von MOGRAPH geschieht ein Abgleich der produktneutralen Planungsmakros mit dem produkt spezifischen Vorranggrafen der Montageaufgabe. Durch Auswertung der Entscheidungsregeln wird hieraus ein Montageablaufplan erzeugt (S. 41 ff). Ein Vergleich der spezifischen Eingangs informa tionen mit denen der Planungsmakros und die Erstellung einer Basisablauf struktur als Vorranggraf schließen sich an. Der Planer konkretisiert im Weiteren die einzelnen Basispunkte näher, indem er vorgeschlagene Alternativen aus wählt. Das Planungsergebnis ist ein Montage ablaufplan mit festgelegten Montagearbeitsvorgängen, -reihenfolgen, Vorgabe zeiten und Betriebsmitteln.

Eine von THALER durch geführte System bewertung mit 71 Beispiel planungen zeigte, dass 21% der Planungsvorschläge zu speziell, 4% zu allgemein und 13% unvollständig waren. Lediglich in 62% der Testfälle waren die Regeln richtig (S. 93). Für eine Weiterentwicklung schlägt er vor, den Betrachtungs raum zu erweitern und die Montage stationsplanung oder gar die Montage steuerung durch Simulationssysteme zu integrieren (S. 105).

In einem ersten Schritt bestimmt das PC-basierte, dialogorientierte Montage planungssystem **CAPAS** (SIMON 1994, SCHARF & SIMON 1994) aus der Konstruktionsstückliste und der Funktionenstruktur die Montage struktur. Hierzu sind Baugruppen zu definieren, neu abzgrenzen und Bauteile anders anzu ordnen. Das Verbindungsstruktogramm dient dabei als grafische Übersicht für den Planer. Diese spezielle Darstellungsform zeigt die Verbindungsrelationen von einzelnen Funktionsbauteilen und reinen Verbindungselementen. Es ist damit z.B. sehr leicht erkennbar, ob Mehrfachfügestellen vorliegen, die sehr schwer zu automatisieren wären. Ebenso wird das Abgrenzen von Baugrup

pen vereinfacht. Zur Erstellung des Verbindungsstruktogramms ist es erforderlich, Verbindungsrelationen durch Angabe von Basisteil, Funktionsteil, Verbindungselement und Verbindungsart in das System einzugeben.

Mit dem Montagestrukturplan, der Montagestückliste und mit Hilfe einer Zusammenbauzeichnung legt der Planer die Montagevorgänge fest. Auf Basis dieser Informationen werden die Montageaufgaben je Baugruppe / Produkt gegliedert und anschließend in Montageanweisungen überführt. Logische und zeitliche Abhängigkeiten sind vom Planer mit anzugeben. Dies erfolgt durch Eingabe der nacheinander folgenden Montageoperationen als frei formulierbarer kurzer Text (z.B. 'Schalter an Haube befestigen'). Somit sind auch sekundäre Operationen wie Reinigen, Justieren oder Überprüfen erfassbar. Zu den Montageoperationen muss der Planer die Ausführungszeiten angeben, die durch Schätzen, Vergleichen, Versuchsreihen oder aus Datenbanken zu ermitteln sind. Die Frage nach der Automatisierung von Montagevorgängen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten wird mit Hilfe einer Näherungsbeziehung bereits hier abgeschätzt.

Aus der Montagevorgangsliste gewinnt CAPAS automatisch den Vorranggrafen. Der Planer kann diesen nun bei Bedarf am Bildschirm modifizieren. Für variantenreiche Produkte können einzelne Vorranggrafen zu einem gemeinsamen verknüpft werden. Dies ermöglicht eine bessere Leistungsabstimmung der Arbeitsstationen durch eine übersichtlichere Darstellung. Der Vorranggraf verknüpft bei CAPAS keine Bauteile miteinander, sondern die einzelnen Arbeitsgänge. Er bildet somit auch den Ablaufplan. Im nächsten Planungsschritt wird die Kapazitätsteilung durchgeführt. CAPAS teilt die Baugruppen unter Berücksichtigung der Abtaktungszeiten den einzelnen Stationen automatisch zu. Die Zuordnung kann nachfolgend vom Anwender interaktiv modifiziert werden, wenn bestimmte Einflussgrößen (Automatisierungsgrad, Variantenzahl, etc.) dies erfordern. Ebenso zeigt CAPAS die Taktnutzungsgrade der Stationen und den Systemwirkungsgrad an.

**Beurteilung:** MOGRAPH stammt aus der Zeit, als Expertensysteme und regelbasierte Vorgehen im Bereich der Produktionsplanung intensiv behandelt wurden. Die Realität zeigte aber, dass die Systeme meist aufgrund der komplexen Bedienungsabläufe und relativ hohen Fehlerquote (hier 38%) vom Planer in den Betrieben nicht auf Akzeptanz der Anwender stießen. Das Konzept der modularen, produktneutralen Standard-Ablauffolgen entspricht z.T. der Forderung 1 aus Kapitel 2.5.1. Die angeregten Erweiterungen sind sinnvoll, jedoch ist die Planung der Montageanlagensteuerung im übergeordneten Rahmensystem IDAP nicht vorgesehen und damit in weiter Ferne. Eine Idee zur Umsetzung dieser wird nicht präsentiert.

CAPAS unterstützt die frühen Montageplanungsschritte, bei denen aufgrund von Erfahrungen und Schätzungen erste Grobkonzepte entworfen werden können. Das System bietet kein festes Schema an Begriffen für die einzelnen Handhabungsschritte an, was im Einzelfall durchaus zu Fehlinterpretationen führen kann. Ohne eine Anbindung an Simulationswerkzeuge ist jedoch keine Feinplanung von Montagebewegungen, Betriebsmittelanordnungen oder gar Steuerungen automatischer Anlagen möglich.

#### 3.5.2.3 Integrierte Produkt- und Prozessplanung

STEINWASSER (1996, S. 15 - 16) fordert die Durchführung folgender Aufgaben in der Produkt- und Prozessplanung:

- Produktkonstruktion
- Prozess- und Technologieorientierte Produktanalyse
- Strukturierung und Bestimmung der Prozessreihenfolge
- Auswahl und Festlegung der Ressourcen
- Zuordnung der Ergebnisse der Produktanalyse zu den Ressourcen
- Bestimmung der Abläufe und deren Steuer- und Regelstrukturen

Er stellt ein Modell auf, das aus folgenden Komponenten besteht (STEINWASSER 1996, S. 39 – 40):

- a) Geometrieklassen für Bauteile und Maschinen
- b) Klassen mit technologischer Ausrichtung wie Belastungen, Fügeverbindung, Toleranzen auf Produktseite oder Leistungsmerkmale von Ressourcen in Bezug auf Technologien
- c) Funktionsklassen zur Definition von Vorgängen und Operationen. Es wird zwischen ressourcenneutral und -bezogen unterschieden
- d) Klassen mit administrativer Ausrichtung
- e) Klassen zur Spezifikation von Restriktionen des Produktes oder der Ressourcen
- f) Klassen zur Abbildung von Sonderfunktionen zur Überwachung des Modells

Das Rechnersystem umfasst die drei wesentlichen Module **PRODUKT**, **PROZESS** und **RESSOURCE**, in denen jeweils die entsprechenden Planungsaufgaben erledigt werden.

Der Prozess bildet die Zielfunktion der Planung. Es wird unterschieden zwischen **produktorientierter** und **systemorientierter Planung**:

Die produktorientierte Planung „konzentriert sich bei ihrer Aufgabe auf die Ermittlung einer Beschreibungsform, die die Herstellung eines Erzeugnisses wiedergibt, dabei aber die frühzeitige Referenzierung konkreter Ressourcen vermeidet. Zielgedanke ist, die Systemunabhängigkeit auch beim Aufbau der Objekte innerhalb eines Bereiches sicherzustellen. Das bedeutet, daß die Informationen soweit detailliert werden, wie es die Daten, die inhärent durch das Produkt definiert werden, zulassen (S. 48).“

„Bei der [systemorientierten] Planung der Prozesse werden im allgemeinen Produktionsaufgaben Ressourcen zugewiesen und anschließend deren Funktionen konkret für die gestellte Aufgabe detailliert und spezifiziert. Der Nachteil dieser Vorgehensweise besteht darin, daß durch die Kenntnis der Ressource zunächst keine Tauglichkeitsprü-

fung der Funktionen für die gestellte Aufgabe durchführbar ist. Dies erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt. Allerdings besteht dann die Möglichkeit, daß die gewählte Ressource nicht den Anforderungen genügt. Aus diesem Grund sollten die Funktionen der Ressourcen in den Vordergrund gerückt und den Produktionsaufgaben seitens des Produktes gegenübergestellt werden. Implizit sind die Ressourcen den Funktionen zugeordnet und können so über diese referenziert werden. Durch die Möglichkeit der Hierarchisierung können elementare Funktionen des Betriebsmittels beschrieben und einer Aufgabe zugewiesen werden (S. 48 - 49).“

Der Prozess selbst wird erst durch die Zuordnung eines Objekts aus dem Modul PRODUKT und aus dem Modul RESSOURCE definiert. (S. 50)

Im Modul PRODUKT (S. 54 ff) erstellt der Anwender zunächst die Produktstruktur. Die einzelnen Elemente können markiert werden und entsprechen den Zuständen des Produktes (z.B. Markierung der Komponenten als Zustand X oder Markierung der resultierenden Baugruppe als Zustand X+1). Durch die Markierung der sinnvollen Zustandsfolgen lassen sich die möglichen Montageabläufe darstellen. Als Zustandsübergang werden dabei zunächst ressourcenneutral die produktionstechnischen Aufgaben gesehen, wie etwa der Zusammenbau zweier Komponenten. Um die einzelnen Prozessschritte abzubilden, werden in die Produktstruktur Zwischenzustände aufgenommen.

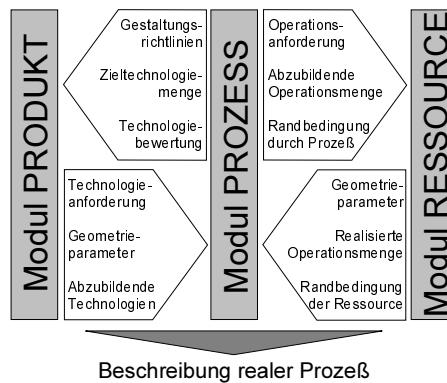


Abbildung 17: Informationsaustausch zwischen den Modulen  
(STEINWASSER 1996, S. 118)

Im Modul RESSOURCE (S. 93 ff) werden zunächst die Betriebsmittel entsprechend dem Klassenschema aus einer der sechs Kategorien Roboter, Fördermittel, Steuerungen, Sensoren, Greifer und Peripheriegerät instanziiert. Ferner ist die Ressource eine der oben erwähnten Klassen der Kategorien a) bis f) zugeordnet. An diese Instanz werden die Funktionalitäten klassen- und objektbezogen assoziiert. Zum Beispiel kann ein Roboter im System eingeführt werden, der dann die Funktionalitäten ‚Achse verschieben‘ oder ‚drehen‘ zugeteilt bekommt. Durch das Ansprechen der Funktionalität erfolgt die Steuerung.

Die Kombination der beiden Modelle erfolgt im Modul PROZESS (s. Abbildung 17). Hier werden die Technologieanforderungen des Produktes mit den Funktionalitäten der Ressourcen abgeglichen und verknüpft.

Die Benutzeroberfläche sieht eine Reihe von Eingabemasken vor. Ein 2D-Schema einer Anlage kann abgebildet werden.

**Beurteilung:** Durch die Trennung in produktorientierte und systemorientierte Planung kann den unterschiedlichen Anforderungen in reellen Planungssituationen Rechnung getragen werden. Leider gibt es aber keine feingranulare Aufbereitung oder ein ausführlich beschriebenes Anwendungsbeispiel zur Verdeutlichung. Die Auf trennung in produkt- und systemorientierte Planung führt während der Planung zu keinen Änderungen, außer dass die beiden Module PRODUKT und RESSOURCE in umgekehrter Reihenfolge bearbeitet werden. Es gibt keine Hinweise auf ein Vorgehen innerhalb des Simultaneous Engineering, Details über Aufgabenteilung und Zusammenarbeiten etc. Die Darstellung ist sehr akademisch gehalten. Bei der Systemanwendung entsteht vermutlich ein hoher Aufwand, wenn erst alle Funktionalitäten der Betriebsmittel abstrakt ins System zu speisen sind. Eine Kopplung zu einem Simulationswerkzeug zur Überprüfung ist nicht geschaffen. Die Bewertung des Prozesses hinsichtlich der benötigten Zeiten und Kosten ist nicht möglich. Eine Ansteuerung der realen Anlage ist zwar angedeutet, es werden aber keine Details (Protokoll etc.) genannt.

## 3.6 Steuerungsentwicklung

### 3.6.1 Kommerzielle Systeme

#### 3.6.1.1 SPS Programmierung

Mittlerweile gibt es von allen SPS-Herstellern umfangreiche Software zur Programmierung der Steuerungen. Diese erfolgt in der Regel auf einem PC, der dann über eine entsprechende Karte und einem Datenkabel mit der Steuerungshardware verbunden ist. Die Software unterstützt meist mehrere unterschiedliche Programmiermodi wie beispielsweise Anweisungsliste, Kontaktplan etc. (vgl. BERGER 1999, KAFTAN 1998, HABERMANN & WEIß 1999). Neuerdings bieten immer mehr Hersteller auch IEC 1131-3 konforme Programmierumgebungen an (z.B. MITSUBISHI 1997).

Der Einsatzbereich der Tools ist auf die Erstellung von SPS-Programmen beschränkt. Die Simulation des Programms bezieht sich lediglich auf eine Interpretation des SPS-Programms im PC und textueller Ausgabe und Abfrage von entsprechenden Signalen an den Ausgangs- bzw. Eingangskontakten der SPS.

Eine Schnittstelle des 3D-Simulationssystems **ROBCAD** zur Siemens **STEP 7** Software eröffnet nun auch für den SPS-Bereich einen ersten Weg aus der Simulation zur realen Anlage. Allerdings kann aus ROBCAD lediglich die Reihenfolge der Bearbeitungsschritte (Sequence of Operations) in die Siemens

Programmierumgebung exportiert werden, die eigentliche Programmierung der SPS erfolgt in STEP 7 (TECNOMATIX 1999b).

**Beurteilung:** Es ist nicht möglich, diese Programme zurückzuschreiben und somit die 3D-Simulation der von dieser SPS gesteuerten Anlage zu betreiben. Die Erleichterung für den Planer besteht darin, dass er aus der 3D-Simulation das Grundgerüst des SPS-Programms bekommt. Der Gesamtverbund der Anlage kann aber mit dieser Konfiguration nicht simulativ validiert werden.

### **3.6.1.2 Roboter-Programmierung**

Das System **LUCAS** (FREUND U. A. 1998) dient als Steuerung für Fertigungssysteme auf Anlagen- und Zellenebene. Die Abläufe werden als Prozesspläne in einer eigenen Programmiersprache, die sich an der IEC 1131-3 orientiert, tabellarisch hinterlegt. LUCAS koordiniert die einzelnen Abläufe. Dabei werden einzelne Komponenten über ihre individuellen Treiber vom LUCAS Message Server angesprochen. Diese Kommunikation wird auch für die grafische 2D-Visualisierung eingesetzt. Eine hierarchische Anordnung verschiedener LUCAS-Systeme ist denkbar. Für die übergeordneten Steuerungsaufgaben ist es möglich, Auftragsdaten mit PPS-Systemen auszutauschen.

**Beurteilung:** Das System LUCAS ist für die Steuerung und Überwachung von Anlagen und Zellen konzipiert. Eine systematische Unterstützung der Planung der Produktionseinrichtung ist weder vom Werkzeug noch in einer Vorgehensweise beschrieben. Die Visualisierung besteht aus einer Animation mit Symbolen in 2D, die Beschreibung der Abläufe ist lediglich über Programmatabellen möglich.

### **3.6.1.3 3D-Simulation für die Roboter-Programmierung**

Die Systeme AnySIM / ROBCAD und IGRIP wurden bereits unter dem Aspekt der Gestaltung manueller Arbeitsstationen aufgeführt (s. Kapitel 3.4.1.2). Ausschließlich für die Offline-Programmierung von Robotern sind die Systeme **AutoMod** (HEIDENBLUT & VOGEL 1997), **AdeptRapid** (N. N. 1996, KREIS U. A. 1997, S. 45f) sowie **FAMOS** von Carat Robotic Innovation und **WORK-SPACE** von Eurotec bestimmt.

**Beurteilung:** Innerhalb der vorgestellten 3D-Simulationssystemen ist eine systematische Prozessmodellierung bzw. -betrachtung nicht möglich. Der Prozess wird implizit über die Bewegungsprogramme der Werker und einzelnen Betriebsmittel abgebildet. Ein weiteres Manko besteht darin, dass es keine Möglichkeit gibt, SPS-Konzepte im selben Modell zu simulieren (z.B. KARNER 1999).

## **3.6.2 Forschungsansätze**

### **3.6.2.1 Steuern von simulierten Maschinen und Prozessen**

Der Ansatz von ALBERT & TOMASZUNAS (1998) verfolgt die Simulation von Maschinen in Echtzeit. Eine virtuelle Maschine ist dabei über E/A-Anschaltung an

### 3.6 Steuerungsentwicklung

---

die unveränderte SPS anzuschließen und die Steuerungssoftware somit unter „echten“ Bedingungen zu testen.

Die technischen Anforderungen an die Maschinensimulation sind dabei: Echtzeitverhalten, ausreichend genaue Nachbildung, Wiederverwendung von Teilmodellen, verbesserter Software-Test, Einbindung von Hardware-in-the-Loop in Simulation und Parameteränderung zur Laufzeit.

Die Umsetzung erfolgt durch das Prinzip des „Domänen-Engineering“. Die Domäne wird definiert als Wissens- und Tätigkeitsgebiet ähnlicher Maschinen- und Anlagenfamilien. Das Domänen-Engineering erfolgt durch den Domänenarchitekten und den Domänenanalytiker. Dabei bestimmt der Domänenarchitekt die Vorgaben wie z.B. Referenzarchitektur und Kompositionsregeln. Der Domänenanalytiker entwickelt die Maschinenmodelle. Die Rechnerumsetzung des Konzepts erfolgte in der Modellierungsumgebung MaSiEd.

Eine ähnliche Idee haben auch MARTIN & MEIER (1997). Auch sie setzen einen PC als Simulator des realen Prozesses ein, um möglichst schnell die Steuerung auf der tatsächlich eingesetzten Hardware testen zu können.

**Beurteilung:** Der Schwerpunkt liegt hier auf dem „Rapid-Prototyping-Prinzip“, bei dem möglichst schnell die Steuerungsprogramme unter realitätsähnlichen Bedingungen ausgetestet werden können. Eine systematische Hilfestellung für die Erstellung des Steuerungsprogramms wird nicht gegeben, beide Verfahren sind auf SPSen beschränkt.

#### 3.6.2.2 Modellbasierte Steuerungsentwicklung

In zeitlicher Überlappung zu dieser Arbeit entstand in Erlangen von COLOMBO (1998) ebenfalls ein Ansatz, der eine Modellierung der Steuerung und die Unterstützung der Inbetriebnahme der realen Produktionsanlage unterstützen soll. Die Vorgehensweise umfasst folgende Schritte:

- Erzeugen von Petri-Netz-basierten Modellen für jede Ressource sowie eines Koordinationsmodells der Ressourcen untereinander.
- Erzeugen einer Abbildung der Sensor-/Aktor-Schnittstellen des Systems.
- Validieren der Spezifikation mittels mathematischer Verfahren und/oder Simulation.
- Die Implementierung des Produktionssystems erfolgt auf Basis online oder offline generierter Steuerungs- und Überwachungsfunktionen.
- Das Ergebnis ist ein High-Level-Petri-Netz-basiertes, formales Abbild des Produktionssystems.

Die zentralen Rechnerwerkzeuge sind ein Petri-Netz-Editor, ein Petri-Netz-Analysator sowie ein Petri-Netz-Interpreter. Der Interpreter nimmt über die Microsoft DDE-Schnittstelle Verbindung zu einem Prozess-Interface auf, das über Feldbus-Kommunikation mit dem realen System Daten austauscht (COLOMBO 1998, S. 139). Für die 3D-Simulation wurde in der Programmierumgebung des Deneb-Simulationssystems IGRIP ein separater Petri-Netz-

Interpreter geschrieben, der das Petri-Netz als Datei importiert und isoliert abarbeitet. Die Erweiterung durch die Schnittstelle Mirage ermöglicht die Kommunikation des Petri-Netz-Interpreters mit SPSen über ProfibusDP (FELDMANN & COLOMBO 1999).

Durch ein geeignetes Informationsmodell und eine entsprechende Vorgehensweise unterstützen BILLING & MAUDERER (1999) die Entwicklung von Fertigungssystemen. Das Vorgehen umfasst im Wesentlichen die drei Schritte ‚Anforderungen des Kunden festlegen‘, ‚Funktionelle Anforderungen klären‘ und ‚Festlegung, Evaluierung und Verbesserung der Anlage‘, die iterativ mehrfach zu durchlaufen sind. Zunächst erfolgt die Gliederung des zu fertigenden Produktspektrums in Teilefamilien. Zusätzliche Informationen für den ersten Planungsschritt sind beispielsweise das Produktionsprogramm des späteren Anlagenbetreibers sowie Randbedingungen über die einzusetzenden Fertigungstechnologien und die Anlagenumgebung mit deren Schnittstellen. Im zweiten Planungsschritt ist je Teilefamilie eine Standard-Bearbeitungskette zu definieren und mit dem Produktionsprogramm abzustimmen. Daraus sind die funktionalen Spezifikationen der Anlage abzuleiten. Im dritten Planungsschritt werden für die vorgesehenen Bearbeitungsfolgen die Komponenten bestimmt und die Materialflusskapazitäten festgelegt. Das Anlagenlayout wird aus den Komponenten zusammengestellt und bewertet. Optimierungsschritte hinsichtlich der Parameter Zeit und Kosten bedeuten erneute Iterationen in den drei Planungsschritten.

Das Informationsmodell enthält die Teilefamilien mit ihren Bearbeitungsketten. Die Anlage ist ebenfalls im Gesamtmodell abgebildet. Hier werden Bearbeitungs- und Transport-Komponenten unterschieden. Die einzelnen Bearbeitungsstationen werden dabei durch den Fluss der Teile innerhalb der einzelnen Bearbeitungsfolgen synchronisiert, der sich nach einer Zuordnung der Maschinenkomponenten zu den Bearbeitungsschritten simulieren lässt. Analysen über Zeiten, Kosten und Auslastungen sind möglich.

Ein Werkzeug zur Unterstützung der Planungstätigkeiten wurde implementiert.

**Beurteilung:** In dem sehr formalen theoretischen Ansatz von COLOMBO (1998) wird mit der Modellierung des komplexen Petri-Netzes begonnen, indem zunächst die Abläufe jedes Betriebsmittels nachgebildet und anschließend im Koordinationsmodell miteinander verknüpft werden. Eine Unterstützung zur abstrakten Ablaufbeschreibung ist nicht vorhanden. Das handzuhabende Bauteil tritt erst in der Simulation für die Kollisionskontrolle in Erscheinung. Der Zusammenhang von Montagevorranggraf und Produktionsablauf wird nicht explizit aufgegriffen.

Der Weg von der Modellierung zur Steuerung der realen Anlage ist zwar in einer durchgängigen Systemkette möglich, allerdings ist für die 3D-Simulation ein Exportieren der Steuerungsstruktur nötig (COLOMBO 1998, S. 141). Zudem wird die Simulation von einem anderen Interpreter abgearbeitet, der nicht für die Steuerung der realen Anlage eingesetzt werden kann, da keine einheitliche Kommunikation zwischen allen Beteiligten realisiert ist (COLOMBO 1998, S. 146). Somit wurde die Simulation nicht vollwertig in den Ansatz integriert.

Bei der Vorgehensweise steht das Produkt im Vordergrund, die Anlage ist darauf anzupassen. Die Planung bleibt auf relativ abstraktem Niveau; Abläufe innerhalb einer Maschinenkomponente sind nicht weiter untergliedert. Es ist unklar, ob Simulationswerkzeuge (Logistiksimulation, 3D-Bewegungssimulation) für Detailbetrachtungen an das eigentliche Planungstool angekoppelt werden können. Inwieweit sich eine Steuerung des Produktionssystems entwickeln lässt, wird nicht gezeigt.

#### 3.6.2.3 Steuerungsplanung mit Virtual Reality

SCHELBERG (1994) unterstützt die Konfiguration von Anlagen aus entsprechenden Bibliotheken. Nach der Aufstellung eines statischen Modells werden funktionale und geometrische Beschreibungen ergänzt, sodass ein dynamisches Modell entsteht. Für die Ableitung des Prozessmodells ist eine Überprüfung der Konfiguration auf geometrische Konfliktsituationen als dritter Schritt erforderlich (S. 71 f). Das eigentliche Steuerungsprogramm wird mittels der Objektbefehlsliste (OBL) formuliert. Diese ist eine Erweiterung der IEC-Norm 1131 und wird vor Beginn der realen Steuerung per Compiler entsprechend der Steuerung übersetzt.

Auch OSMERS (1998) verfolgt das Ziel eines Unterstützungssystem zur einfachen / intuitiven SPS-Programmierung. Er führt offensichtlich die Arbeiten von SCHELBERG (1994) weiter. Der Ansatz basiert auf einer geometrischen Modellierung einer Anlage in einer VR-Umgebung.

Einer Produktionsanlage weist er folgende Strukturierungsebenen zu: Anlage, Ablauf, Funktion, Aktor/Sensor und Geometriebaustein (S. 52). Diese werden durch entsprechende Objekte in einer dreidimensionalen Virtual-Reality-Umgebung dargestellt. Sensoren und Aktoren sind als Objekte bzw. „Buttons“ modelliert.

Bei der Planung verwendet er die Ablaufsprache (AS nach DIN 40719 Teil 6), die „parallel mitgeführt“ wird (S. 55). OSMERS (1998) wählte den Bottom-up-Ansatz zur Aggregation der Ablaufsteuerung: Ausgehend von der Sensor/Aktor-Ebene werden die Funktionsbausteine durch logische Verknüpfung erstellt. Im Rechnersystem sind die grafisch repräsentierten Objekte mittels Dialogboxen verknüpfbar (S. 75).

Diese Funktionsbausteine wiederum lassen sich zu Ablaufbausteinen zusammensetzen. „Das Werkstück wird durch das Anwählen der Aktoren sequentiell durch die Teilanlage bewegt. Diese Bewegung entspricht der Abfolge der entsprechenden realen Bearbeitungsschritte. Die Abfolge der Schritte wird in einer Dialogbox mit entsprechenden Editierfunktionalitäten mitprotokolliert und kann mit dem Namen des Funktionsbausteins versehen werden (S. 77)“. Durch Farbgebung wird angezeigt, ob das jeweilige Objekt in einen Funktionsbaustein integriert worden ist.

Die oberste Ebene der Hierarchie bildet die Anlagenebene, in der die Ablaufbausteine koordiniert werden. Diese sind ebenfalls per Dialogbox sequentiell einzufügen, zusätzlich ist eine Parallelisierung der Prozesse möglich.

Die gesamte Ablaufbeschreibung der Anlage ist zunächst neutral formuliert und wird anschließend durch Compilieren in einen herstellerspezifischen SPS-Code überführt. Hierfür ist eine Zuordnung der Sensor-/Aktorelemente aus der VR-Umgebung zu den realen Komponenten erforderlich, welche wiederum per Dialogfeld erfolgt.

Für die Funktionskontrolle sind drei Simulationsarten möglich (S. 88):

- Der neutral formulierte Ablauf wird in der VR-Umgebung abgearbeitet
- Compilierte SPS-Programme werden von der VR-Umgebung interpretiert und ausgeführt.
- Durch eine direkte Verbindung der realen E/A-Ebene mit dem VR-Modell steuert eine reale SPS das Anlagenmodell (Hardware-in-the-Loop). Hier sind zusätzlich reale oder virtuelle Bedienelemente zur Prozessbeeinflussung ergänzbar. In diesem Modus ist allerdings zu beachten, dass die Zykluszeit der SPS weit unter der Bildwiederholfrequenz des VR-Systems liegt und so die Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit niedriger angesetzt werden müssen.

**Beurteilung:** Der Ansatz unterstützt die Entwicklung von SPS-Programmen für Produktionssysteme, in denen nur eine Steuerung auftritt. Eine Einbeziehung von Robotern ist in diesem Ansatz nicht möglich. Die Erstellung von Roboterprogrammen wird von der VR-Umgebung nicht unterstützt. Der Ablauf wird bottom-up erstellt und mitprotokolliert. Dabei werden zunächst nur die einzelnen Aktoren und Sensoren im 3D-Modell per 'Drücken' einer Schaltfläche ausgelöst. Der Bediener muss den erforderlichen Ablauf anderweitig vorbereitet haben und durchspielen. Die weitere Aggregation zum Gesamtablauf erfolgt in Form von Textdialogen und Tabellen. Die Transparenz des Ablaufes ist dadurch nicht mehr sichergestellt, was insbesondere bei Änderungen negativ auffallen könnte.

### **3.6.2.4 Roboterprogrammierung**

Für die Durchführung von Klebeprozessen mit einem Roboter entwirft PETRY (1991, S. 78 - 93) einen modularen Programmabaukasten. Er setzt jedes Roboterprogramm hierarchisch aus Elementen der fünf Modulgruppen **neutrales Programmgerüst, bereitstellungsbezogenes Programmgerüst, teilespezifisches Klebemodul, Prozessmakro** und **neutraler Prozessbaustein** zusammen. Dabei kann ein Element niedriger Ordnung in eins höherer Ordnung eingeklinkt werden, z.B. ein Prozessmakro in ein teilespezifisches Klebemodul.

DAMMERTZ (1996) stellt mit dem Programmiersystem **OPERA** einen Ansatz zur Erstellung von Roboterprogrammen vor. In Abhängigkeit der Benutzerqualifikation und Aufgabenstellung stehen unterschiedliche Funktionalitäten zur Verfügung. Das System besitzt einen grafischen Editor, in dem das Programm als Ablaufplan mit ergänzten Symbolen erstellt wird. Den Elementen des Ablaufplans werden einzelne Steuerungsbefehle zugewiesen. Implementiert sind Symbole für die Befehle der Roboterprogrammiersprache IRL (DIN 66312) und die daran angelehnte S-IRL von Siemens.

OPERA enthält Schnittstellen zu einem 3D-Simulationssystem (ROBCAD) auf TCP/IP-Basis, zur Robotersteuerung auf MMS-Basis und zu einem CAD-System ein STEP-Import-Modul. Das Konzept sieht vor, das Programm in OPERA zu erstellen. Nachdem die Programmlogik erstellt ist, kann die Verbindung zum Simulationssystem erfolgen. Dort ist die Zelle nachzubilden und der Roboter zu bewegen. Die Werte der einzelnen Positionen können über die Schnittstelle in OPERA übertragen werden, nicht jedoch die Bewegungsabläufe oder gar Teilprogramme (S. 89).

Stehen alle Befehle des Roboterprogramms und deren Parameter (z.B. Koordinaten) fest, werden diese per MMS auf die reale Robotersteuerung transferiert. Dort muss für einen simulierten Probelauf die Möglichkeit vorhanden sein, das Programm abzuarbeiten, ohne den realen Roboterarm zu bewegen. Die jeweilige Position des Arms wird dann über die MMS-Schnittstelle an OPERA gemeldet und von dort an ROBCAD geschickt, um ein Bild der Position zu generieren.

Dammertz sieht den Vorteil darin, dass kein separates Simulationsmodell der Steuerung erstellt werden muss. Er weist aber selbst auf die Einschränkung hin, dass einerseits eine reale Robotersteuerung vorhanden und verfügbar sein und andererseits diese den speziellen Betriebsmodus erlauben muss (S. 93).

**Beurteilung:** Leider bleibt offen, ob bei PETRY (1991) ein Rechnerwerkzeug bei der Planung mit dem Baukastenkonzept die Arbeit erleichtert. Ebenso fehlt eine explizite Handlungsanweisung, wie mit dem Baukasten in unterschiedlichen Anwendungsfällen umzugehen ist.

Der Ansatz von DAMMERTZ (1996) unterstützt eine sehr feingranulare Erstellung von Programmen. Der Betrachtungsraum ist die einzelne Zeile Programmcode, d.h. der einzelne (Bewegungs-)befehl. Es wird keine Vorgehensweise zur systematischen Programmerstellung präsentiert. Das System eignet sich für eine Umplanung bei bestehendem Roboter, dessen Steuerung für die Planung eingesetzt werden kann. Die Simulation verschiedener Alternativen kommt wegen der notwendigen Hardware nicht in Betracht. Der Ansatz ist ferner allein auf Robotersteuerungen begrenzt, andere Komponenten wie SPS können nicht unterstützt werden. OPERA weist keine Komponenten zur zeitlichen oder monetären Bewertung der Roboterzellen und Programmabläufe auf.

## 3.7 Zusammenfassung der Ansätze

Die ersten drei Abschnitte dieses Kapitels dienen lediglich der Darstellung wichtiger grundlegender Konzepte und Technologien, die als Basiswissen für das Verständnis der vorliegenden Arbeit erforderlich sind.

Die nachfolgende Tabelle 1 enthält keine Globalbewertung im Sinne einer objektiven Beurteilung der 'Qualität' eines Ansatzes, sondern eine Bewertungsübersicht ausschließlich im Hinblick auf die Erfüllung der drei Forderungen dieser Arbeit.

Erfüllungsgrad Ansatz	Forderung 1	Forderung 2	Forderung 3
	Prozessplanung im Vordergrund	Wechselseitige Berücksichtigung von Anlage oder Produkt	Durchgängigkeit von der Idee bis zur Realisierung
ErgoPlan	-	-	-
TiCon	o	-	- (manuelle Systeme)
3D-Simulation	o	-	o
Bullinger	-	-	o
Seliger / Deutschländer	o	-	o
van Brussel	o	-	-
Tönshoff u.a.	o	-	o
CSIRO	o	-	-
ifab	o	-	o (manuelle Systeme)
Rampersad	++	o	-
wbk	o	-	-
Schuster	o	o	-
Feldmann	+	o	o
eM-Planner	++	o	-
RAPP	++	? (keine Angab. erh.)	? (keine Angab. erh.)
allg. Reihenfolge	o	-	-
MOGRAPH / IDAP	++	o	-
CAPAS	+	-	-
Steinwasser	++	+	-
SPS-Programmiertools	o / +	-	+ (aber nur SPS)
LUCAS	+	-	o
3D-Simulation	o	-	o
Albert / Tomaszonas	o	-	+ (aber nur SPS)
Colombo	o	-	o
Osmers	o	-	o
OPERA	o	-	+ (aber nur Roboter)
Petry	+	o	-
Mauderer	+	-	-

Bewertungsskala: '-' nicht / , 'o' etwas / , '+' gut / , '++' sehr gut

*Tabelle 1: Erfüllung der Forderungen durch den Stand der Technik und der Forschung*

Wie der Übersicht zu entnehmen ist, erfüllt keiner der in den Kapiteln 3.4 mit 3.6 genannten Ansätze alle drei Forderungen dieser Arbeit zufriedenstellend. Besonders die Durchgängigkeit von der virtuellen Planungswelt zu realen Montageanlage ist noch nicht ausreichend umgesetzt. Dies dokumentiert den Bedarf für einen weitergehenden Ansatz, der im Folgenden präsentiert werden soll.

---

## 4 Konzept für eine methodische und technische Unterstützung

In diesem Kapitel wird ein neuer Ansatz zur Unterstützung der durchgängigen Prozess- und Steuerungsplanung für Montageanlagen entwickelt. Dieser orientiert sich an den Forderungen, die in Kapitel 2 aufgestellt wurden und schließt die Lücken, die durch den aktuellen Stand der Technik (s. Kapitel 3) noch nicht abgedeckt sind. Ausgehend von der Vorstellung der prinzipiell zugrundeliegenden Idee (s. Kapitel 4.1) erfolgt eine vertiefende Betrachtung der wichtigsten Bestandteile (s. Kapitel 4.2): Zunächst werden die einzelnen Komponenten der Planungsmethode vorgestellt, danach deren Zusammenspiel in der Vorgehensweise. Beide Abschnitte werden aufgrund ihres Umfangs durch ein Zwischenresümee jeweils abschließend inhaltlich zusammengefaßt. Das dritte Teilkapitel (s. Kapitel 4.3) widmet sich dem Datenmodell, welches die Basis für das Rechnerwerkzeug bildet. Abschließend werden Aspekte der Integration in den betrieblichen Einsatz behandelt (s. Kapitel 4.4).

### 4.1 Grundlagen

Dieses Kapitel stellt die neu erarbeiteten Grundlagen des Konzeptes vor.

Eine elementare Forderung aus Kapitel 2.5 ist die Möglichkeit, einen Montageablauf als eigenständiges Objekt zu beschreiben. Nur auf diese Weise ist eine Planung unabhängig von den am Prozess beteiligten Produktkomponenten und Betriebsmitteln durchführbar. Um die Planung einer Vorgangsbeschreibung und der Steuerung einer automatisierten Anlage zu unterstützen, ist ein adäquates Konzept zu entwickeln: Ausgehend von einer abstrakten Reihenfolgebeschreibung sind einzelne Teilschritte zu definieren, die bei Bedarf feiner detailliert werden können und auch die Modellierung einer Steuerung zulassen.

#### 4.1.1 Teilnehmer am Montagevorgang

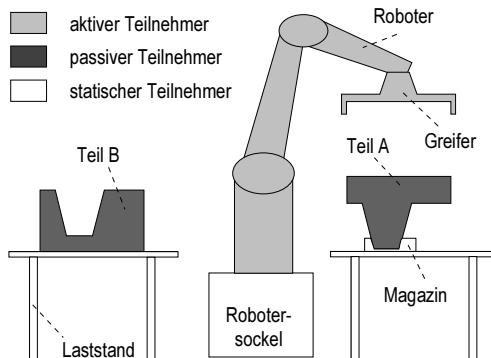
Das wesentliche Gestaltungselement der Planung im hier betrachteten Sinne ist die abstrakte Vorgangsbeschreibung, die keine körperliche Repräsentation in der Realität hat. Am Montagevorgang nehmen verschiedene reale Objekte in unterschiedlichen Rollen teil. Die Rollen der einzelnen Prozessteilnehmer werden im Folgenden klassifiziert, um den Einfluss der einzelnen Objekte identifizieren und später in der Planungsvorgehensweise angemessen berücksichtigen zu können.

Die erste Gruppe bilden die **aktiven Teilnehmer** am Montagevorgang. Diese sorgen für den Bewegungsablauf bei der Montage – im umgangssprachlichen Verständnis ‚montieren‘ sie die Teile. Dazu gehören die konkret ausführenden Werker sowie die automatischen Betriebsmittel wie Roboter und automatische Montagevorrichtungen mit ihren spezifischen Programmen. Betriebswirtschaftlich gesehen verursacht ihre Teilnahme Kosten.

Die zweite Gruppe umfasst die **passiven Teilnehmer**. An diesen werden die Montageoperationen durchgeführt – umgangssprachlich „werden sie montiert“. Darunter fallen die handzuhabenden Werkstücke und (Zwischen-) Baugruppen. Diese bilden in ihrer abschließenden Konfiguration das Endprodukt der Montagezelle bzw. -anlage und dienen somit als Kostenträger.

Die dritte Gruppe enthält die **statischen Teilnehmer**. Das sind die restlichen, unbewegten Betriebsmittel und Vorrichtungen wie Laststände oder Magazine etc. Hier können Objekte aller drei Gruppen temporär (z.B. Werkstücke im Magazin) oder dauerhaft (z.B. Roboter auf Sockel) abgelegt werden. Auch sie verursachen durch ihre Beteiligung Kosten.

Abbildung 18 zeigt exemplarische Vertreter aller drei Gruppen innerhalb einer schematischen Montagezelle.



*Abbildung 18: Einteilung einer Montagezelle in die drei Teilnehmergruppen*

Bei der Planung des Montagevorgangs ist das Hauptaugenmerk auf die aktiven und passiven Teilnehmer zu legen, da diese im Verlauf ihre Positionen verändern. Die statischen Teilnehmer müssen in der Regel nur einmalig aufgebaut werden und verbleiben an ihrer Stelle, sie werden bei Kontakt mit einem Teilnehmer der anderen Gruppen kurzzeitig als Randbedingung der Planung von Geometrien und Bewegungen betrachtet.

#### *4.1.2 Montagevorgangsbeschreibung*

Die aufgestellte Forderung 1 (s. Kapitel 2.5.1) postuliert, dass es eine Prozessplanung als vorrangigen Arbeitsinhalt geben soll. Zunächst müssen also die Voraussetzungen geschaffen werden, damit der Montagevorgang als eigenständiges Planungsobjekt behandelt werden kann.

Die Montagevorgangsbeschreibung muss hinreichend abstrakt erfolgen, damit sie für jeweils im Funktionsumfang ähnliche Objekte mit völlig unterschiedlichen individuellen Eigenschaften (z.B. unterschiedliche Programmiersprachen) dennoch Gültigkeit besitzt. So können schnell alternative Anlagen oder Produktvarianten beplant werden. Bei der Prozessbeschreibung ist ergo darauf zu achten, dass diese zunächst prinzipiell unabhängig vom konkret zugehörigen

Objekt ausführbar und ferner für ein größeres Spektrum an Realisierungsalternativen geeignet ist.

Die Planung des gesamten Montagevorgangs ist nur beherrschbar, wenn es eine klare Struktur des Ablaufs gibt und separate Teiltätigkeiten isoliert im Detail betrachtet und gestaltet werden können. Aus diesem Grund erfolgt eine Unterteilung der gesamten Montagevorgangsbeschreibung in die wesentlichen Teiltätigkeiten. Um auch der Forderung 3 (Durchgängigkeit) aus Kapitel 2.5 Rechnung zu tragen, muss diese Klassifikation vollständig sein, d.h. alle Facetten des Ablaufs in einer Montageanlage umfassen.

### 4.1.2.1 Struktureller Kern

Der strukturelle Kern der Vorgangsbeschreibung ist die **generelle Montagereihenfolge**. Bezogen auf das Produkt ergibt sich die generelle Montagereihenfolge aus dem Vorranggrafen, in dem festgelegt ist, welche Komponenten in welcher Folge zu Baugruppen zusammengesetzt sind. Andererseits kann man die Reihenfolge auch aus Sicht der ablaufbezogenen Anlagenstruktur herleiten. Diese Struktur gibt beispielsweise die maximal mögliche Anzahl an parallel vormontierbaren Unterbaugruppen vor oder bestimmt, dass in einer einzelnen Linie alle Komponenten der Reihe nach eingebaut werden. Im optimalen Fall passen die ideale ablaufbezogene Anlagenstruktur und der ideale Produktvorranggraf direkt zueinander. In der Praxis wird man jedoch ein globales Minimum der Gesamtheit aus Produkt- und Montagekosten anstreben und auf beiden Seiten von der jeweiligen Ideallinie abweichen.

### 4.1.2.2 Unterschiedliche Teiltätigkeiten

Der gesamte Montagevorgang kann nach VDI 2860 durch einzelne Handhabungsvorgänge beschrieben werden. Dabei erfolgt eine detaillierte abstrakt-funktionale Klassifizierung, die für die Planung von Bewegungsabläufen weniger geeignet ist.

KUGELMANN (1999, S. 54f.) beschreibt in Anlehnung an die Definition von HÖRMANN & HÖRMANN (1990) die Standardstruktur eines Handhabungsvorgangs als Folge von Greifvorgang, Transfer und Ablegevorgang (s. Abbildung 19).

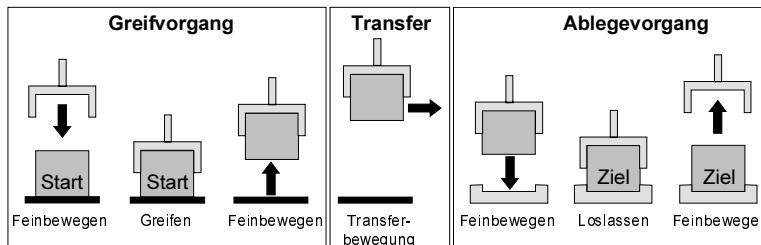


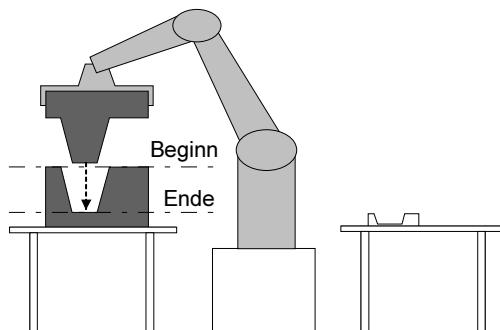
Abbildung 19: Standardstruktur eines Handhabungsvorgangs  
(KUGELMANN 1999, S. 55)

Beide beschriebenen Klassifikationen erfassen keine Vorgänge, die ohne Bezug zu einer Produktkomponente stattfinden (z.B. Leerfahrten). Deswegen ist eine andere Untergliederung des Montagevorgangs notwendig, die alle für diese Arbeit wichtigen Aspekte abdeckt.

Es werden daher insgesamt fünf Arten von Teilvergängen neu definiert:

### **a) Elementare Montagebewegung**

Die Elementare Montagebewegung ist der eigentliche Zusammenbau zweier Komponenten. In diesem Kontext beginnt die Bewegung, sobald eine Durchdringung der Hüllgeometrien der beteiligten Produktkomponenten einsetzt. Sie endet mit dem Erreichen der endgültigen relativen Lage der Fügepartner zueinander. Eine exemplarische Darstellung bietet Abbildung 20.



*Abbildung 20: Beispiel einer Elementaren Montagebewegung*

Die Elementare Montagebewegung besitzt nicht nur rein technologisch eine besondere Bedeutung, sondern auch in betriebswirtschaftlicher Hinsicht: Allein das unmittelbare Fügen zweier Komponenten zu einer übergeordneten Baugruppe bringt in der Theorie den Wertzuwachs in der Montage. Alle zusätzlichen Vorgänge und Verrichtungen verursachen nur Kosten und sollen deswegen weitgehend eliminiert werden. In der Struktur nach KUGELMANN (1999) lässt sich dieser Teilvergang als spezieller Ablegevorgang einordnen.

### **b) Annähern / Verlassen der Fügestelle**

Das Annähern an die Fügestelle bringt die Fügepartner in die Position kurz vor der eigentlichen Montagebewegung. Diese ist erreicht, wenn sich die Hüllgeometrien der Komponenten gerade zu berühren beginnen. Der Start dieses Vorgangs ist nicht so exakt zu bestimmen. Das Werkstück ist schon im entsprechenden Handhabungswerkzeug für den Fügevorgang aufgenommen. Die Position des Werkstücks ist bereits in der Umgebung der späteren Fügestelle, sodass im Rahmen dieses Teilverganges keine weiten Wege mehr zurückgelegt werden. Meist ist eine erhöhte Aufmerksamkeit darauf zu richten, dass keine Kollisionen mit anderen Betriebsmitteln auftreten (s. Abbildung 21). Dieser Teilvergang entspricht den Feinbewegungen beim Ablegen in der Klassifikation von KUGELMANN (1999), wenn man den Fügevorgang als spezielles Ablegen versteht.

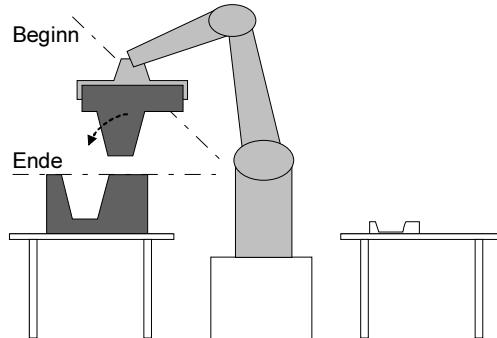


Abbildung 21: Beispiel für das Annähern der Fügestelle

Das Verlassen der Fügestelle beschreibt den umgekehrten Vorgang. Dabei kann entweder die montierte Baugruppe transportiert werden oder aber das leere Handhabungsmittel aus dem Bereich der Montageoperation entfernt werden. Das Verlassen beginnt meist in der Position nach vollendeter Elementarer Montagebewegung und endet analog zu obiger Beschreibung in hinreichendem Abstand.

### c) Be-/Entladen der Bereitstellung

Teilvorgänge dieser Klassifikation umfassen das Aufnehmen der Werkstücke aus den Bereitstellungseinrichtungen wie etwa Magazinen und ebenso das Ablegen von montierten Komponenten in Transportbehälter etc. (s. Abbildung 22). Ebenso fällt unter diese Kategorie das Einlegen von Werkstücken in und das Entnehmen aus Montagevorrichtungen, die für Fügevorgänge als Halterung dienen. Diese Teilvorgänge entsprechen in der Standardstruktur nach KUGELMANN (1999) den Greif- und Ablegevorgängen.

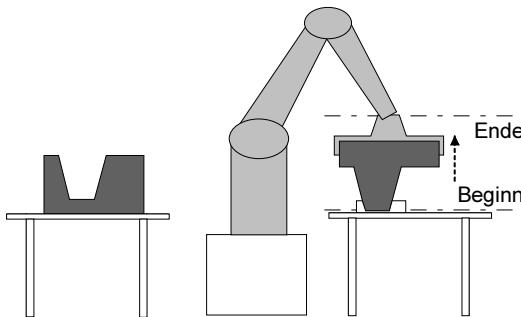
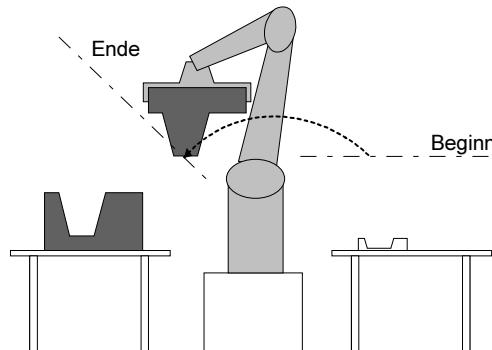


Abbildung 22: Beispiel für das Entladen der Bereitstellung

Diese Kategorie an Teilvorgängen wurde eingeführt, da neben dem Handhabungsbetriebsmittel hier auch weitere Anlagenkomponenten beteiligt sind, die geometrisch auf die Produktkomponenten abgestimmt werden müssen. In der Regel ist die Bewegungsbahn sorgfältig auf Kollisionsgefahr mit benachbarten Gegenständen zu überprüfen.

#### **d) Periphere Montagebewegung**

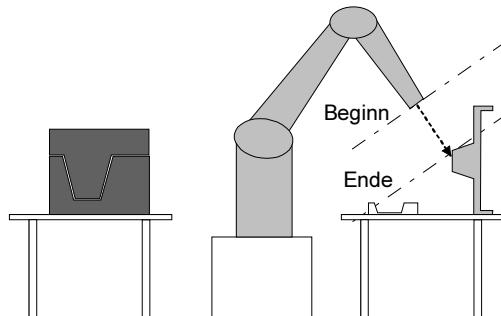
Hierunter fallen diverse Handhabungsoperationen einzelner Produktkomponenten wie beispielsweise Orientieren und Fördern, die nicht in die übrigen Kategorien einzuordnen sind. Diese finden in der Regel ohne starke Einschränkungen des Bewegungsraumes durch andere Betriebsmittel oder Werkstücke statt. Die Bewegungsbahnen verlaufen je nach Eignung der Betriebsmittelachsen und Steuerungsanweisung vorwiegend linear, zirkular oder als Punkt-zu-Punkt (PTP) Bewegung (s. Abbildung 23). In der Einteilung nach KUGELMANN (1999) sind dies die Transfervorgänge.



*Abbildung 23: Beispiel für eine Periphere Montagebewegung*

#### **e) Werkstückunabhängige Nebenprozesse**

Darunter fallen alle Teilvergänge in einer Montageanlage, bei denen kein Werkstück involviert ist. Diese finden entweder einmalig im Sinne eines Auf- bzw. Abrüstens der Anlage statt oder aber auch zwischendurch für eine ablaufbedingte Konfigurationsänderung, die pro Los mehrfach erfolgen kann.



*Abbildung 24: Beispiel eines Werkstückunabhängigen Nebenprozesses*

Typische Vertreter dieser Art sind Greiferwechsel oder erstmaliges Anfahren eines Werkstückträgers zur Aufnahme eines Bauteils (s. Abbildung 24). Auch diese Teilvergänge nehmen in betriebswirtschaftlicher Hinsicht eine besondere

Stellung ein, da ihnen bei der Kostenträgerrechnung nicht unbedingt ein entsprechendes Produkt unmittelbar zugewiesen werden kann. Hier sind individuelle Betrachtungen und Entscheidungen über die Kostenumlegung notwendig. KUGELMANN (1999) betrachtet diese Vorgänge nicht.

### Gegenüberstellung

In der folgenden zusammenfassenden Tabelle sind die in dieser Arbeit eingeführten Teilvorgänge nach dem betroffenen Gestaltungselement klassifiziert.

<i>betrifft hauptsächlich das Produkt</i>	<i>betrifft Produkt und Montageanlage</i>	<i>betrifft hauptsächlich die Montageanlage</i>
Elementare Montagebewegung	Periphere Montagebewegung	Werkstückunabhängiger Nebenprozess
Annähern / Verlassen der Fügestelle	Be-/Entladen der Bereitstellung	-

*Tabelle 2: Klassifizierung der Teilvorgänge*

Durch die feinere Aufteilung der Montagevorgangsbeschreibung in die fünf Kategorien wird insbesondere der Forderung 1 (Prozessplanung im Vordergrund) und 3 (Durchgängigkeit) aus Kapitel 2.5.1 begegnet. Die Zuordnung zu den hauptsächlich betroffenen Gestaltungselementen hingegen zielt bereits auf die Erfüllung der Forderung 2 (Berücksichtigung von Einflüssen aus dem Produkt und der Anlage) ab.

#### 4.1.2.3 Synchronisation der Einzelvorgänge

Neben der Planung der einzelnen Teilvorgänge, die meist separat durchgeführt wird, ist eine Synchronisation aller Teilvorgänge zu einem effizienten Gesamtablauf notwendig.

##### a) Synchronisieren von Teilvorgängen eines Betriebsmittels

Die Synchronisation besteht auf der einen Seite darin, dass die End- und Startkoordinaten von Betriebsmitteln an unmittelbar aufeinanderfolgenden Teilvorgängen zur Übereinstimmung gebracht werden, damit eine im mathematischen Sinne stetige Bahnkurve entsteht und ein kontinuierlicher Bewegungsablauf sichergestellt ist.

##### b) Synchronisieren von Teilabläufen unterschiedlicher Betriebsmittel

Auf der anderen Seite ist die Abstimmung der Abläufe der Betriebsmittel untereinander zwingend. Es darf im Verlauf der Montage weder zu unnötigen Wartezeiten eines Betriebsmittels auf ein anderes geben, noch dürfen unlösbare Konfliktsituationen durch gleichzeitigen Zugriff auf gemeinsame Ressourcen oder Lokationen entstehen. Ferner dürfen keine Kollisionen durch die Bewegung der Betriebsmittel auftreten.

### **c) Integration anderer Vorgänge**

Für die Komplettierung des Gesamtablaufs in der Montageanlage müssen auch andere Teilabläufe und Komponenten integriert werden, die nicht unbedingt im Rahmen der Montagevorgangsplanung gestaltet werden. Hierzu gehören beispielsweise besondere Behandlungsschritte wie Lackieren etc. oder Aspekte der Qualitätssicherung, die im Rahmen separater Arbeitsumfänge wie etwa der Prüfmittelentwicklung (z.B. nach REITER 1998, S. 74 - 96) erarbeitet werden. Die jeweiligen Komponenten werden in der Planung in das Anlagenlayout integriert; im Montagevorgang werden Teilvorgänge der Kategorie Be-/Entladen der Bereitstellung eingeplant, die die Schnittstellenfunktion erfüllen.

### **d) Ablaufbedingte Vorbereitung des Montagevorgangs**

Als letzter Punkt wird hier die ablaufbedingte Vorbereitung des Montagevorgangs eingeführt. Darunter ist insbesondere die Bereitstellung des notwendigen Steuerungsprogramms in der Komponentensteuerung zu verstehen.

Die Komponentensteuerungen der einzelnen Betriebsmittel müssen in der Regel das auszuführende Programm durch eine separate Anweisung erst in den Arbeitsspeicher geladen haben, um es ausführen zu können. Es gibt Steuerungen, die gleichzeitig eine große Anzahl von eigenständigen Programmen im Arbeitsspeicher halten können, z.B. Robotersteuerungen. Andere, wie beispielsweise SPSEN, können jeweils nur ein ausführbares Steuerungshauptprogramm im Speicher haben. Gegebenenfalls muss zwischen der Ausführung zweier Teilvorgänge des Gesamtablaufes erst ein anderes Programm in die Steuerungskomponente geladen werden. Der Planer gestaltet dann neben dem eigentlichen Montageablauf noch einen parallelen Meta-Ablauf, der für die infrastrukturelle Voraussetzung für einen ordnungsgemäßen Gesamtablauf der Montage sorgt. Andernfalls können diese Programme in einem einmaligen softwaretechnischen Rüstvorgang in die Steuerung geladen werden, der komplett vor dem Montagebeginn abläuft, aber dennoch einer Planung bedarf.

Unter diese Rubrik der Synchronisation fallen keine Vorgänge, die eine Änderung der Hardware-Konfiguration der Anlage (z.B. Aufnahme oder Wechseln des Robotergreifers) darstellen. Diese sind unter Kapitel 4.1.2.2 beschriebene Werkstückunabhängige Nebenprozesse.

#### **4.1.2.4 Hierarchisierung der Vorgangsbeschreibung**

Unabdingbar ist eine vollständige Darstellung des Montagevorgangs. Zudem kann aber jeder Teilvorgang in den einzelnen Planungsschritten auf unterschiedlich abstrakten Ebenen betrachtet bzw. beschrieben werden. Dabei muss ein Übergang entweder durch Verdichtung nach oben bzw. durch Erweiterung nach unten möglich sein. Die Grundstruktur darf sich dabei aber nicht verändern. Auch die Maßnahmen zur Synchronisation der Teilvorgänge müssen in der Gesamtbeschreibung aufgenommen werden können.

##### **a) Detaillierung aus Sicht des Produktes**

Auf oberster Abstraktionsstufe steht aus Produktsicht die Reihenfolge des Zusammenbaus der Komponenten, der **Montagevorranggraf**. Er ist zwar formal

eine bestimmte Darstellung der Produktstruktur, semantisch jedoch bereits das Ablaufschema des Montagevorgangs.

Eine Verfeinerung erfolgt, indem die für die Montage notwendigen Einzelaktionen (Montageoperationen) in ihrer Reihenfolge beschrieben werden. Diese werden in der zweiten Hierarchiestufe als eigenständige Entitäten im **Ablaufplan** angeordnet, der somit das Grundgerüst der Montagevorgangsbeschreibung bildet. Der Gesamtablauf besteht aus einzelnen Montageoperationen. Diese Operationen beinhalten jeweils die notwendigen Bewegungen (z.B. Umsetzen eines Bauteils vom Ort A zum Ort B). Die genaue Bahnbeschreibung ist also in der Regel nicht in der Montagevorgangsbeschreibung abgelegt, sondern in der Beschreibung der einzelnen Montageoperationen enthalten, beispielsweise als Roboterprogramm. Diese werden im Detail einzeln feiner geplant und später an das entsprechende Betriebsmittel angepasst. Die grafische Darstellung der Einzelaktionen des Ablaufplans im Rechnerwerkzeug geschieht über Symbole nach der VDI 2860 Richtlinie für Handhabungsvorgänge (FELDMANN 1996, S. 72).

Die Montagevorgangsbeschreibung verfolgt das Ziel, weitestgehend ein neutrales Beschreibungsformat bis zur Formulierung der Steuerung des Ablaufs einzusetzen. Somit ist in der dritten Hierarchisierungsstufe eine entsprechende Beschreibungstechnik zu verwenden. Wie bereits erwähnt, baut diese Arbeit auf die Modellierung mittels **objektbezogener Petri-Netze** auf (s. Kapitel 3.1.1.4 und 3.4.2.4).

Diese Petri-Netze werden so eingesetzt, dass eine sukzessive Detaillierung möglich ist. Für jeden aktiven und passiven Teilnehmer (Betriebsmittel und Werkstück, s. Kapitel 4.1.1) wird ein separates Petri-Netz angelegt, welches zur Beschreibung des Verhaltens dieses Objektes im Montagevorgang dient. Für die statischen Teilnehmer ist es nicht erforderlich, ein komplexes Netz zu erstellen, da diese in den seltensten Fällen während der Montage verändert werden und somit nur eine Initialprüfung auf vollständige Einsatzfähigkeit der Anlage zu Beginn notwendig ist.

Jede Stelle des Petri-Netzes entspricht dem Zustand des zugehörigen Objektes während der Montageaufgabe aus dem Ablaufplan. Zwischen den Stellen liegen Transitionen, die einen Übergang von einem Zustand zum nächsten regeln, indem die entsprechenden Stati der Betriebsmittel mit den Sollvorgaben verglichen werden. Eine Marke wandert durch das Netz und kennzeichnet so die aktuell ausgeführte Aufgabe. Zudem besteht die Option, das Petri-Netz hierarchisch zu detaillieren. Dabei ist jeweils eine zeitbehaftete Stelle in eine untergeordnete Kette aus Stellen und Transitionen verfeinbar. Diese Bewegung kann durch die jeweiligen Start- und Endkoordinaten des Objektes an einer Stelle des Petri-Netzes im Datenmodell genauer abgelegt und für die Synchronisationsplanung genutzt werden.

### b) Detaillierung aus Sicht der Montageanlage

Eine analoge Hierarchisierung ergibt sich aus Sicht der Montageanlage. Die abstrakteste Stufe ist hierbei die **Anlagenstruktur** bzw. das Schema-Layout, auch Block-Layout genannt, wodurch eine Einteilung in die einzelnen Vor- und Hauptmontagebereiche erfolgt. Analog zum Montagevorranggrafen des Pro-

duktes kann hier eine Aussage über die Reihenfolge des Gesamtablaufs und über Parallelitäten von Teiltätigkeiten getroffen werden.

Die zweite Hierarchiestufe bildet die Aufstellung der Aktionen der einzelnen Maschinen und Werker im Rahmen des Montagevorgangs, die **betriebsmittelbezogene Arbeitsgangfolge**. Diese bildet das Pendant zum Ablaufplan des Produktes; hier sind die Operationen jeder Maschine aufgeführt, unabhängig vom jeweils behandelten Werkstück.

Die dritte Stufe ist auch in diesem Fall das **objektbezogene Petri-Netz**. Erst in dieser Darstellung kann die vollständige Wechselwirkung von Produkt und Anlage dargestellt werden. Durch die Möglichkeit der Hierarchisierung einer zeitbehafteten Stelle des Netzes in ein untergeordnetes Netz kann die Detaillierung in ein und derselben Beschreibungstechnik weiter verfeinert werden, sodass sich auch einzelne Teilbewegungen abbilden lassen.

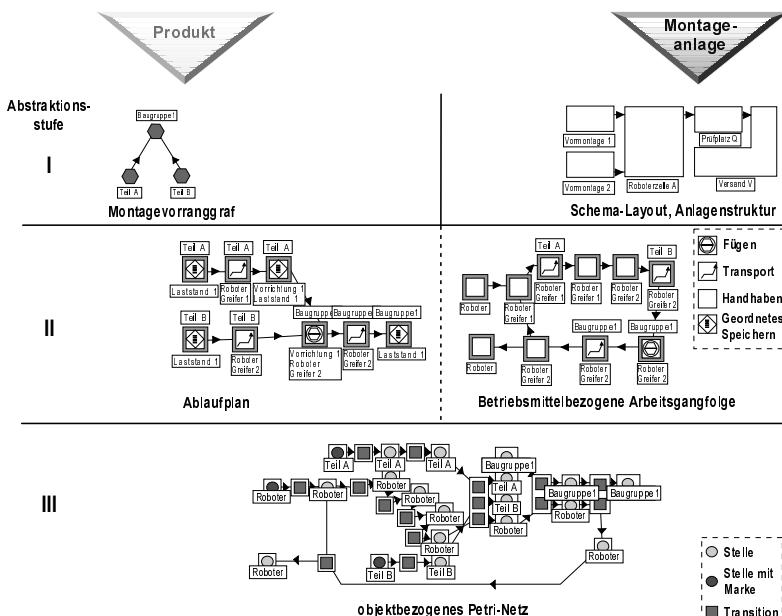


Abbildung 25: Hierarchische Detaillierung der Montagevorgangsbeschreibung

Abbildung 25 zeigt eine Übersicht der drei Abstraktionsstufen der Montagevorgangsbeschreibung aus Produkt- und Anlagensicht. Ein ganzes Produkt wird im Konstruktionsprozess nicht stets in allen Komponenten in der detailliertesten Darstellung abgebildet, da es beispielsweise für Normteile wie Schrauben genügt, ein entsprechendes Symbol anzugeben, wenn diese nicht das eigentlich zu erstellende Produkt, sondern nur Verbindungselemente sind. Genauso wenig müssen alle einzelnen Montageoperationen über das Petri-Netz beschrieben werden, oftmals genügt schon der Ablaufplan. Ist auf der Abstraktionsstufe 1 noch eine Trennung zwischen Produkt- und Anlagenstruktur gegeben,

ben, so wird diese bereits auf der zweiten Stufe teilweise aufgehoben und verschwindet in der detailliertesten Stufe vollständig. Durch die Möglichkeit der unterschiedlichen Sichtweisen wird der Forderung 2 (Berücksichtigung von Anlagen- und Produkteinflüssen, Kapitel 2.5.2) begegnet. Durch die Detaillierung der Beschreibungsmöglichkeit wird Forderung 3 (Durchgängigkeit von der Idee zur Realisierung, Kapitel 2.5.3) Genüge geleistet.

### 4.1.2.5 Einsatz für die Steuerung

Die geräteneutrale Beschreibung des Montagevorgangs umfasst in der hier vertretenen Sichtweise nicht nur die abstrakte Darstellung im Petri-Netz, sondern soll auch die Ablaufsteuerung abbilden können, um die Forderung 3 (s. Kapitel 2.5.3) vollständig abzudecken.

Innerhalb des Petri-Netzes werden in der obersten Hierarchieebene einzelne Bewegungsabläufe als jeweils eine Stelle dargestellt. Lediglich für eine genaue Beschreibung der Bewegungsbahn ist eine feinere Beschreibung notwendig; entweder erfolgt die Modellierung der Bewegungsbahn in einzelne Linearabschnitte durch Stellen und zwischengeschaltete Transitionen in einem untergeordneten Petri-Netz oder aber durch ein spezifisches Bewegungsprogramm für das Betriebsmittel. Das Petri-Netz kann zudem im Rahmen der Ablaufsteuerung für die Koordinierung des Gesamtlaufes in der Montageanlage eingesetzt werden.

Diese Ablaufsteuerung synchronisiert die einzelnen Betriebsmittel der Montageanlage. Die Betriebsmittel haben jeweils spezielle Steuerungen wie Robotersteuerung (RC) oder SPS, die für deren Bewegungen zuständig ist. Diesen Komponenten ist die Ablaufsteuerung der Zelle bzw. Anlage übergeordnet. Die Ablaufsteuerung ist daher auch in einer komponentenneutralen Sprache zu formulieren. Die gerätespezifische Umsetzung von neutral formulierten Steuerungsbefehlen erledigt die jeweilige Einzelsteuerung selbst.

Für diesen Zweck werden die Steuerungsbefehle aus dem MMS-Sprachumfang (s. Kapitel 3.2.3.1) eingesetzt. Da in der Steuerung nicht lediglich die Ausführung der einzelnen Montageoperationen koordiniert wird, sondern zusätzliche Statusabfragen und Variablenzugriffe für die einzelnen Komponenten erforderlich sein können, muss das jeweilige Petri-Netz an den entsprechenden Stellen um zusätzliche Elemente erweiterbar sein.

Diese Befehle werden quasi als Meta-Modell den einzelnen Elementen des Netzes zugewiesen und können so entweder Einzelaktionen wie Lese- und Schreiboperationen am Betriebsmittel bzw. dessen Steuerung ausführen oder die entsprechenden Teilprogramme in den Bewegungssteuerungen starten/stoppen etc. Darüber hinaus stehen noch Befehle für Verwaltungsaufgaben zur Verfügung. Eine genauere Vorstellung dieses Zuweisungsmechanismus' für MMS-Befehle an Elemente des Petri-Netzes folgt in Kapitel 4.3.2.

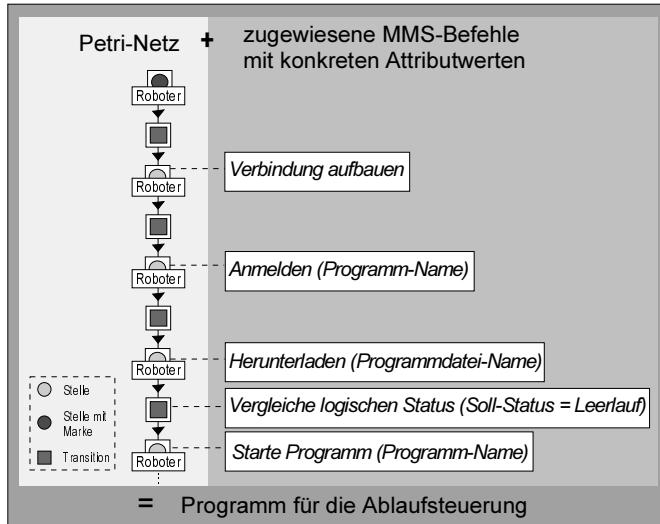


Abbildung 26: Das Petri-Netz wird um Steuerungsbefehle erweitert

Das Petri-Netz gibt die grobe Programmstruktur ähnlich einem abstrakten Flussdiagramm vor. Erst durch die konkret zugewiesenen Einzelbefehle für die Steuerung mit den entsprechenden Attributwerten für die Übergabeparameter wird das Programm für die Ablaufsteuerung vervollständigt (s. Abbildung 26).

Beim Ausführen des Montagevorgangs wird das Petri-Netz in der Ablaufsteuerung abgearbeitet. Eine Marke wandert dabei von Stelle zu Stelle durch das Petri-Netz. Der entsprechende Steuerungsbefehl einer Stelle wird interpretiert und ausgeführt, sobald die Marke diese Stelle erreicht hat. Nach erfolgreicher Abarbeitung des Steuerungsbefehls kann die Marke weiterwandern. Vor dem Überqueren einer Transition wird der ggf. dort hinterlegte Steuerungsbefehl – in der Regel nur eine Statusabfrage – ausgeführt. Die Marke kann die Transition nicht überqueren, solange die Statusabfrage erfolglos ist und der ermittelte Status mit der Sollvorgabe übereinstimmt. Sofern keine weiteren Bedingungen des Petri-Netzes dagegen sprechen (z. B. keine freie Kapazität auf der nachfolgenden Stelle), kann dann die neue Stelle markiert und der nächste Steuerungsbefehl angestoßen werden.

#### 4.1.3 Treiber des Planungsablaufs

##### 4.1.3.1 Unterschiedliche Prämisse

Die Planung des Montageablaufs und damit der Modellaufbau kann theoretisch von zwei grundsätzlich verschiedenen Seiten vorangetrieben werden: Entweder das Produkt oder die Montageanlage kann der dominierende Faktor sein (REINHART & CUUPER 1998). Im ersten Fall sind also der Montagevorgang und die Montageanlage bedingungslos an die Erfordernisse des Produktes anzupassen, im zweiten Fall sind der Montagevorgang und das Produkt so zu

gestalten, dass die Montage auf der Anlage stattfinden kann. Dabei ist es gleichgültig, ob das Produkt bzw. die Anlage bereits im Unternehmen etabliert ist und aus konservativen Gründen daran festgehalten werden soll, oder aber ob im Rahmen einer Innovation eine komplett neue Technologie für Produkt bzw. Montageanlage eingeführt werden soll. Beide Male ist das eine Gestaltungsobjekt der Treiber, der den Freiraum bei der Gestaltung der anderen beiden maßgeblich determiniert. Die Akzeptanz dieser Prämissen in der Planung ist wichtig für die Erfüllung der Forderung 2 aus Kapitel 2.5.2.

Im ersten Fall wird beispielsweise ein Produkt weitestgehend ohne Restriktionen konstruiert. Der dazugehörige Montageablauf sowie die benötigte Anlage werden entsprechend der Vorgaben des Produkts geplant, welche entweder durch die Funktion oder aber ästhetische Designaspekte definiert werden. Dies wird **rein produktgetriebene Montageplanung** benannt.

Im Umkehrfall gibt es zuerst eine konkrete Vorstellung einer Anlage, etwa eine bestehende Montagelinie. Soll nun ein neues Produkt auf dieser Anlage montiert werden, so hat es sich in seinen geometrischen Abmessungen und den benötigten Montageoperationen an den Anlagengegebenheiten zu orientieren. Die Leitidee ist die Maximierung der Anlageneffizienz zur Optimierung der Wirtschaftlichkeit. Dieser Fall wird mit dem Begriff **rein anlagengetriebene Montageplanung** belegt. Abbildung 27 zeigt den Zusammenhang. Die entgegengesetzten Dreiecksflächen symbolisieren das Gewicht der Treiber gegenüber einander zum jeweiligen Betrachtungspunkt.

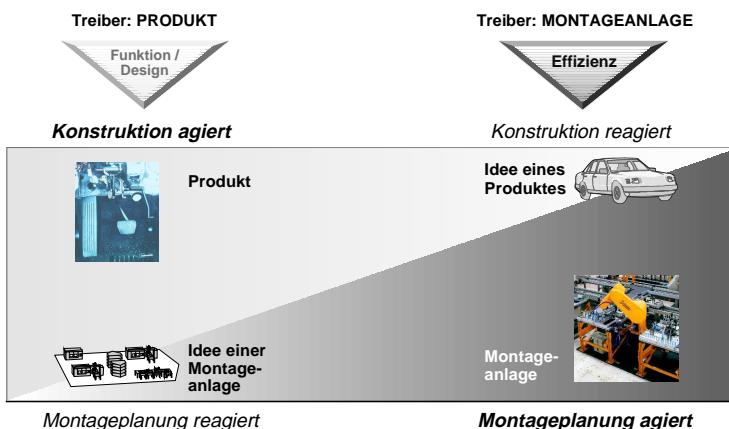


Abbildung 27: Treiber im Entwicklungsprozess

In einer abstrakteren Betrachtungsweise kann man davon sprechen, dass zu Beginn eines Entwicklungsprojektes sowohl für die Gestaltung des Produktes als auch des Montageablaufes als auch der Montageanlage eine unbegrenzte Vielfalt an Lösungsmöglichkeiten besteht. Nun geht es darum, zur Findung der geeigneten Lösungen die Anforderungen aufzustellen und den resultierenden Gestaltungsfreiraum für Produkt, Vorgang und Anlage zu verkleinern. Jede Festlegung eines Produktmerkmals engt also den Montageplaner ein, genauso wie jede Festlegung einer Anlageneigenschaft die Produktkonstruktion

in ihren Möglichkeiten einengt. Im produktgetriebenen Vorgehen wird der Planungsfreiraum durch das Produkt eingegrenzt, im Falle der anlagengetriebenen Planung wird der Konstruktionsfreiraum durch die Anlage determiniert.

#### 4.1.3.2 Vereinfachung des Treiber-Modells

Den Zusammenhang der Treiber könnte man theoretisch wie ein Zweistoffsystem interpretieren, das u.a. in der Chemie seine Anwendung findet. Zwischen der produktgetriebenen und der anlagengetriebenen Vorgehensweise gibt es im Modell das gesamte Spektrum an Zwischenformen, die nicht alle explizit zu benennen sind. Diese ergeben sich formal durch einen Anteil des Treibers Produkt zwischen 1 und 0 und einem entsprechenden Anteil des Treibers Anlage, wobei die Summe beider stets 1 ergibt.

Die beschriebenen theoretischen Extremausprägungen wird es in der betrieblichen Praxis in ihrer Reinform kaum geben. Auch die feine Untereinteilung in die jeweilige Zwischenform ist nicht unbedingt erforderlich, da sie einerseits in der Praxis schwer zu bestimmen sein dürfte und andererseits für das prinzipielle Verständnis keinen weiteren Nutzen bringt.

Zur Vereinfachung erfolgt deswegen eine Beschränkung auf die beiden Kategorien **überwiegend produktgetriebene** sowie die **überwiegend anlagengetriebene** Vorgehensweise (s. Abbildung 28).

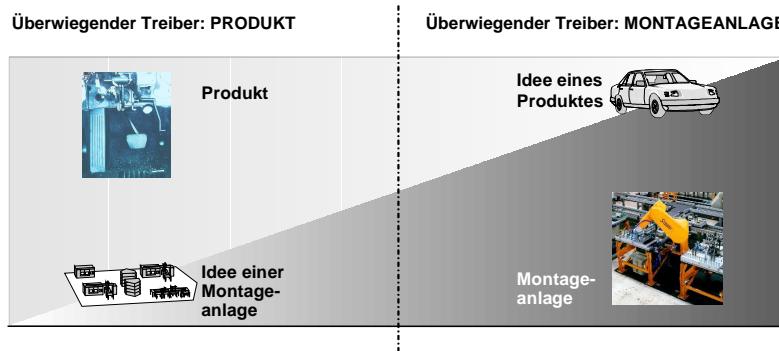


Abbildung 28: Einteilung nach dem überwiegend vorherrschenden Treiber

Als weitere Vereinfachung wird eine Verschmelzung der Kategorien ‚reiner‘ und ‚überwiegender‘ Treiber vorgenommen. Im Folgenden gibt es demnach nur noch die beiden Kategorien **produktgetriebene** und **anlagengetriebene** Vorgehensweise.

Die Einordnung eines konkreten Projekts erfolgt nun entsprechend des dominanten Treibers. Der Ablauf selbst findet aber in der senkrechten Ebene zur Zeichenebene der Abbildung 27 bzw. der Abbildung 28 statt. In Abbildung 29 sind zwei exemplarische Planungsabläufe zur Verdeutlichung eingezeichnet.

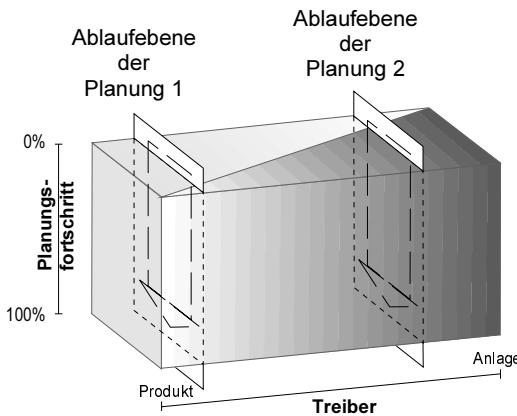


Abbildung 29: Die konkreten Planungsprojekte finden jeweils in einer Ablaufebene statt

#### 4.1.3.3 Kennzeichen der produktgetriebenen Planung

Das Prinzip der produktgetriebenen Planung besteht darin, dass in den einzelnen Entwicklungsstufen zunächst Vorgaben durch das zu montierende Produkt gemacht werden. Bei den Planungsschritten für den Montagevorgang wird auf die Vorgaben des Produktes eingegangen und zusammen mit den Daten über den Montagevorgang die Planung der Anlage determiniert. Es ist wichtig, trotz der generellen Dominanz des Produktes bereits Vorabinformationen weiterzugeben, um den Gesamtentwicklungsablauf zu minimieren. So lässt sich bereits mit der Produktstruktur eine entsprechende Anlagenstruktur aufbauen und später – mit der Verfügbarkeit der Informationen über die Komponenten – puzzlesteinartig detaillieren.

Dabei kann es sich um eine neue Produktidee handeln, die sukzessive detailliert wird, beispielsweise die Festlegung, ein Satellitennavigationssystem erstmals in einen neuen Autotyp einzubauen. Hier ist die exakte Geometrie der Komponente und der Ort des Einbaus im ersten Moment noch unklar, es ist aber wichtig, dass sich die Planung bereits darauf einstellt, mit zusätzlichen Komponenten im Montagevorgang operieren zu müssen.

Ähnlich verhält es sich beim Wiederverwenden einer bereits etablierten Technologie bzw. Geometrie einer Komponente oder des gesamten Produkts. Dies ist der Fall, wenn etwa die Entscheidung getroffen wird, in der Nachfolgegeneration eines Haushaltsgerätes den bewährten Elektromotor weiterhin zu verarbeiten. Diese Komponente ist dann schon detailliert bekannt und die Planung kann bereits mit Bekanntgabe der Entscheidung sehr viel detailliertere Ergebnisse erzielen als im ersten Beispiel. Solange aber die sonstigen geometrischen Randbedingungen der Einbaustelle und die vorgesehenen Verbindungstechniken nicht bekannt sind, kann auch nur mit den Zwischenständen der Produktentwicklung weitergearbeitet werden.

#### **4.1.3.4 Kennzeichen der anlagengetriebenen Planung**

Bei der anlagengetriebenen Planung werden die Vorgaben von der Montageanlage gemacht, d. h. durch die verfügbaren Einzelprozesstechnologien sowie die geometrischen Randbedingungen. Diese bedingen einen Ablauf des Montagevorgangs, sodass sich schlussendlich resultierende Freiräume für das Produkt ergeben.

Die anlagengetriebene Vorgehensweise erscheint in der bislang vom Produkt dominierten Montage ungewöhnlich. Jedoch lohnt diese Sichtweise nicht nur aus akademischem Blickwinkel, um partout einen Gegenpol aufzustellen. Vielmehr ist zu erwarten, dass der Gedanke an die Wiederverwendung von Montageanlagen im Zeitalter der sich verkürzenden Produktlebenszyklen sowie immer komplexeren und teureren Montageanlagen zunehmend an Aktualität gewinnt. Ein Beispiel für kurzlebige komplexe Produkte mit hoher Stückzahl und hohem Automatisierungsgrad in der Montage sind die Mobiltelefone. Bei nahe alljährlich stellen die Anbieter eine neue Modellpalette vor, können es sich in diesem umkämpften Markt mit sinkenden Gewinnmargen nicht leisten, dafür jedes Jahr eine komplett neue Anlage zu beschaffen. Auch Automobilfirmen gehen dazu über, die Montageanlage für die Nachfolgeserie weiterzuverwenden und in der Übergangsphase sogar alt und neu auf der gleichen Anlage zu produzieren – wie etwa Anfang 1998 beim neuen 3er Modell von BMW geschehen. Ein weiterer Schritt in diese Richtung ist das Ziel der Firma, die Zuordnung von Baureihe zu Werk aufzugeben, sodass zukünftig „in jedem Werk alle Fahrzeugbaureihen hergestellt werden könnten (ROSE 2000).“ Dies ist nur möglich, wenn sich die Produktgestaltung an die Vorgaben der installierten Anlagen hält.

Eine mögliche Fragestellung ist also: Wie muss das Nachfolgeprodukt aussen, damit diese Anlage wieder zum Einsatz kommt und damit erst vollständig amortisiert werden kann?

In diesem Fall ist die Anlagenstruktur in Form der Gesamtkoordination (Ablaufsteuerung) schon vorhanden, die auch für das neue Produkt den Montageablauf vorgibt. In den Details, insbesondere bei den einzelnen Fügebewegungen, sind aber Anpassungen nötig.

Der nächste Schritt wäre dann, die Anlage grundsätzlich früher zu definieren, um auch bei einer Neuplanung von Produkt und Anlage die Aspekte der Anlageneffizienz stärker zu betonen. Im Bereich der spanenden Fertigung ist der Gedanke viel weiter verbreitet, dass der Arbeitsraum einer Maschine die Abmessungen des Produkts bestimmt und Sondermaschinen meist nicht anschafft werden können. Trotzdem darf nicht vergessen werden, dass das Produkt der zu verkaufende Teil ist, der trotz aller betriebsinternen Reglementierungen auf dem Markt bestehen muss, um dem Unternehmen Geldzuflüsse und damit den Fortbestand zu sichern.

Die Berücksichtigung von Produkt oder Anlage als ausschlaggebendem Treiber im Entwicklungsablauf begegnet unmittelbar der Forderung 2 aus Kapitel 2.5.2.

### 4.1.4 Steuerungskonzept

Für das Konzept der Anlagensteuerung gelten neben den drei zentralen Forderungen dieser Arbeit (s. Kapitel 2.5) zusätzlich noch globale Anforderungen. Außer dem Wirtschaftlichkeitsprinzip ist die Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von elementarer Bedeutung für ein modernes Unternehmen, um dessen langfristige Existenz sicherzustellen (REINHART 2000). Neben der bereits vorausgeplanten Flexibilität muss hierfür auch die Fähigkeit eines schnellen Reagierens implementiert werden, um unerwartet eintreffende Situationen optimal zu bewältigen.

Es gilt also, die Reaktionsfähigkeit im Bereich automatisierter Montagevorgänge (vgl. Zielsetzung der Arbeit, Kapitel 2.4) zu maximieren. Dies betrifft einerseits den Planer selbst, der durch seine Kreativität einen entscheidenden Beitrag leistet; dies kann aber im Vorgehensmodell nicht abgebildet werden. Andererseits müssen der Planungsablauf selbst sowie das Planungsergebnis - das Konzept der Steuerung - entsprechend gestaltet werden.

Hierfür sind folgende Bedingungen zu erfüllen:

- Innerhalb einer Anlage ist die Integration unterschiedlichster automatisierter Komponenten zu ermöglichen. Somit kann auf Änderungen im Anforderungsprofil an die Anlage eine schnelle Reaktion erfolgen.
- Die konkrete Entscheidung für die jeweiligen Kandidaten kann erst sehr spät erfolgen. Dadurch bleibt der Handlungsspielraum während der Planung offen, ohne dass Zwischenergebnisse ungültig werden.
- Bei geänderten Randbedingungen muss die Konfiguration nachträglich schnell änderbar sein. Somit ist auch später ein Umrüsten der Anlage einfach durchzuführen.

Um diesen Bedingungen Rechnung zu tragen, wird zunächst das Verhalten eines jeden Betriebsmittels während des Montageablaufes separat modelliert. Somit lässt sich der modulare Charakter auf Komponentenebene auch in der Steuerung abbilden. In der Umsetzung kann dann eine einzige Steuerungskomponente die verschiedenen Verhaltensmuster der Einzelmodule durchaus parallel verwalten und bei der Abarbeitung des Gesamtablaufes koordinieren.

Der hier verfolgte Ansatz sieht eine hierarchische Steuerungsarchitektur vor. Die oberste betrachtete Ebene (s. Kapitel 2.3) stellt die **Leitsteuerungsebene** (s. Kapitel 3.2.2.1 und Abbildung 4) dar. Über das PPS-System wird ein Auftrag in eine Anlage eingelastet.

Auf **Anlagenebene** und auch auf **Zellenebene** koordiniert die (ggf. jeweilige) Ablaufsteuerung (s. Kapitel 3.2.1) in der Funktion als Zellen- bzw. Gruppensteuerung das Zusammenspiel der aktiven und passiven Teilnehmer am Montagevorgang und kommuniziert in einer neutralen Sprache mit den untergeordneten Einzelsteuerungen der Betriebsmittel. Das bedeutet, dass die diversen Stati der Objekte überwacht und der Start der Betriebsmittelbewegungen für die Teilschritte der Montage von der Ablaufsteuerung ausgelöst werden.

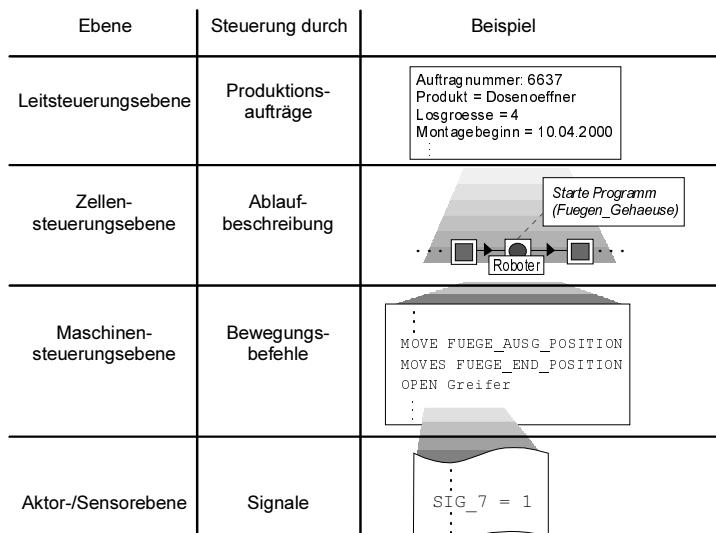


Abbildung 30: Aufbau und Elemente des hierarchischen Steuerungskonzepts

Die Bewegung des konkreten Betriebsmittels ist aber von sehr vielen spezifischen Parametern abhängig, sodass hierfür auch meist eine dem Betriebsmittel angepasste Bewegungssteuerung eingesetzt wird. Diese kann sich mit den einzelnen Betriebsmittelaktoren und -sensoren über elektrische Signale (I/O-Signale) direkt austauschen (s. Abbildung 30). Die Bewegungssteuerung samt Betriebsmittel bildet eine modulare Komponente der Anlage, die aufgrund derselben informationstechnischen Schnittstelle leicht gegen ein anderes Modul mit gleichem Funktionsumfang ausgetauscht werden kann.

Die Steuerungsplanung wird in dieser Arbeit insbesondere in der Ebene der Zellensteuerung betrachtet, da dort die größten Nutzenpotentiale (z.B. einfacher generischer Aufbau, Wiederverwendbarkeit, Modifizierbarkeit und Analysebarkeit) erschlossen werden können. Lösungen für Einzelkomponenten wurden bereits in Kapitel 3.6 beschrieben.

#### 4.1.5 Kommunikationssprache in der Steuerungshierarchie

Neben der informationstechnischen Schnittstelle, die eine Signalübertragung zwischen Sender und Empfänger prinzipiell definiert (s. Kapitel 3.1.2), ist das syntaktische und semantische Format der auszutauschenden Nachrichten festzulegen – die gemeinsame Sprache. Diese Sprache soll eine Kommunikation der unterschiedlichsten Hard- und Software-Komponenten ermöglichen, um die Flexibilität im Montagesystem zu maximieren (Erfüllung der Forderung 3 nach Durchgängigkeit). Ferner sollte der Sprachumfang die Aufgabengebiete einer Steuerung optimal abdecken.

MMS (s. Kapitel 3.2.3.1) entspricht vom Abstraktionsgrad des Befehlevorrates genau den Anforderungen für eine Kommunikation zwischen den Hierarchiestufen Anlagen- bzw. Zellenebene mit den Einzelsteuerungen der Komponenten in der Steuerungsarchitektur. Durch den Einsatz von VMDs können beliebige Automatisierungskomponenten relativ aufwandsminimal in die Steuerungsarchitektur eingebunden werden. Deswegen wird hier auf diesen Standard zurückgegriffen als Sprache für die Kommunikation zwischen Ablauf- und Komponentensteuerung. MMS kann sowohl einzelne Programme und Unterprogramme verwalten und deren Ausführung beeinflussen, als auch auf diverse Variablen zugreifen. Durch entsprechend gestaltete Programme könnte man sogar einen Zugriff aus der Anlagen- oder Zellenebene direkt auf die Sensor-/Aktor-Ebene mittels MMS-Befehlen realisieren. Diese Wahl befriedigt die Forderung 3 nach Durchgängigkeit, insbesondere aber die im vorangegangenen Teilkapitel 4.1.4 zusätzlich aufgestellten Bedingungen an das Steuerungskonzept.

Um den Anwendungsbereich dieses Konzeptes auch auf die SPSen zu erweitern, wurde eine Konvention getroffen, damit durch das MMS-Konzept auch der IEC 1131-3 Standard abbildungbar ist (s. Abbildung 31).

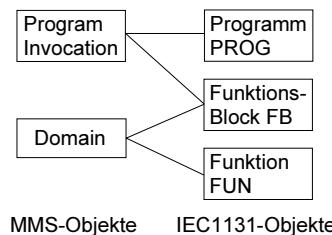


Abbildung 31: Zuordnung MMS zu IEC 1131

Die beiden Grundgedanken der Konvention sind:

- Die einzelnen Program Invocations (PI) von MMS sind den Programmorganisationseinheiten (POE) gleichgesetzt. Dabei ist eine PI entweder als Gesamtprogramm (PROG) oder Funktionsbaustein (FB) einsetzbar.
- Die Domains aus MMS sind ebenfalls POE, können allerdings nur als FB oder Funktion (FUN) verwendet werden.

Somit ist dieses Konzept prinzipiell auch für die Steuerung von Anlagen einsetzbar, deren Planung unter der Maßgabe der IEC 1131-3 stattfindet.

### 4.1.6 Zusammenspiel der Vorgangsbeschreibung und der Steuerungshierarchie

Bei der Planung der Steuerung ist einerseits auf die Hierarchiestufen im Hardware-Steuerungskonzept Rücksicht zu nehmen, andererseits soll die Allgemeingültigkeit der Steuerungsbeschreibung weitestgehend sichergestellt bleiben.

In der Modellierung der Anlage und des Montageablaufes ist vom Anwender ein Gesamtkonzept zu erstellen, das die Aufteilung der Hierarchisierung fest- schreibt. Theoretisch sind dabei zwei gegensätzliche Extrema denkbar:

Einerseits kann die Philosophie vertreten werden, alle Abläufe in der Komponentensteuerung zu hinterlegen und ein ‚minimales‘ Petrinetz in der Vorgangs- beschreibung abzubilden. Dieses startet im Wesentlichen nur das komplexe Programm der Komponentensteuerung, welches dann die einzelnen Funktionalitäten übernimmt.

Andererseits lässt sich das Steuerungsmodell im Petri-Netz bis zur Sensor-/ Aktorebene aufgliedern, sodass der Steuerungsablauf durch eine verfeinerte Darstellung in niedrigeren Hierarchiestufen abgebildet und die Bewegungs- steuerung somit auch von der übergeordneten Ablaufsteuerung ausgeführt werden kann. Der Komponentensteuerung des Betriebsmittels fallen dann kaum mehr Aufgaben zu, die Zellensteuerung greift direkt auf die unterste Hie- rarchieebene durch (s. Abbildung 32).

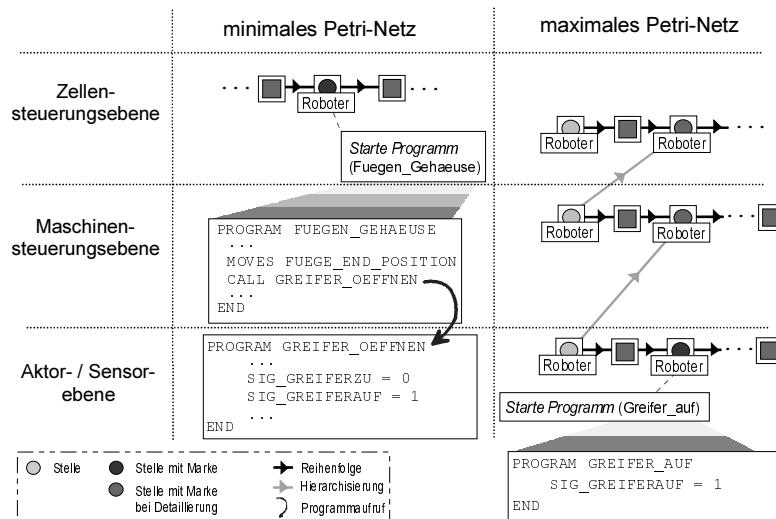


Abbildung 32: Modellierung der Hierarchie im Petrinetz oder in den einzelnen Komponenten

Beide Extrema reduzieren die Allgemeingültigkeit der Vorgangsbeschreibung: Im ersten Fall ist die gesamte Steuerungslogik in der Komponentenebene ge- kapselt, d.h. sowohl spezifisch erstellt als auch physikalisch nicht in der Ablaufsteuerung verfügbar. Im zweiten Fall ist die Aktor-/Sensorebene sehr ge- nau festgelegt, die in einer anderen Anlagenkonfiguration nicht mehr mit dem gleichen Petri-Netz zu bedienen wäre.

In der Realität wird immer eine Mischform auftreten, wobei es einen generellen optimalen Grad der Aufteilung nicht geben kann, da zu viele Randbedingun- gen einen Einfluss nehmen. Hier ist durch die Erfahrung des Planers und die

Anforderungen der konkreten Anlagenkonfiguration eine individuelle Abstimmung erforderlich. Die Überlegungen zielen auf eine Erfüllung der Forderung 2 (hier: Berücksichtigung der Anlageneinflüsse) und Forderung 3 (Durchgängigkeit).

### 4.1.7 Symbole für die Steuerungsbefehle

Die Beschreibung des Montagevorgangs stützt sich auf die Symbole nach VDI 2860 (s. Kapitel 4.1.2.4). Damit nun auch die Erstellung des Ablaufprogramms aus MMS-Befehlen diesem Paradigma der grafikorientierten Prozessbeschreibung folgt, wurden Symbole für die einzelnen Befehle entworfen. Die Entwicklungstendenz der Softwaretools der letzten Jahre hin zu verstärkter grafischer Darstellung und Interaktion wird dadurch auch für die Steuerprogrammerstellung aufgegriffen. Die Symbolik (s. Abbildung 33 bis Abbildung 36) ist nach bestimmten Leitgedanken aufgebaut:

- Program Invocation, abgekürzt PI, wird durch den griechischen Buchstaben „π“ dargestellt.
- Start und Stop wird durch eine Verkehrsampel mit eingeschaltetem grünen bzw. roten Licht dargestellt.
- Für Lesevorgänge ist ein Auge, für Schreibvorgänge ein Stift vorgesehen.
- Die Unterscheidung in logische, ganzzahlige, rationale und textuelle Variablen erfolgt durch jeweils ein Symbol.
- Der Verbindungsauf- und -abbau wird über eine stilisierte Steckkupplung angezeigt.

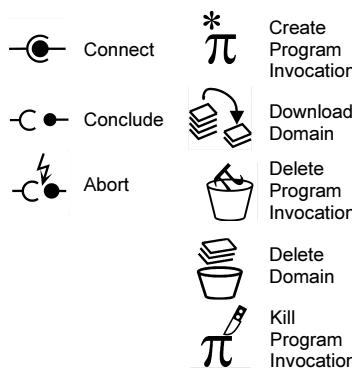


Abbildung 33: Symbolik zu den MMS-Befehlen - Verwaltungsaufgaben

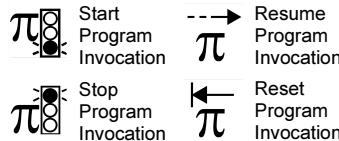


Abbildung 34: Symbolik zu den MMS-Befehlen - Programmausführung

0/1	Read Boolean Variable	0/1	Write Boolean Variable
123	Read Integer Variable	123	Write Integer Variable
1,23	Read Float Variable	1,23	Write Float Variable

Abbildung 35: Symbolik zu den MMS-Befehlen - Variablenzugriff

0/1	Compare Boolean Variable	A→B	Compare PI Logical Status
123	Compare Integer Variable	123	Compare PI Physical Status
1,23	Compare Float Variable		

Abbildung 36: Symbolik zu den MMS-Befehlen - Statusvergleich

#### 4.1.8 Resümee der Konzeptgrundlagen

Um den Montagevorgang als eigenständiges Planungsobjekt operativ leichter bearbeiten zu können, wurde in diesem Kapitel nach dem Leitsatz „divide et impera“ eine Unterteilung in fünf verschiedene **Teilvorgänge** vorgenommen: **Elementare Montagebewegung**, **Annähern/Verlassen der Fügestelle**, **Periphere Montagebewegung**, **Be-/Entladen der Bereitstellung** und **Werkstückunabhängiger Nebenprozess**.

Am Montagevorgang wirken die Produktkomponenten als **passive Teilnehmer**, die Betriebsmittel je nach Rolle als **aktive** oder **statische Teilnehmer** mit.

Bei der Gestaltung der Montagevorgangsbeschreibung können das **Produkt** oder die **Montageanlage** der jeweils relevante **Treiber** sein. Das bedeutet einerseits, dass die Vorgaben, die vom jeweils als Treiber bestimmten Gestaltungsobjekt gemacht werden, bei der Planung der übrigen zu beachten sind, und andererseits, dass situationsabhängig sowohl Einflüsse vom Produkt oder aber auch von der Anlage zu berücksichtigen sind.

## 4.2 Vorgehen zur Gestaltung des Montagevorgangs

---

Diese drei Bestandteile des Konzepts sind für die Erfüllung der Forderungen 1 (Prozessplanung) und 2 (Einfluss von Produkt und Anlage) aus Kapitel 2.5 elementar.

Die Beschreibung des Montagevorgangs erfolgt je nach Planungsaufgabe in einer unterschiedlichen Hierarchiestufe: Die abstrakteste Darstellung ist die Reihenfolgestruktur als **Vorranggraf** oder **Anlagenstruktur**, gefolgt vom **Ablaufplan** (aus Produktsicht) oder **Arbeitsgangfolge** (aus Betriebsmittelsicht). Der Einsatz von objektbezogenen **Petri-Netzen** ist die detaillierteste Beschreibungsform. Das Petri-Netz wird um **Steuerungsbefehle** erweitert, um es für die Ablaufsteuerung in einer automatisierten Montagezelle einzusetzen.

Das hierarchische Steuerungskonzept sieht die **Ablaufsteuerung** unterhalb der **Auftragssteuerung** vor. Sie koordiniert die einzelnen Bewegungsabläufe der Zellenkomponenten. Deren jeweilige Steuerung ist in der Hierarchie unter der Ablaufsteuerung angeordnet. Sie verarbeitet die spezifischen Bewegungsprogramme des jeweils zugehörigen Roboters oder sonstigen Manipulators etc. Innerhalb der **Komponentensteuerung** ist meist auch die Sensor-/ Aktorebene abgedeckt. Die Steuerungsbefehle der Ablaufsteuerung sind im komponentenneutralen **MMS**-Format abgelegt. Diese sind durch neu entworfene **Symbole** repräsentierbar.

Insbesondere die Forderung 3 (Durchgängigkeit) aus Kapitel 2.5 findet in den beiden letztgenannten Punkten Berücksichtigung.

## 4.2 Vorgehen zur Gestaltung des Montagevorgangs

Der im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Ausschnitt der Produktentwicklung umfasst im Wesentlichen die Montage- und Steuerungsplanung sowie die Wechselwirkung zur Produktkonstruktion. Dabei gilt es, im Rahmen der Planung die drei Gestaltungselemente Produkt, Montageanlage und Montagevorgangsbeschreibung in optimaler Weise aufeinander abzustimmen (s. Kapitel 2.3). Für die Planung kommen Computer zum Einsatz, um einerseits schnell Daten zu generieren, verifizieren und validieren zu können, andererseits lassen sich die Arbeitsergebnisse sofort zur Weiterbearbeitung übermitteln und Änderungen an den Gestaltungselementen verhältnismäßig einfach vornehmen. Während der computergestützten Planung wird also ein Modell dieser Gestaltungselemente rechnerintern erstellt, welches letztendlich auch als Basis für den Betrieb der realen Anlage dienen kann. Die Grundidee der vorgestellten prinzipiellen Planungsvorgehensweise ist jedoch nicht an bestimmte Rechnersysteme gebunden. Der Planungsablauf geht auf alle drei Forderungen aus Kapitel 2.5 ein.

### 4.2.1 Gesamtübersicht

Das für die Planung des Montagevorgangs hier neu erarbeitete Vorgehensmodell ist dreistufig aufgebaut, wobei in den einzelnen Stufen mehrere Planungsschritte angesiedelt sind (s. Abbildung 37): Ausgehend von der Strukturfestlegung (s. Kapitel 4.1.2.1) werden in der anschließenden zweiten Stufe die einzelnen Teiltätigkeiten (s. Kapitel 4.1.2.2) geplant. Die Einteilung der Monta-

gevorgangsbeschreibung in Teiltätigkeiten erleichtert einerseits das strukturierte Vorgehen und unterstützt andererseits die Vollständigkeitsprüfung („sind alle Kategorien von Teiltätigkeiten geplant?“). Die dritte Stufe befasst sich mit der Synchronisation der einzelnen Teilschritte (s. Kapitel 4.1.2.3).

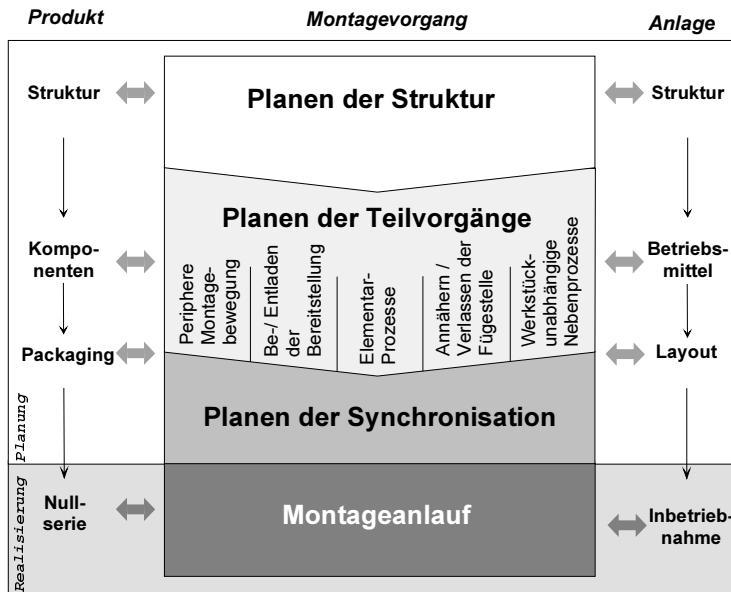


Abbildung 37: Die Schritte zur Gestaltung des Montagevorgangs

Durch diesen gestuften Ablauf erfolgt eine fortschreitende Detaillierung der Montagevorgangsbeschreibung. Dafür stehen die unterschiedlichen Notationen in den jeweiligen Abstraktionsstufen (s. Abbildung 25) zum Einsatz bereit, wodurch auf die tatsächlich zu behandelnde Aufgabenstellung eingegangen werden kann. Im Anschluss an diese drei Planungsstufen erfolgt die Inbetriebnahme der Anlage und der Anlauf der Montage, was ebenfalls in den Bereich der Gestaltung der Montagevorgangsbeschreibung gehört. Hier stellt sich in Abhängigkeit von den unerwartet auftretenden Schwierigkeiten die Qualität der Planung – im Sinne einer ‚geistigen Vorwegnahme‘ – heraus.

Besonders innerhalb der Planungsstufen 2 und 3 gilt es, eine Reihe von untergeordneten Aufgaben zu erledigen. Dabei handelt es sich um die Planungsschritte für die fünf unterschiedlichen Teiltätigkeiten sowie die drei Arbeitspakete zur Synchronisation. Diese Schritte werden in Abhängigkeit vom vorliegenden Treiber der Planung in unterschiedlicher Reihenfolge abgearbeitet, was in den nachfolgenden Teilkapiteln vertieft dargestellt ist.

Die Planung des Montagevorgangs kann nicht isoliert stattfinden, es bestehen intensive Beziehungen zu den Gestaltungsprozessen des Produktes und der Anlage. Abbildung 37 verdeutlicht den gesamten Zusammenhang. Hier sind analoge Entwicklungsschritte von Produkt, Montagevorgang und Anlage auf-

geführt. Auf der jeweils gleichen Detaillierungsstufe bestehen die stärksten Querbeziehungen. In den nächsten beiden Abschnitten werden nun je eine produktgetriebene und eine anlagengetriebene Planung in ihrem Ablauf beschrieben. Dabei sind die Unterschiede einerseits in der Art der Beziehung der Montagevorgangsgestaltung zu den beiden Bereichen Produkt und Anlage sowie andererseits innerhalb der Bearbeitungsreihenfolge der Planungsschritte in der zweiten Planungsstufe auszumachen. Die beiden Abläufe sind jeweils als Idealplanung anzusehen, die in der tatsächlichen Anwendung situationsbezogene Anpassungen erfordern.

In der Praxis wird die jeweilige Planungsfolge beibehalten. Allerdings werden alle Schritte in einer Iteration nochmals durchlaufen, um Bedenken oder K.O.-Kriterien der anderen Seite noch berücksichtigen zu können. Der erste Durchlauf ist quasi eine Analyse des treibenden Gestaltungselements (Produkt oder Anlage) und die Aufstellung der Idealanforderungen an die andere Seite. Diese Wunschliste wird nun aus Sicht des anderen Gestaltungselements (also: Anlage oder Produkt) und hinblicklich der verfügbaren Möglichkeiten untersucht. Die Auflagen werden anschließend zurückgemeldet. Dann erfolgt eine Abwägung der beiden Vorstellungen unter Berücksichtigung des überwiegenden Treibers. In der zweiten Iteration erfolgt ggf. eine Modifikation des treibenden Gestaltungselements und dann die Gestaltung des entsprechenden Teillvorgangs und der zugehörigen Komponente des nichttreibenden Gestaltungselements.

Zur Kennzeichnung der Reihenfolgebeziehungen wird für die produktgetriebene Planung die Zählweise ‚Stufe 1 P‘, ‚Stufe 2 P‘ etc. benutzt, im anderen Fall ‚Stufe 1 A‘, ‚Stufe 2 A‘, usw. analog.

### 4.2.2 Ablauf der produktgetriebenen Planung

#### 4.2.2.1 Stufe 1 P: Generelle Montagereihenfolge in Form der Produktstruktur

Die produktgetriebene Planung startet in der Regel mit der montageorientierten Produktstruktur, die aus der Produktkonstruktion stammt und gleichzeitig den Vorranggrafen darstellt. Dieser Vorranggraf bildet die strukturelle Grundlage für die Montagevorgangsbeschreibung.

Die Montagevorgangsbeschreibung wird als Ablaufplan zunächst grob skizziert. Im Laufe der fortschreitenden Planung erfolgt die Ausdetaillierung. Dieser Ablaufplan besteht aus einzelnen Montageaufgaben, die jeweils die Beschreibung der notwendigen Tätigkeiten umfassen.

In der Ausgangskonfiguration sind im Ablaufplan lediglich die elementar notwendigen Aufgaben enthalten. Dabei handelt es sich um das Speichern der Ausgangsteile und Endprodukte sowie die Fügeoperationen beim Zusammentreffen von Komponenten und Verschmelzen zu einer neuen Baugruppe höherer Ordnung.

Nach der Freigabe der ersten Produktgeometrien im Entwicklungsprozess kann umgehend in der Montageplanung damit gearbeitet werden. Im produkt-

getriebenen Fall der Montagevorgangsplanung sind Festlegungen über eine konkrete Anlage möglichst spät zu treffen, weil diese gegebenenfalls die Möglichkeiten der Prozessgestaltung unnötig früh einengen könnten. Also werden zunächst die Planungen allein mit den Produktgeometrien vorgenommen.

#### **4.2.2.2 Stufe 2 P – Planen der Teilvergänge**

##### **a) Stufe 2 – 1 P: Elementare Montagebewegung**

Den nächsten Schritt der Montagevorgangsplanung bildet die Festlegung der elementaren Montagebewegung, d.h. die eigentliche Fügebewegung der zu montierenden Komponenten, welche den Kern des Montageprozesses darstellt. Für die Planung dieser elementaren Montagebewegung werden die Geometriemodelle der Produktkomponenten in einem 3D-Simulationswerkzeug gegeneinander bewegt, um einerseits die generelle Machbarkeit zu überprüfen und andererseits eine optimierte Bewegungsbahn zu finden. Hierfür kann teilweise auch auf Algorithmen in den entsprechenden Planungssystemen zurückgegriffen werden (z.B. KUGELMANN 1999).

Für diese Montageaufgaben mit ihren festgelegten Elementarbewegungen sind nun die entsprechenden direkt mit dem Produkt verbundenen primären Betriebsmittel für die Handhabung, wie etwa Greifer, auszuwählen. Deren Leistungsangebot (Tragkraft, Bewegungsraum, etc.) muss selbstverständlich mit dem benötigten Funktionsumfang übereinstimmen. Diese direkten Betriebsmittel haben oft keine eigene Steuerung, sondern werden über ein indirektes Betriebsmittel bewegt, z. B. Roboter. Die Beschreibung der Bewegung im Simulationsprogramm erfolgt daher zunächst mit einer neutralen Kinematik, die später adaptiert wird.

##### **b) Stufe 2 – 2 P: Annähern / Verlassen der Fügestelle**

Mit dem festgelegten Betriebsmittel kann nun eine Erweiterung des Bewegungskerns erfolgen, beispielsweise Annähern von Greifer mit Bauteil zur Startposition und Entfernen nach Abschluss einer Fügeoperation. Bei Verwendung eines Simulationstools kann gegebenenfalls auf eine automatische Bahnplanung zurückgegriffen werden. Beim Annähern muss bereits die richtige Bauteilorientierung erfolgen.

Durch die Auswahl eines Betriebsmittels ist in der Regel auch die Steuerung bereits festgelegt. Somit kann die Planung hier nicht nur abstrakt geometrisch als Bahnkurvenplanung erfolgen, sondern auch detailliert und das Steuerungsprogramm in der entsprechenden Sprache der Komponentensteuerung erstellt werden.

##### **c) Stufe 2 – 3 P: Peripherie Montagebewegung**

Als nächstes ist das Ergänzen der indirekten Betriebsmittel vorzunehmen. Die neutrale Bewegungsbeschreibung wird auf die spezifische Bahnsteuerung transponiert, zusätzliche Bewegungen wie Übergänge zweier Kernbewegungen bzw. Annähern/Verlassen werden ergänzt. Idealerweise sind im Simulationsprogramm Modelle vorhanden, die auch die Programmiersprache der realen Betriebsmittel verwenden (z. B. V+ für Roboter).

**d) Stufe 2 – 4 P: Be-/Entladen der Bereitstellung**

Stehen dann zusätzlich die Bereitstellungskomponenten wie Magazine oder Transportbehälter fest, so wird in diesem Schritt deren Ent-/Beladung geplant. Hier kann ggf. ebenfalls auf eine automatische Bahngenerierung in der Simulation zurückgegriffen werden.

**e) Stufe 2 – 5 P: Werkstückunabhängige Nebenprozesse**

Sind bereits Teilbereiche der Montageanlage geplant, findet ein Erweitern des Betriebsmittelgesamtablaufs um werkstückunabhängige Nebenprozesse (Greifwerchsel etc.) statt.

**4.2.2.3 Stufe 3 P: Synchronisation**

Zuletzt erfolgt die Koordination aller Betriebsmittel im Rahmen des Gesamtablaufes. Um diese Nebenprozesse und den Gesamtablauf planen zu können, ist eine weitaus feinere Prozessdarstellung nötig, als sie der Ablaufplan bietet. Hierfür kommt das Petri-Netz zum Einsatz. Es wird bereits während der Ablaufplanung vom Planungssystem automatisch im Hintergrund angelegt und bildet die eigentliche Prozessbeschreibung. Die Durchführung der drei hierunter fallenden Planungsschritte ist weniger vom Treiber der Planung als vielmehr vom Arbeitsstil des Planers selbst abhängig und kann nicht allgemein angegeben werden.

**4.2.2.4 Stufe 4 P: Montageanlauf**

Nach dem Aufbau und der Justage der Anlage erfolgt die Inbetriebnahme. Dazu wird der Montageablauf mit reduzierter Geschwindigkeit und ggf. ohne Teile durchgespielt. Später wird die Nullserie hergestellt und danach erfolgt der Hochlauf auf die Nennstückzahl. Um die offline programmierten Bewegungsabläufe der Roboter und anderer automatisierter Komponenten einzusetzen zu können, müssen u.U. besondere Maßnahmen getroffen werden, die eine Kalibrierung der realen Hardware und ggf. Programmadaption bewirken. Hierfür sei auf diverse Arbeiten zum Thema verwiesen, z.B. das System OPTIS (Roos 1998, S. 59 - 169).

#### 4.2.2.5 Gesamtdarstellung der produktgetriebenen Planung

Der Ablauf der produktgetriebenen Planung ist in Abbildung 38 zu sehen.

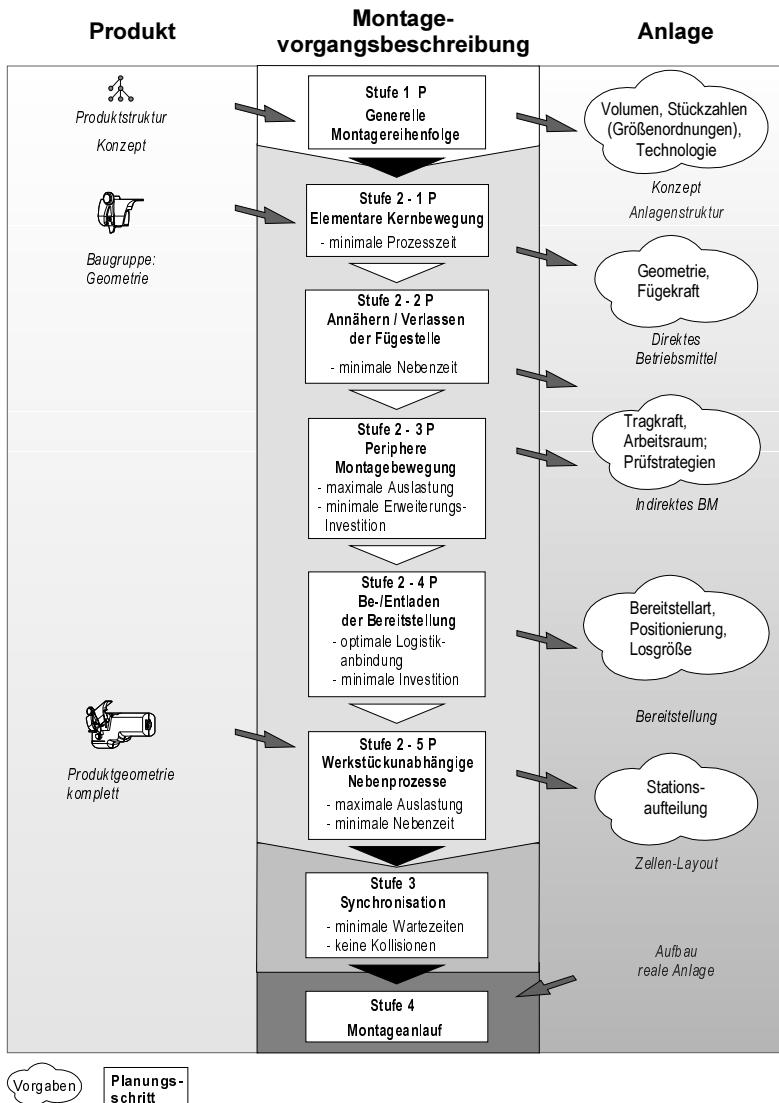


Abbildung 38: Gesamtdarstellung der produktgetriebenen Montagevorgangsplanung

### 4.2.3 Ablauf der anlagengetriebenen Planung

#### 4.2.3.1 Stufe 1 A: Generelle Montagereihenfolge in Form des Montageablaufs in der Anlage

Der Montageablauf in der Anlage ist die Eingangsgröße dieses Planungsschrittes. Einerseits gibt die Aufteilung in Vor- und Hauptmontage bereits einen Anhaltspunkt für die Anzahl der möglichen eigenständigen Produktkomponenten. Zusätzlich gibt die Zahl der Arbeitsstationen eine ungefähre Anzahl an möglichen Montageoperationen vor. Neben diesen Vorgaben an die Produktgestaltung kann die Reihenfolgestruktur als Ergebnis des Planungsschrittes weitergegeben werden.

#### 4.2.3.2 Stufe 2 A: Planen der Teilvergänge

##### a) Stufe 2 – 1 A: Werkstückunabhängige Nebenprozesse

Die Detaillierung der Reihenfolgestruktur kann im anlagengetriebenen Fall zunächst bei den werkstückunabhängigen Nebenprozessen erfolgen. Hierfür sind zumindest die indirekten Betriebsmittel notwendig. Wird eine bestehende Anlage mit ihren Betriebsmitteln weiterverwendet, sind in der Regel die Beschreibungen der Greiferaufnahme etc. bereits vorhanden und können einfach übernommen oder auch optimiert werden. Die Prämisse ist die Reduzierung der Nebenzeiten. Bei Errichtung einer neuen Anlage kann trotzdem bereits begonnen werden, diese Nebenprozesse zu planen, auch wenn später erst der endgültige Abschluss möglich ist.

##### b) Stufe 2 – 2 A: Periphere Montagebewegung

Hier sind die möglichen Bewegungen zwischen einzelnen Montageoperationen zu untersuchen. Gleichzeitig können maximal mögliche Hüllvolumen und Massen bestimmt werden, die in der Produktgestaltung einzuhalten sind.

##### c) Stufe 2 – 3 A: Be-/Entladen der Bereitstellung

Dieser Schritt soll die Anbindung an die Logistik optimieren. Die Magazine definieren sowohl die Hüllvolumen der Komponenten als auch die Losgröße, in der produziert werden kann. Die explizite Formulierung der Bewegungsbahn kann aber gegebenenfalls erst nach Festlegen der Produktgeometrie erfolgen.

##### c) Stufe 2 – 4 A: Annähern / Verlassen der Fügestelle

Unter der Maßgabe der Hüllvolumenvorgabe und nach Entscheidung für direkte Betriebsmittel, kann die Planung für das Annähern und Verlassen der Fügestelle stattfinden. Hier ist das Augenmerk auf die minimale Nebenzeiten zu legen.

##### c) Stufe 2 – 5 A: Elementare Montagebewegung

Ohne Kenntnis der konkreten Produktgeometrie ist dieser Schritt freilich nicht vollständig abzuschließen. Allerdings können durch die Anlage Vorgaben für die Montagerichtung gemacht werden, z.B. linear, senkrecht von oben etc. Zudem können hier Vorgaben zur Verbindungstechnik gemacht werden, z.B.

Schnappen mit dem in den übrigen Schritten eingesetzten Handhabungsgerät oder aber Schrauben und Kleben mit zusätzlichen Betriebsmitteln. Erst nachdem das Produkt fertig konstruiert ist, erfolgt der Abschluss dieses Schrittes.

#### **4.2.3.3 Stufe 3 A: Synchronisation**

Diese Planungsstufe wird ebenso wie P3 im produktgetriebenen Fall überwiegend situationsspezifisch abgearbeitet. Im Falle der Wiederverwendung von Anlagen oder -teilen ist unter Umständen für Teilbereiche des Montagevorgangs bereits die Synchronisation erfolgt und kann daher übernommen werden.

#### **4.2.3.4 Stufe 4 A: Montageanlauf**

Auch der Montageanlauf umfasst die gleichen Inhalte wie im produktgetriebenen Fall (s. Kapitel 4.2.2.4), daher wird auf eine erneute Darstellung verzichtet.

#### 4.2.3.5 Gesamtdarstellung der anlagengetriebenen Planung

Die Abbildung 39 zeigt den Ablauf der anlagengetriebenen Vorgehensweise:

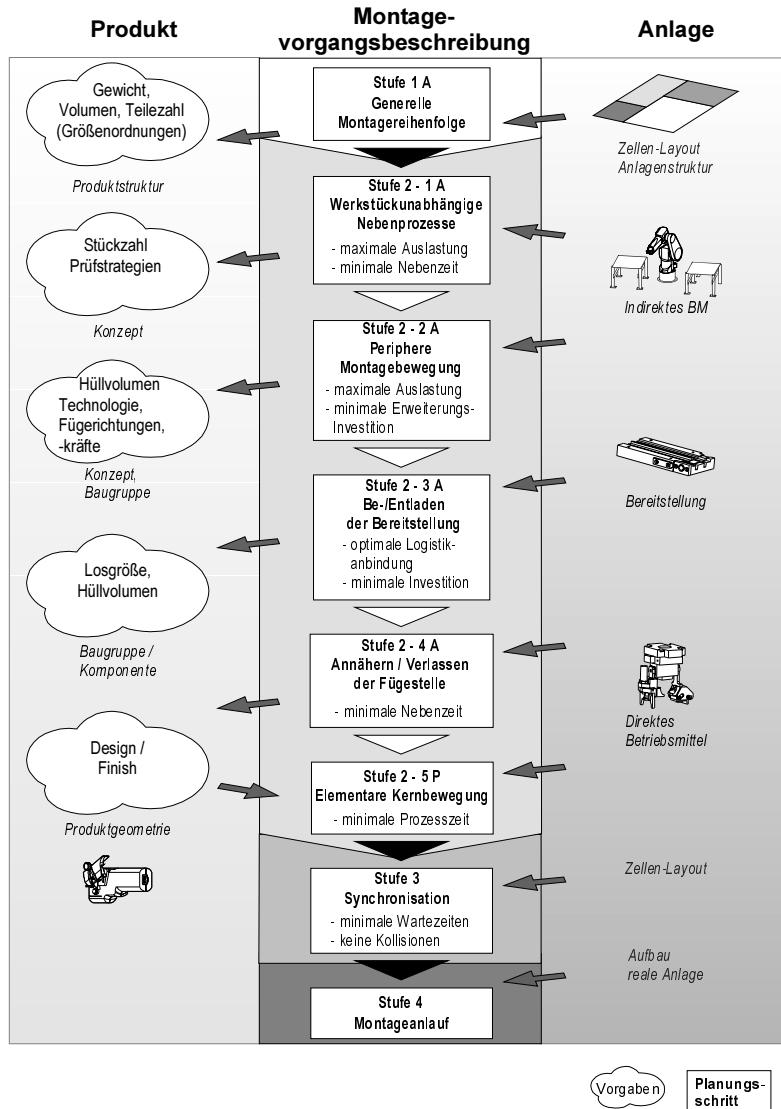


Abbildung 39: Gesamtdarstellung der anlagengetriebenen Montagevorgangsplanung

#### 4.2.4 Resümee der Vorgehensweisen

Die Gestaltung des Montagevorgangs kann einerseits von dem zu montierenden Produkt, andererseits von der für die Montage einzusetzenden Anlage determiniert werden. Je nach Intensität des Einflusses sind die beiden Kategorien **produktgetrieben** und **anlagengegetrieben** möglich. Der prinzipielle Unterschied besteht in der Reihenfolge, in der die Teilvorgänge des Montageablaufes geplant werden, sowie in der Beziehung zu den Gestaltungselementen Produkt und Anlage: Gegenüber dem einen werden Vorgaben gemacht, von dem jeweils anderen sind entsprechende Anforderungen zu erfüllen. Die Festlegung des Treibers geschieht im Vorfeld der Planung durch die übergeordnete Projektleitung und wird hier nicht mit in die Betrachtungen aufgenommen.

Die Gegenüberstellung der Planungsweisen produkt- und anlagengegetrieben zeigt Abbildung 40. Das Vorgehen innerhalb der Planungsstufe 2 sind nicht komplett entgegengesetzt, da in beiden Fällen zuerst die indirekten Betriebsmittel ausgesucht werden, bevor die Planung der Bereitstellung geschieht. Dies ist dadurch begründet, dass eben die indirekten Betriebsmittel als Handhabungseinrichtung in der automatisierten Zelle durch ihren Bewegungsraum einige Randbedingungen setzen, die dann bei der Gestaltung der Magazine etc. berücksichtigt werden sollte. In der Regel ist hier ein Anpassungsaufwand geringer und daher weniger kostenintensiv.

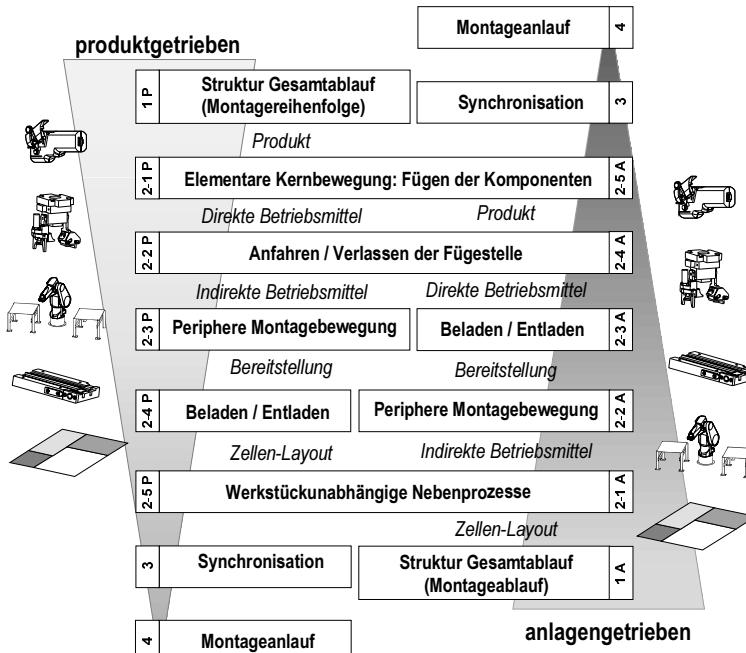


Abbildung 40: Gegenüberstellung der Planungsvorgehen

## 4.3 Datenmodell

Die Planung mit einem Rechnerwerkzeug setzt voraus, dass ein entsprechend umfassendes Datenschema bereitsteht, aus dem während der Planung das konkrete rechnerinterne Modell aufgebaut werden kann. Das Datenschema muss so gestaltet sein, dass es hilft, sowohl die aufgestellte Forderung 1 (Prozessplanung im Vordergrund der Betrachtungen, Kapitel 2.5.1) als auch Forderung 3 (Durchgängigkeit von der Idee zur Realisierung, Kapitel 2.5.3) abzudecken.

### 4.3.1 Das Montageplanungsmodell als Teil eines integrierten Produkt- und Prozessmodells

Das hier vorgestellte Datenschema zur Montageplanung und -steuerung versteht sich als Partial eines integrierten Produkt- und Prozessmodells für Entwicklungsprojekte, wie es bei AMBROSY U. A. (1996) skizziert wurde.

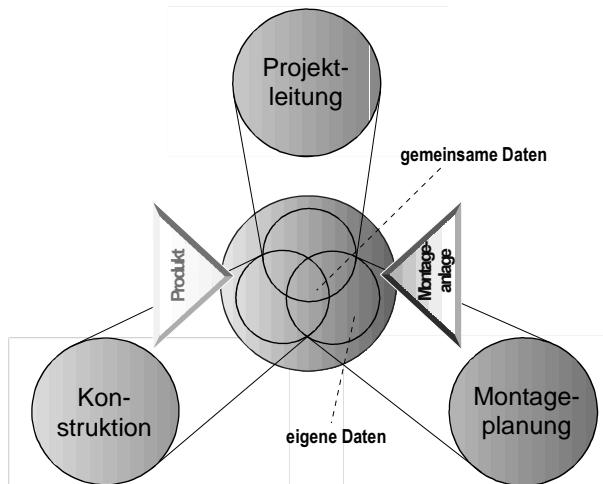


Abbildung 41: Das integrierte Produkt- und Prozessmodell besteht aus mehreren Partialen

In dieser Gesamtübersicht (s. Abbildung 41) lag der Betrachtungsschwerpunkt auf der bereichsübergreifenden Datenintegration. Im Folgenden wird die ausführlichere und erweiterte Fassung der Montageplanung vorgestellt, um den Anforderungen dieser Arbeit gerecht zu werden.

Wie bereits in Kapitel 4.1 dargestellt, muss der Montagevorgang detailliert bis zu den Einzeloperationen abbildungbar sein. Diese werden dann in der Montage durch die entsprechenden Bewegungen eines Betriebsmittels umgesetzt. Aus diesem Grunde wird das Verhalten von Betriebsmittel und Werkstück mit Hilfe eines objektbezogenen Petri-Netzes von FELDMANN (1996, S. 98 - 109) beschrieben. Dieses Netz besteht aus Stellen, die Aktionen oder Zustände repräsentieren.

sentieren, und Transitionen, die den Wechsel von einem Zustand zum nächsten regeln. Eine Hierarchisierung einer einzelnen Stelle durch ein untergeordnetes Netz ist möglich. Das Datenschema enthält daher als zentrale Prozessmodellierungselemente die Klassen<sup>21</sup> *Stelle* und *Transition*. Eine genauere Darstellung über die Verwendung der objektbezogenen Petri-Netze findet sich bei AMBROSY U. A. (1996).

#### 4.3.2 Modell der Steuerung

Als Erweiterung kann die Steuerung einer Anlage nun ebenfalls im Prozessmodell abgelegt werden. Um den Prozess betriebsmittelunabhängig formulieren zu können, wird der Ansatz einer neutralen übergeordneten Steuerung verwendet, die über MMS mit den Einzelsteuerungen kommunizieren kann. Die Klassen für die Objekte des MMS-Standards sind entsprechend in das Datenschema integriert (REINHART & CUIPER 1999) (s. Abbildung 42). Die Befehle sind dabei unterteilt in *Primär-Befehle*, die eine direkte Aktion im Sinne der Steuerung veranlassen, und *Sekundär-Befehle*, welche die Verwaltung der Programme übernehmen. Ein Beispiel für einen *Primär-Befehl* ist ‚Start Program Invocation‘, dagegen ist ‚Download Program Invocation‘ ein *Sekundär-Befehl*.

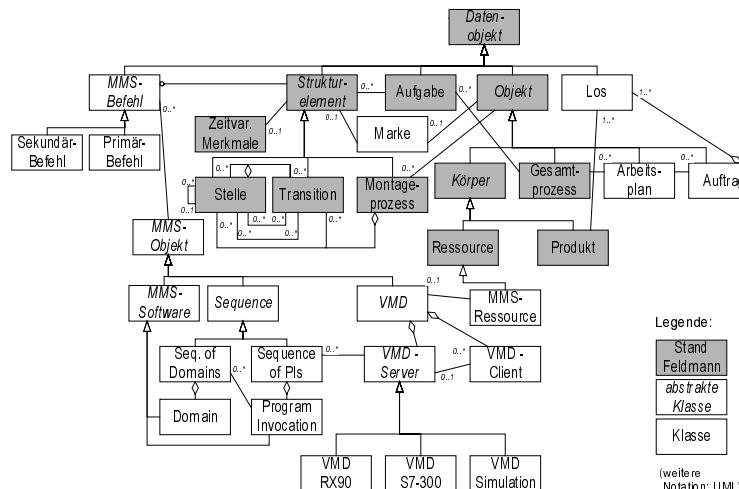


Abbildung 42: Bild des Datenschemas

Die MMS-Steuerungsbefehle werden bei der Instanzierung mit den jeweiligen Plätzen und Transitionen der Petri-Netze verbunden. Wandert nun eine *Marke* durch das instanzierte Netz, so wird die Ausführung des *MMS-Befehls* angestoßen. Zu Beginn einer Montage sind die Steuerungsprogramme in einem

<sup>21</sup> Klassennamen erscheinen im Folgenden zur besseren Verständlichkeit im Text *kursiv*.

Rüstvorgang einmalig in die Steuerungen der Komponenten zu transferieren. Allerdings wird über die *MMS-Befehle* dabei nicht direkt der Ablauf eines Bewegungsprogramms einer Komponente beeinflusst, sondern über Download per Datenübertragung in die Komponente geschrieben. Dafür kommen ebenfalls Elemente des Petri-Netzes des Betriebsmittels zum Einsatz, die im Rahmen der Steuerungsplanung vor die eigentliche Montagetätigkeit eingefügt wurden. Diese haben die entsprechenden *Sekundär-Befehle* zugewiesen bekommen.

Auch für die Schnittstelle zu der übergeordneten Steuerungsebene sind im Datenschema die entsprechenden Elemente vorzusehen. In diesem Fall sind das im Wesentlichen die Klassen *Auftrag* und *Los*. Ein *Auftrag* enthält die zu produzierende Stückzahl, die in mindestens einem *Los* gefertigt werden. Somit ist die Anzahl der Iterationen des Montageablaufs durch die Anzahl der Lose und die jeweilige Losgröße terminiert. Diese Iterationen betreffen die *Primär-Befehle*, da ein Rüsten bei produktionstechnischen Anlagen jeweils nur einmalig anfällt.

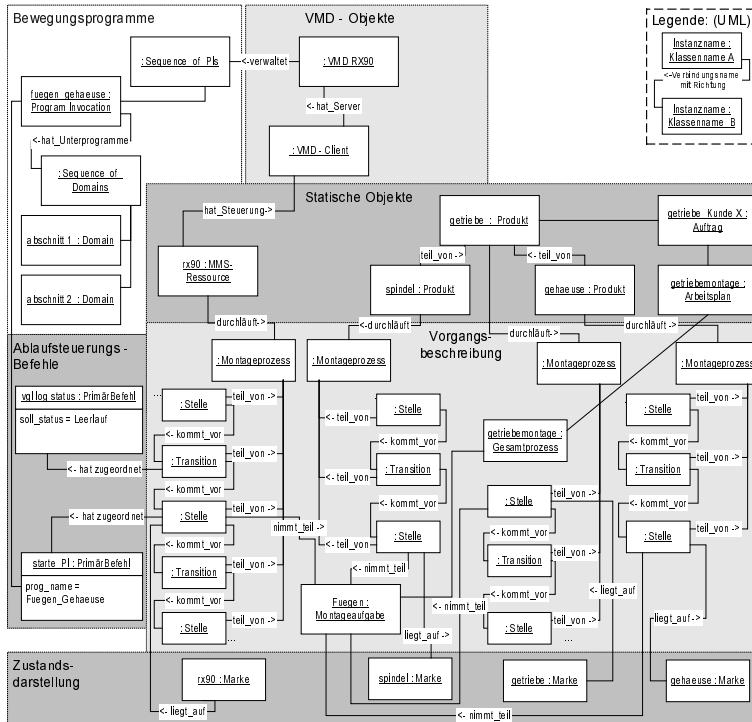


Abbildung 43: Bild eines instanziierten Datenmodells mit Steuerungsbefehlen

In Abbildung 43 ist das Objektmodell eines exemplarischen Montagevorgangs zu sehen. Im Bereich der statischen Objekte finden sich das betrachtete Be-

triebsmittel, die Produktkomponenten und die Arbeitsunterlagen als Instanzen. Für den Roboter RX90, die Spindel, das Gehäuse und das Getriebe werden jeweils *Montageprozesse* eingeführt, die aus *Stellen* und *Transitionen* bestehen. Die Vernetzung der Einzeltätigkeiten findet an der *Montageaufgabe Fügen* statt. Für jedes *Objekt* mit einem *Montageprozess* gibt es eine separat instantisierte *Marke*, die variabel an eine *Stelle* des Petri-Netzes assoziiert wird, um den aktuellen Zustand des betreffenden Objektes darzustellen. Für die Ablaufsteuerung des Roboters ist an der betreffenden *Stelle* der Vorgangsbeschreibung der *Primär-Befehl* zum Starten des Teilprogramms für die Fügebewegung angeknüpft. Sobald die *Marke* RX90 auf die entsprechende *Stelle* des Netzes über einen Pointer verzeigt wird, erfolgt die Ausführung des *MMS-Befehls*.

Zur Erhöhung der Systemperformance werden beim Durchtakten des Netzes jeweils die aktuell mit *Marken* belegten *Stellen* separat verwaltet. Somit ist nur ein Bruchteil der gesamten Netzelemente auf Schaltmöglichkeit zu untersuchen und es sind nicht bei jedem Takt alle Netze der am *Gesamtprozess* beteiligten *Objekte* zu überprüfen.

## 4.4 Integration in übergeordnete Leitsteuerung

In den vorangegangenen Abschnitten sind Ansatzpunkte dargelegt worden, wie sich aus der Montageablaufstruktur eine vollständige Vorgangsbeschreibung einschließlich der Steuerung der Anlage erstellen lässt. Dabei ging es im Ebenenmodell der Produktion (s. Abbildung 4) um die Zellensteuerungsebene und die darunter liegenden Ebenen. Der letzte fehlende Aspekt aus Forderung 3 (Durchgängigkeit von der Idee zur Realisierung) ist die Anknüpfung an die übergeordneten Ebenen.

Hierunter ist eine Verbindung der Zellensteuerung zur Auftragssteuerung zu verstehen, sodass Montageaufträge aus der Leitsteuerungsebene mittels eines PPS-Systems, in die einzelnen Kapazitätseinheiten eingelastet werden können. Aber auch vorher schon ist diese Ankopplung wünschenswert: Im Rahmen der Vorgangsbeschreibungsplanung werden Arbeitspläne angelegt, die als Musterarbeitspläne in die Leitsteuerungsebene überspielt werden sollten, damit sie dort für die Zusammenstellung der Arbeitsunterlagen zu einem Montageauftrag bereitstehen. Bei geschickter Datenhaltung aller involvierten Systeme ist es möglich, dass über den Arbeitsplan auch die Steuerungsprogramme der einzelnen Betriebsmittel verfügbar sind – aus Sicht des konzipierten Datenschemas jedenfalls ist dieser Zusammenhang direkt gegeben.

## 4.5 Zusammenfassung des Konzepts

Das vorliegende Konzept ist aufgrund seiner unterschiedlichen Bestandteile in der Lage, die drei in Kapitel 2.5 aufgestellten Forderungen zu erfüllen.

Die Betonung der Prozessplanung wurde insbesondere durch die Unterteilung des Montagevorgangs in unterschiedliche Teiltätigkeiten erreicht, die es separat und vollständig zu planen gilt.

Die Berücksichtigung der Einflüsse aus Anlage und Produkt geschieht durch die Festlegung eines Treibers in der Vorgehensweise, der festlegt, ob die Anlage dem Produkt anzupassen ist oder umgekehrt. Hier sind auch abgeschwächte Formen durch Festlegung eines überwiegenden Treibers (mit ‚Vetorecht‘ des unterlegenen) möglich und in der betrieblichen Praxis sinnvoll. Die explizite Einbeziehung des Anlagenherstellers in den operativen Planungsablauf soll die Berücksichtigung der Anlagengegebenheiten verbessern.

Die Durchgängigkeit der Planung von der Idee zur Realisierung schlägt sich in mehreren Komponenten nieder. Grundlage ist insbesondere ein Datenmodell, das nicht nur im Bereich der Planung, sondern auch für die Steuerung von Montageanlagen eingesetzt werden kann. Zudem kommen die unterschiedliche Detaillierungsmöglichkeit der Prozessbeschreibung je nach Planungsstand und das Konzept der betriebsmittelneutral formulierten Ablaufsteuerung auf Anlagen- bzw. Zellenebene mittels MMS zum Einsatz.

---

## 5 Umsetzung in einem Rechnerwerkzeug

An dieser Stelle werden die neu entwickelten Elemente des Rechnerwerkzeugs vorgestellt, das durch diese Ergänzungen eine Durchgängigkeit von der Planung zum Betrieb ermöglicht. Das Gesamtsystem stellt die Umsetzung der Konzeptteile; dabei gelten weiterhin die Anforderungen aus Kapitel 2.5.

### 5.1 Übersicht des Planungswerkzeugs

Diese Zusammenfassung benennt die Komponenten der Planungsumgebung und stellt den groben Zusammenhang dar.

#### 5.1.1 Vorhandenes Basissystem

Die Grundlage bildet das System CosMonAut (FELDMANN 1996). In CosMonAut können wesentliche Aufgaben der Montageplanung durchgeführt werden. Eine genauere Beschreibung findet sich in Kapitel 3.4.2.4. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit fand eine der Zielsetzung entsprechende Erweiterung von CosMonAut statt.

#### 5.1.2 Erweiterungen

In CosMonAut wurden zusätzliche Editoren zur Planung und Bewertung der verfeinerten Montagevorgangsbeschreibung in Form des Steuerungsablaufes geschaffen. Diese ermöglichen dem Bediener die grafisch-interaktive Gestaltung des jeweiligen Petri-Netzes und die Zuweisung der Steuerungsbefehle (s. Kapitel 5.2).

Die MMS-Befehle sind über neu definierte Icons (s. Kapitel 4.1.7) symbolisierbar, um die aus dem bisherigen Ablaufplan gewohnte Anschaulichkeit der Prozessdarstellung weiterzuführen.

Die Kommunikation mit den simulierten bzw. realen Komponentensteuerungen erfolgt über eine neue CORBA-Schnittstelle (s. Kapitel 5.3).

Für die Komponentensteuerungen im Simulationssystem sowie für einen exemplarischen Roboter und eine SPS wurden VMDs als Softwaremodule implementiert (s. Kapitel 5.4). Diese sind das Gegenstück zur CosMonAut-Steuerungsschnittstelle und kommunizieren direkt mit der Steuerungshardware bzw. deren Simulationsmodell.

Ein Datenaustausch mit der übergeordneten Leitebene ist durch eine Anbindung an ein PPS-System implementiert (s. Kapitel 5.5).

Abbildung 44 zeigt schematisch die Erweiterungen der Basis.

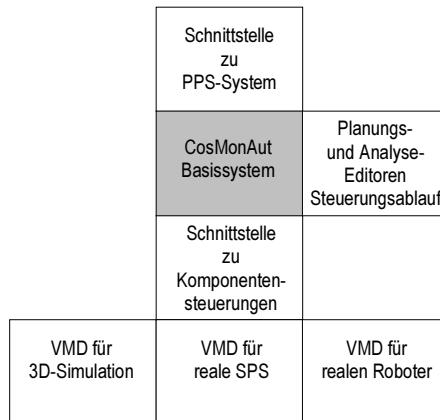


Abbildung 44: Das CosMonAut Basissystem und die Erweiterungen

## 5.2 Planungs- und Analyseeditoren für den Steuerungsablauf

Das System CosMonAut legt bereits beim Erstellen des Ablaufplans die Struktur des Petri-Netzes an. Dies ist die ausführlichste Darstellungsmöglichkeit für die Montagevorgangsbeschreibung. Die Grafikverwaltung in CosMonAut filtert dort jedoch die nicht benötigten Elemente heraus, und generiert eine korrespondierende Sicht auf den Datenbestand, um die Überschaubarkeit für den Anwender zu verbessern.

Ist nun für die Bearbeitung die Repräsentation als Petri-Netz erforderlich, wird dieselbe Struktur lediglich anders grafisch aufbereitet und kann ohne Konvertierungsarbeiten direkt eingesetzt werden. Dies ist bei der Gestaltung der Synchronisation der Einzelprozesse der Fall. Ein hierfür gestalteter Planungseditor des Systems CosMonAut offeriert dem Anwender geeignete Werkzeuge für diese Planungsaufgabe. In den Editoren besteht die Möglichkeit, über definierte Operationen auf das rechnerinterne Modell der Montagevorgangsbeschreibung zuzugreifen.

### 5.2.1 Planung der Ablaufsteuerung

Für die Gestaltung der Petri-Netze stehen elementare Editierwerkzeuge bereit, mit denen die Netzbestandteile Stelle und Transition neu eingeführt und entsprechend zeitlich und hierarchisch vernetzt werden können. Ferner können Stellen oder Transitionen synchronisiert werden, um eine Gleichzeitigkeit zu erreichen. Zudem sind ablaufbeeinflussende Verbindungen von Stellen des einen zu Transitionen des anderen Netzes (Freischaltung) realisierbar. Den einzelnen Netzelementen lassen sich dann auch entsprechende Befehle aus dem MMS-Umfang grafisch zuweisen.

In einem weiteren Bearbeitungsmodus können die Netzelemente gleich mit entsprechenden MMS-Befehlen kombiniert ausgewählt werden (s. Abbildung 45). Es stehen separate Fenster für die Auswahl von Stellen und Transitionen bereit. Nach der Selektion kommuniziert der Anwender über einen Dialog mit CosMonAut, um die Parameter der Steuerungsbefehle (anzusprechendes Programm, Variablenwerte etc.) einzugeben.

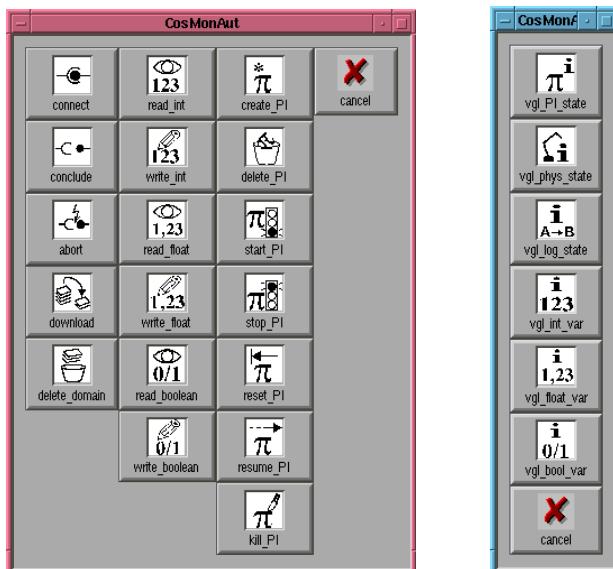


Abbildung 45: Icon-Boxen zur Auswahl von MMS-Befehlen

Im Falle der direkten Verbindung zweier Stellen durch den Anwender fügt das System automatisch eine Transition dazwischen ein, an die später ebenso ein MMS-Befehl gehängt werden kann. Somit erfolgt die Planung des Betriebsmittelablaufes ähnlich grafisch orientiert wie die Ablaufplanung des Montagevorganges aus Produktsicht über die VDI-Symbolik. Dadurch erleichtert das System sowohl die Planung selbst, als auch die Einarbeitung in vorhandene Abläufe (s. Abbildung 46).

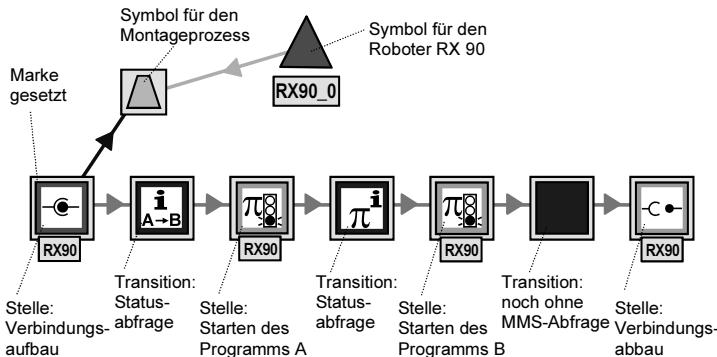


Abbildung 46: Grafisch dargestellte MMS-Befehlssequenz

Nach der Modellierung und Synchronisierung des Vorgangsnetzes erfolgt die Verifikation des Gesamtablaufs. Hier steht ein dreistufiges Vorgehen zur Verfügung. Es bietet jeweils ein gezieltes Weitertakten um einen Schritt oder aber auch ein Durchtakten nach vorgegebenem Zeitinkrement:

- Logische Überprüfung der Netzstruktur

Die Steuerungsaktionen werden über Dialoge dargestellt und vom Benutzer die entsprechenden Rückgabewerte der Komponenten erfragt. Der Vorgang findet allein innerhalb des Systems CosMonAut statt.

- Simulation des Bewegungsablaufes

Darunter fällt die Steuerung der virtuellen Betriebsmittel im 3D-Simulationsprogramm USIS. Zur Initialisierung der Kommunikation mit den VMDs über die CORBA-Schnittstelle (s. Kapitel 5.3) wird über ein Dialogfeld dem Symbol des Betriebsmittels der Name des CORBA-VMD-Servers mitgeteilt. CosMonAut etabliert selbsttätig über CORBA den Kommunikationskanal; der Montageablauf beginnt abzulaufen. Neben dem logischen Ablauf können in der virtuellen Anlage auch Kollisionen der einzelnen bewegten Betriebsmittel untereinander erkannt werden.

- Ansteuerung des realen Ablaufes

Sofern die bisherigen Verifikationsschritte komplikationsfrei abliefen und die Anlagenhardware entsprechend aufgebaut ist, muss lediglich der Name des CORBA-VMD-Servers für die reale Komponente eingegeben werden. Sodann erfolgt die Adressierung aller Steuerungsbefehle direkt an die reale Komponentensteuerung und der tatsächliche Ablauf in der Realität beginnt. Hierbei sind entsprechende Maßnahmen zur Verwendbarkeit der offline erstellen Bewegungsprogramme vorausgesetzt.

In der Arbeitsoberfläche wurde ein zentraler Knopf zum sofortigen Stoppen integriert, der eine schnellstmögliche Unterbrechung aller gerade im Status ‚ausführend‘ befindlichen Program Invocations veranlasst.

Die Planungsseditoren für die Erstellung der Petrinetz-Beschreibung zielen in erster Linie auf die Erfüllung der Forderungen 1 (Prozessplanung) und 3 (Durchgängigkeit) ab.

### *5.2.2 Planung der Bewegungsabläufe*

Das Modell der Vorgangsbeschreibung im Rechnerwerkzeug bildet gleichzeitig die Klammer, die alle Teilergebnisse schlüssig zusammenhält. Für die Bewegungsplanung der Produktkomponenten und Betriebsmittel an den einzelnen Teilschritten des Vorgangs werden über die Schnittstelle von CosMonAut die entsprechenden Betriebsmittel und Produktkomponenten in das 3D-Simulationssystem AnySIM übertragen.

Dort findet die Programmierung im anlagengetriebenen Fall gleich in der Programmiersprache des vorgesehenen Betriebsmittels statt.

Im produktgetriebenen Fall kommt zunächst eine neutrale Moving-Base<sup>22</sup> zum Einsatz. Ist zu einem späteren Zeitpunkt das Betriebsmittel bekannt, erfolgt die Programmerstellung in dessen spezifischer Sprache. Eine spezielle Funktion ermöglicht die weitgehend automatische Konvertierung der vorab erstellten allgemeingültigen Moving-Base-Programme in steuerungsspezifische Ablaufbeschreibungen. Dadurch kann die Bewegungsbahn der einzelnen Produktkomponente als Kernstück der Gesamtbewegung weiterverwendet werden. Der Ablauf des Vorgehensmodells von der Elementaren Kernbewegung zum Gesamtprogramm (s. Kapitel 4.1.2 und 4.2.2.2 a) ist also vom Planungswerkzeug durchgängig unterstützt; dieses Konzept erfüllt insbesondere die Forderung 3.

### *5.2.3 Temporale und monetäre Bewertung*

Die Mindestanforderung an das Planungsergebnis ist die technische Durchführbarkeit der beschriebenen Lösung. Ist dies erreicht, müssen auch andere Randbedingungen erfüllt werden. Im betrieblichen Umfeld sind das die Kriterien Zeit, Kosten und Qualität, welche einerseits den Rahmen für die Realisierung aufspannen (z.B. Target Costing), andererseits aufgrund der Quantifizierbarkeit auch für den Vergleich unterschiedlicher Alternativen herangezogen werden.

Für die Bewertung der Montagevorgangsbeschreibung samt zugehöriger Anlage wurden die Zeit- und Kostenanalysewerkzeuge von CosMonAut für die Petri-Netz-Darstellung adaptiert. Die Ausgabe erfolgt analog der bekannten Analyse der Ablaufpläne über qualitative Balken an den Netzelementen sowie über eine explizite Darstellung der charakteristischen Kennzahlen des ge-

---

<sup>22</sup> Neutrale Kinematik mit sechs Freiheitsgraden, an die ein geometrisches Objekte geknüpft und damit bewegt werden kann.

samten Vorgangs in einem Fenster. In einem gemeinsamen Analyseeditor erfolgt nun die Visualisierung der Zeiten für die einzelnen Stellen. Berücksichtigung finden in der Zeitanalyse alle Stellen der Betriebsmittelnetze, auch diejenigen für die werkstückunabhängigen Nebenprozesse. Diese werden separat erfasst und dargestellt. Somit können Zeitunterschiede deutlich gemacht und parallel ablaufende Vorgänge optimal ausgeglichen werden. Bei der Kostenanalyse werden unter dem Gesichtspunkt der Kostenträgerrechnung alle Werte der Einzelnetze der entsprechenden verknüpften Stelle des Werkstücks zugeteilt. Somit ist schnell eine Antwort darauf gefunden, wieviel z.B. die Montageoperation der Baugruppe C, bestehend aus den Komponenten A und B, kostet. Die vereinbarte Konvention sieht vor, dass alle Werkstückunabhängigen Nebenprozesse der im Ablauf als nächstes vorkommenden Stelle eines Werkstücks zugerechnet und dort kumuliert werden.

Um Wiederholungen zu vermeiden, sei anstelle einer Darstellung der Analysefunktion in CosMonAut auf die Abbildung 72 im Anwendungsbeispiel in Kapitel 6.2.4 verwiesen. Die Analysemöglichkeit ist nicht separat in Kapitel 2 postuliert, da sie für eine hohe Planungsqualität unabdingbar und in diesem Sinne bereits in den Forderungen 1 und 3 enthalten ist.

## 5.3 Schnittstelle zu Komponentensteuerungen

### 5.3.1 Kommunikation

Nach der Vorstellung des Kommunikationskonzeptes als Basis der Gesamtarchitektur folgt anschließend die Beschreibung einzelner Komponenten mit ihrer Funktionsweise.

#### 5.3.1.1 Basismechanismus

Die objektorientierte Denkweise kommt nicht nur bei der Erstellung des Datenschemas zum Einsatz, sondern auch bei der Konzeption des Planungswerkzeugs. Für den Anwendungsfall der Steuerungsplanung übernimmt dabei das Werkzeug die Rolle einer Ablaufsteuerung. Diese steht mit den einzelnen Objekten bzw. Komponenten der Anlage in Verbindung. Zwischen den Objekten werden über die Verbindungen Nachrichten ausgetauscht, die durch das Petri-Netz der Ablaufsteuerung sowie den jeweiligen Zustand der Komponenten bestimmt sind.

Für die Modellierung der Steuerung selbst fiel die Wahl auf MMS (s. Kapitel 4.1.5). Somit wird die Montageanlage aus steuerungstechnischer Sicht durch ein VMD-Objekt je separater Steuerungskomponente repräsentiert. Die übergeordnete Ablaufsteuerung kommuniziert in dem Modell direkt mit diesen einzelnen Objekten.

Dieses Modell gilt es nun mit real verfügbaren Kommunikationsmechanismen umzusetzen. Dabei darf es keine Rolle spielen, ob es sich beim Kommunikationspartner der Ablaufsteuerung um die VMD eines simulierten oder eines realen Betriebsmittels handelt, in beiden Fällen muss der Informationsfluss auf dieselbe Art und Weise erfolgen.

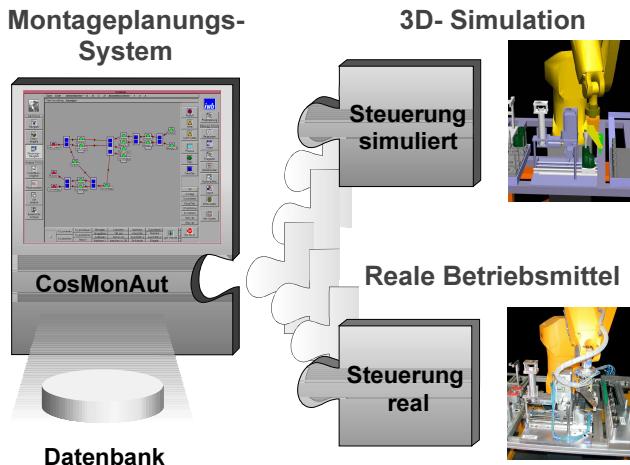


Abbildung 47: Wahlweise kann die Steuerung eines realen oder simulierten Betriebsmittels von CosMonAut angesprochen werden

Neben den Feldbus-Architekturen kommen im Automatisierungsbereich MAP-Netzwerke zum Einsatz. Für die Büro-Netzwerke ist das Ethernet mit TCP/IP Standard. Sowohl CosMonAut als auch das eingesetzte 3D-Simulationsprogramm sind in diesem Sinne Büro-Software, da sie auf Rechnern in einem TCP/IP-Netzwerk laufen. Da sowohl Simulationssoftware als auch reale Automatisierungskomponenten vom Planungswerkzeug CosMonAut aus anzusteuernden sind, muss ein entsprechender Kommunikationsweg erst noch definiert werden.

### 5.3.1.2 Einsatz von MAP/MMS

Der Einsatz von MAP/MMS hätte bedeutet, dass die Ablaufsteuerung mit einem zentralen MAP-Server über TCP/IP kommuniziert, der dann seinerseits mit den einzelnen VMD-Objekten über das MAP-Protokoll Daten austauscht. Zusätzlich hätten dann für die im 3D-Simulationssystem anzusteuernden Betriebsmittel VMD-Objekte innerhalb des MAP-Netzwerks eingerichtet werden müssen. Diese würden die empfangenen Befehle wieder an den MAP-Server zurückgeben, damit dieser seinerseits eine TCP/IP-Kommunikation mit dem Simulationssystem durchführt, um die Animation zu beeinflussen. Dieser Weg ist sehr aufwendig und zu fehleranfällig, als dass eine weitere Verfolgung in Betracht gekommen wäre.

### 5.3.1.3 Alternative: MMS-Syntax mittels CORBA übertragen

Aus diesem Grunde wurde eine Kommunikation auf Basis des CORBA-Standards, der seinerseits auf TCP/IP aufsetzt, realisiert. Dabei gibt es ein CORBA-Server-Objekt für jede im System auftretende VMD. Die Ablaufsteuerung bildet dann den CORBA-Client, der die jeweiligen Befehle übermittelt. Die Syntax und Semantik der Befehle ist durch den gewählten MMS-Standard festgelegt.

Der CORBA-Standard beschreibt also den grundsätzlichen Übertragungsmechanismus, MMS den dabei zulässigen Sprachumfang.

### 5.3.2 Funktionalität der CosMonAut MMS-Schnittstelle

Über die MMS-Schnittstelle von CosMonAut steht dem Planer der grundlegende MMS-Umfang für die Planung und Ausführung des Ablaufprogramms zur Verfügung.

In der Kategorie der primären Befehle finden sich die Anweisungen für die Programmausführung sowie die Variableneinflussung und -auswertung.

Bei den sekundären Befehlen stehen die elementaren Funktionen zum Aufbau und Beenden der Kommunikationsverbindung sowie die Mechanismen zur Verwaltung von Programmen (Pls) und deren Komponenten (Domains) zur Verfügung.

Darüber hinaus ist der zentrale Sofort-Stopp-Knopf (s. Kapitel 5.2.1) als Zusatzfunktionalität implementiert, bei dessen Betätigung alle verbundenen VMDs umgehend das Signal zum sofortigen Stoppen der momentan laufenden PI erhalten und die Anlage somit zum Stehen kommt.

## 5.4 VMDs für die Komponentensteuerungen

Die jeweiligen Automatisierungskomponenten innerhalb eines MMS-Verbundes besitzen alle ein eigenes Softwaremodul, das die neutralen MMS-Steuerungsbefehle in die maschinenspezifischen Kommandos umsetzt, s. Kapitel 3.2.3.1 und 4.1.5. Diese VMDs können über das oben beschriebene Kommunikationskonzept – MMS-Befehle mit CORBA Übertragungsprotokoll – angesprochen werden. Exemplarisch erfolgte die Implementierung für drei unterschiedliche Komponentensteuerungs-VMDs.

### 5.4.1 Innerer Aufbau der VMD

Jede VMD besteht quasi aus zwei Schnittstellen und der dazwischenliegenden Umsetzung (s. Abbildung 48). Die MMS-Seite empfängt Befehle und sendet entsprechende Rückmeldungen. Die Realisierung erfolgt hier als CORBA-Server, der auf einem Rechner im Netzwerk läuft und entsprechend auf die ihm zugeschickten Steuerungsbefehle reagiert. Diese Seite der VMD ist immer gleich. Aufgrund der CORBA-Eigenschaften spielt es dabei nicht einmal eine Rolle, welches Betriebssystem auf dem Rechner der VMD installiert ist. Bei der Implementierung wird der jeweilige Programmcode vom Compiler automatisch adaptiert.

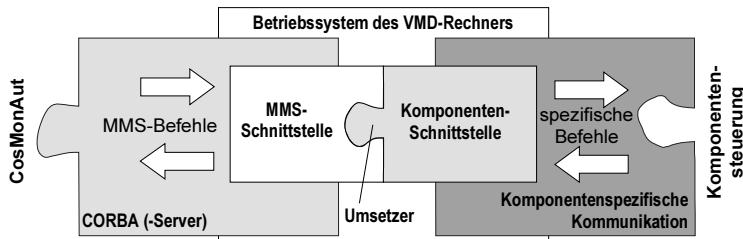


Abbildung 48: Schematischer Aufbau einer CosMonAut CORBA-MMS-VMD

Die spezifischen Befehle an die Komponentensteuerung werden im Umsetzer aus den MMS-Kommandos erzeugt. Die Weitergabe geschieht über die Schnittstelle, die eigens an die jeweilige Kommunikationsstruktur der Komponente anzupassen ist.

Zudem verwalten die VMDs die einzelnen Steuerungsprogramme (Program Invocations) und Unterprogramme (Domains), die ihnen per Herunterladen (Download) über die Kommunikationsschnittstelle übertragen worden sind.

Durch den modularen Aufbau der VMD ist lediglich die komponentenspezifische Seite individuell auszustalten, um eine neue VMD zu erhalten. Die CORBA-MMS-Seite bleibt unverändert (s. Abbildung 49).

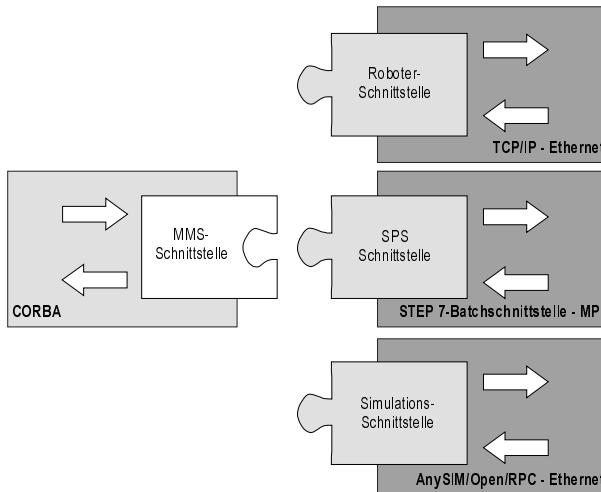


Abbildung 49: Konfigurieren der jeweiligen VMD für die Komponenten

Auf diese Art lassen sich neue Automatisierungskomponenten sehr schnell in die Steuerungstechnik einer Anlage oder Zelle integrieren. Dieser Fall kann eintreten, wenn eine Komponente durch eine gleichartige, aber technologisch andere Maschine substituiert werden soll - sei es als Ersatz bei Defekt oder

zur Erhöhung der Anlagenkapazität durch eine Komponente mit kürzerer Taktzeit auf dem kritischen Pfad des Durchlaufs. Auch bei einer physikalischen Erweiterung der Anlage kann das alte Steuerungsmodell mitsamt den Komponenten erhalten bleiben. Die neuen Komponenten werden genauso in das System aufgenommen.

Die folgenden drei Abschnitte stellen die realisierten VMDs genauer vor. Trotz des unterschiedlichen Aufbaus an der gerätespezifischen Seite verhalten sich alle VMDs an ihrer CORBA-MMS-Seite dem System CosMonAut gegenüber identisch.

#### 5.4.1.1 VMDs für die 3D-Simulation

Für jede Komponente im simulierten Layout wird eine VMD angelegt, die dann über die AnySIM/Open<sup>23</sup>-Schnittstelle mit dem 3D-Simulationsprogramm USIS kommuniziert (CUIPER & ROßGODERER 1997). Das Simulationssystem läuft sowohl auf Windows NT als auch diversen Unix-Systemen. Die VMD und die Simulation können dabei auf demselben Rechner laufen, müssen es aber nicht.

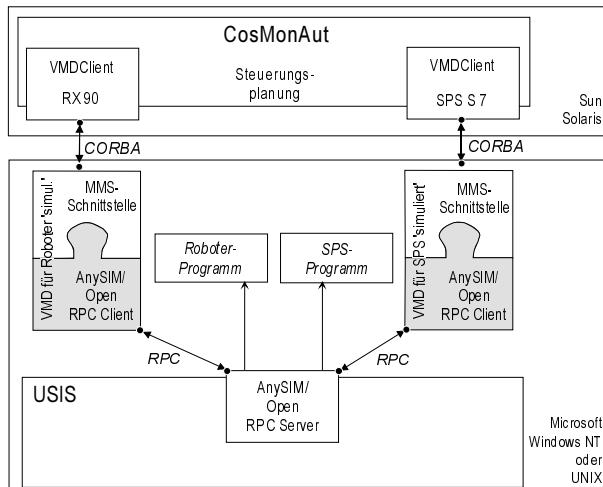


Abbildung 50: VMDs für die simulierten Komponenten

Der schematische Aufbau der VMDs für die 3D-Simulation ist in Abbildung 50 dargestellt. Implementiert wurden die Simulations-VMDs für die Unix-Systeme Solaris von Sun und Irix von Silicon Graphics.

Die VMDs für simulierte Komponenten sind für Betriebsmittel einzusetzen, deren Steuerung auch im Simulationswerkzeug nachgebildet ist. Im Gegensatz

<sup>23</sup> C-Programmierschnittstelle der kommerziellen Version AnySIM des iwb Simulationssystems USIS (s. Kapitel 3.4.1.2).

zu der V+ Steuerung für Roboter ist die Verarbeitung von SPS-Code derzeit<sup>24</sup> noch nicht im verwendeten Simulationsprogramm verfügbar. In diesen Fällen muss die Steuerung des Betriebsmittels als „normale“ Kinematik mit den entsprechenden Befehlen in der Simulation separat vom später verwendeten Programm für die reale Komponente erfolgen. Die hier realisierte VMD ist nach der Erweiterung des Simulationswerkzeugs (Arbeitsinhalt des derzeit laufenden Forschungsprojektes iViP) auch für die simulierte SPS-Steuerung einsetzbar.

#### 5.4.1.2 VMD für einen Roboter Stäubli RX 90/130

Die Roboter RX 90 und RX 130 der Firma Stäubli werden mit Steuerungen der Firma Adept betrieben<sup>25</sup>. Die VMD für den Robotertyp RX (identisch für RX 90 und RX 130) wurde auf Windows NT entwickelt, da der PC für den Betrieb des Roboters benutzt wird. Trotz des anderen Betriebssystems als bei der Simulations-VMD bleibt die CORBA-MMS-Seite der VMD im C++ Quellcode unverändert. Die Kommunikation von PC zu Robotersteuerung erfolgt direkt über TCP/IP (s. Abbildung 51).

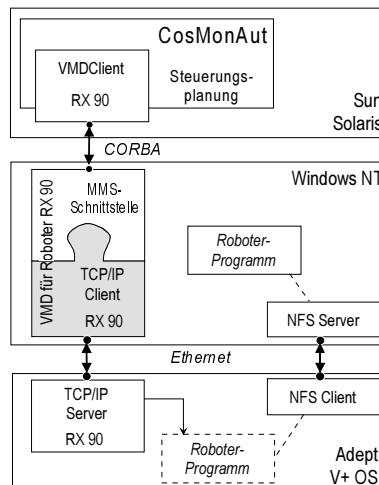


Abbildung 51: VMD für einen Roboter Stäubli RX 90 / RX130

---

<sup>24</sup> Stand: Ende 1999

<sup>25</sup> Diese besitzen Motorola-Prozessoren und können ab dem Prozessortyp 68040 mit Ethernet- Anschluss und TCP/IP Kommunikationsschnittstelle ausgerüstet werden. Entsprechende Programme ermöglichen dann u. a. eine Terminalemulation an einem Windows NT-PC statt dem direkten Anschluss eines alphanumerischen Terminals.

Die Robotersteuerung ist in der Lage, bis zu sieben Programme parallel auszuführen. Dafür werden sogenannte Tasks bereitgestellt (Multitasking). Lediglich einer Task kann dabei die Befehlsgewalt über den Roboterarm zugewiesen werden, um Zugriffskonflikte zu vermeiden. Diese Task läuft dann im Vordergrund<sup>26</sup> mit höchster Priorität ab.

Im VMD-Betrieb überwacht die Robotersteuerung in einer Hintergrundtask die Schnittstelle und gibt die Meldungen an den Ablaufsteuerungsprozess, der in einer weiteren Task abläuft, weiter. Aus diesem werden die einzelnen Programme gestartet, die in dem dafür vorgesehenen Ausführungsprozess in der Vordergrund-Task ablaufen.

Die eingesetzte Robotersteuerung verwaltet mit ihrem Betriebssystem ein eigenes Filesystem. In der oben aufgeführten allgemeinen Beschreibung wurde das jeweilige Programm (Program Invocation) der VMD zur Verwaltung zugewieilt. Das bedeutet, dass die VMD auf dem PC eine Datei anlegt. Um nun diese Datei der Robotersteuerung zugänglich zu machen, kommt die NFS<sup>27</sup>-Fähigkeit der Steuerung zum Einsatz: Ein NFS-Server auf dem Windows NT-PC exportiert den entsprechenden Programmreich der VMD, sodass die Robotersteuerung auf diese Dateien zugreifen kann. Das Roboterprogramm befindet sich somit scheinbar im Filesystem des Steuerungs-Betriebssystems und kann somit verarbeitet werden, tatsächlich jedoch ist es im Rechner der VMD gespeichert.

### 5.4.1.3 VMD für eine SPS Siemens S7

Die Integration einer SPS als Komponentensteuerung auf Basis des VMD-Ansatzes erfordert einige Vereinbarungen:

Entgegen des typischen Verhaltens einer SPS, das gespeicherte Hauptprogramm in einem Endloszyklus zu durchlaufen und bei Änderungen der Eingangsgrößen entsprechend definierte Schritte auszuführen, ist in diesem Anwendungsfall lediglich ein einziger Zyklus zu durchlaufen. Der Start des Zyklus erfolgt auch nicht durch das Setzen eines Eingangssignals, weil dafür eine weitere Zwischenschicht in der Steuerungshierarchie einzuziehen wäre. Vielmehr ist der Start des SPS-Programms über die VMD per Software-Signal zu veranlassen. Nach der Beendigung des Programms muss die SPS in einem stabilen Zustand sein, aus dem wieder gezielt ein weiterer Zyklusdurchlauf möglich ist. Dies ist insbesondere bei der Erstellung des SPS-Programms zu beachten. Die hier meist vorhandene Komplexität wird jedoch reduziert, da das Abfragen bestimmter Ereignisse in der Ablaufsteuerung erfolgt und auch die Reaktion darauf dort festgelegt wird. Die SPS hat somit nur einzelne Programm-Module, die von extern verwaltet und gezielt manipulierbar sind.

---

<sup>26</sup> Dadurch kann er durch Tastatureingaben wie z. B. „Break“ direkt beeinflusst werden.

<sup>27</sup> Das Network File System (NFS) von Sun Microsystems regelt in Computernetzwerken den Zugriff auf zentrale Datenspeicher. NFS ist ein gängiger Standard bei UNIX-Netzwerken.

Die SPS-VMD ist für eine Siemens S7-300 SPS implementiert. Diese lässt sich über die Programmierumgebung STEP 7<sup>28</sup> softwaretechnisch ansprechen. STEP 7 läuft auf einem PC unter Windows NT, die Kommunikation mit der SPS geschieht über eine Schnittstellenkarte und ein MPI-Kabel (s. Abbildung 52).

Die VMD greift auf die Kommandoschnittstelle von STEP 7 zurück, daher läuft sie ebenfalls auf dem Windows NT-PC. Analog zu den anderen VMDs werden die eingehenden MMS-Befehle in entsprechende Anweisungen der SPS-Kommandoschnittstelle umgewandelt. Der Transfer von Steuerungsprogrammen erfolgt zuerst von CosMonAut an die VMD, welche dann die SPS-Programme über die MPI-Datenverbindung direkt in den Arbeitsspeicher der SPS weiterleitet.

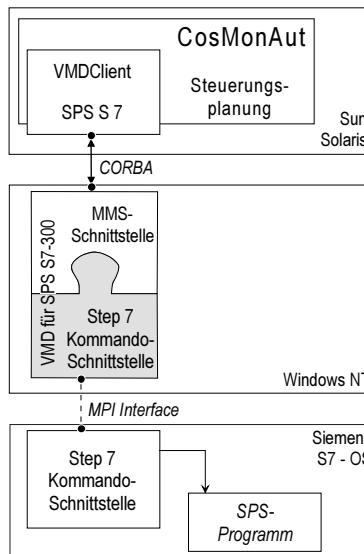


Abbildung 52: VMD für eine SPS Siemens S7-300

#### 5.4.2 Funktionsumfang der VMDs

Die VMDs erfüllen alle in MMS vorgegebenen Funktionalitäten. Die oben als VMD bezeichneten Softwarekonstrukte weisen intern eine feinere Unterteilung auf: Die als sekundäre Steuerungsbefehle katalogisierten MMS-Verwaltungs-Methoden (z.B. Programm anlegen, Download) wurden als CORBA-Methoden eines zentralen VMD-Objektes definiert. Program Invocations und Domains sind jeweils eigene Objekte, die mit dem VMD-Objekt in Verbindung stehen. Diese besitzen wiederum Methoden, etwa für das Starten und Stoppen des

---

<sup>28</sup> Ab Version 5 steht eine so genannte Batch-Schnittstelle zur Verfügung.

Programms, die vom VMD-Objekt aus angesprochen werden (primäre Befehle).

Für den Datentransfer zum Download/Upload eines Programmes zwischen CosMonAut und der VMD kommt ein spezieller CORBA-basierter Dateitransfer-Mechanismus zum Einsatz.

Der asynchrone Rückmeldemechanismus von der VMD an CosMonAut ermöglicht es, dass nach dem Starten eines Programms durch CosMonAut als VMD-Client nicht unmittelbar auf eine Antwort gewartet werden muss. Die VMD meldet sich selbsttätig bei Beendigung des Programms oder im Fehlerfall, sodass CosMonAut in der Zwischenzeit etwaige parallele Programmabläufe auf anderen VMDs starten kann.

## 5.5 Schnittstelle des Planungssystems zu PPS

Bislang wurde die Gestaltung der Ablaufsteuerung sowie die Kommunikation zu den darunter liegenden Ebenen beschrieben. Dieser Komplex bildet den Hauptteil der Arbeit. Um jedoch die Integration auch zu der darüberliegenden Schicht der Auftragssteuerung zu erzielen, wurde eine Anbindung zum PPS-System **Adicom Lowis** realisiert.

Das gemeinsame Verwenden einer zentralen Datenbasis durch beide Systeme lässt sich aufgrund der unterschiedlichen Datenbanktechnologien (objektorientiert bei CosMonAut, relational bei Lowis) nicht direkt umsetzen.

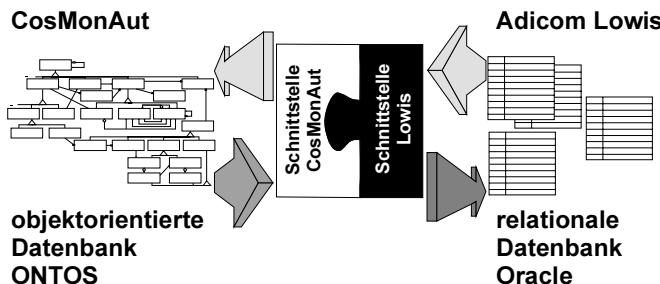


Abbildung 53: Schnittstellen zwischen CosMonAut und dem PPS-System Adicom Lowis

Die Anbindung besteht deswegen aus einer Schnittstelle zu Lowis und aus einer Schnittstelle zu CosMonAut sowie der Konvertierungsvorschrift für die Daten. Beide Schnittstellen ermöglichen einen bilateralen Export und Import von Daten (s. Abbildung 53). Die Anbindung ist so ausgelegt, dass die direkt übertragbaren Daten automatisch von der einen Datenstruktur in die andere umgesetzt werden. Für diesen Zweck gibt es ein Kombinationsmodell der beiden Datenschemata. Die Schemata beinhalten verschiedene Klassen. Zudem sind die produktionstechnischen Kenngrößen teilweise in anderen Klassen enthalten: Attribute der CosMonAut Klasse *Gesamtprozess* beispielsweise finden sich auf vier Klassen in Lowis verteilt wieder. In dem Kombinationsschema

können die einzelnen Attribute der Objekte des einen Schemas den entsprechenden Attributen der Objekte aus dem anderen Schema zugewiesen werden; dieses Schema ist der Kern der Anbindung. Für Daten, die im jeweiligen Zielsystem vorgesehen, aber aus der Quelle nicht erschließbar sind, besteht die Möglichkeit der manuellen Dateneingabe in Dialogfenstern (s. Abbildung 54). Andernfalls werden vorbelegten Defaulteinstellungen übernommen, damit keine undefinierten Speicherinhalte auftreten.

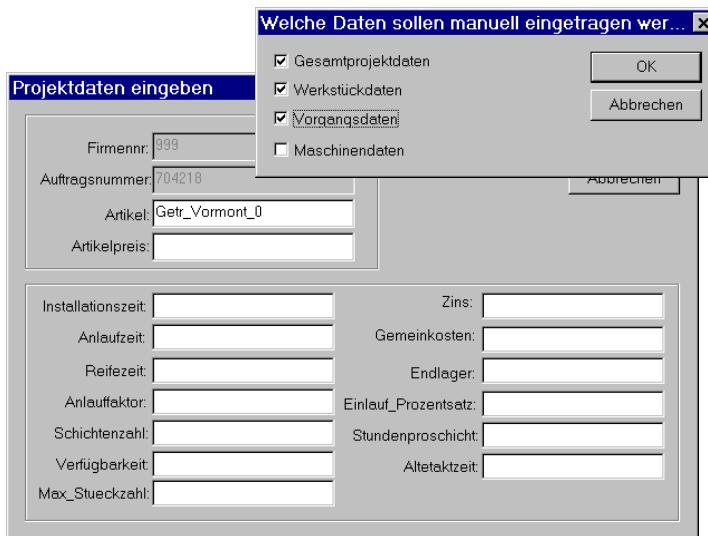


Abbildung 54: Dialog zur manuellen Eingabe von Attributen beim Datentransfer

Diese prototypische Anbindung lässt sich auch für andere PPS-Systeme adaptieren.

## 5.6 Zusammenfassung des umgesetzten Planungssystems

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Werkzeug erstellt, welches für die Planung und Realisierung von Montagevorgangsbeschreibungen und Montageanlagen einsetzbar ist. Durch den Einsatz von speziellen Werkzeugen für die Geometriebearbeitung (CAD und 3D-Simulation) stehen dem Planer umfassende Hilfsmittel für die Planung der Montagevorgangsbeschreibung sowie des virtuellen Produktes und der virtuellen Anlage zur Verfügung.

Im Kernsystem CosMonAut erfolgt dabei die redundanzfreie Datenhaltung. Es stellt ferner die Möglichkeit bereit, die Ablaufsteuerung der Anlage zu modellieren. Diese lässt sich an der virtuellen Anlage simulativ verifizieren. Bei hinreichend weitem Planungsfortschritt kann CosMonAut unter Verwendung desselben CORBA-basierten Kommunikationsmechanismus auch die reale Anlage steuern. Die Montagevorgangsbeschreibung ist als Arbeitsplan in ein PPS-System transferierbar (s. Abbildung 55). Damit können die Planungsdaten für den operativen Betrieb weiterverwendet werden.

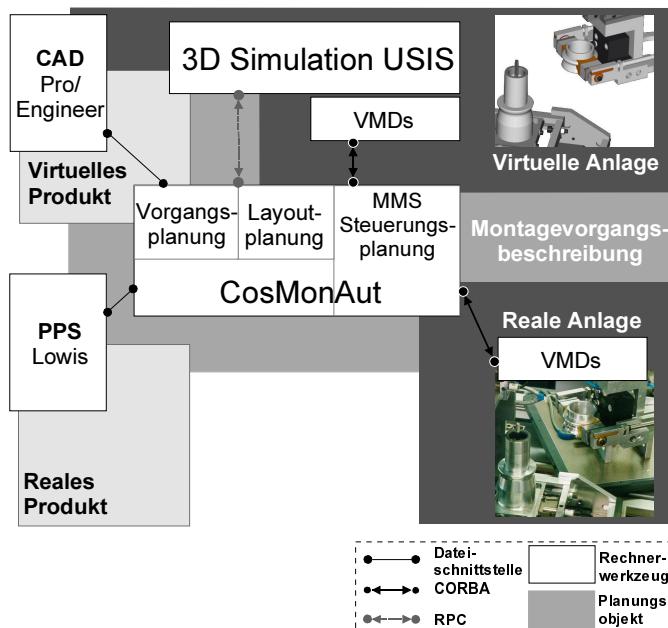


Abbildung 55: Architektur des gesamten Planungssystems

---

## 6 Anwendungsbeispiele

Exemplarisch wird hier die Anwendung der in Kapitel 4.2 präsentierten Vorgehensweise und der Einsatz des in Kapitel 5 beschriebenen Rechnerwerkzeugs demonstriert. Das erste Planungsbeispiel fällt unter die Kategorie 'anlagengerieben' und fokussiert die frühen Planungsabschnitte. Im zweiten Beispiel wird eine produktgetriebene Umplanung beschrieben, wobei auch auf die Steuerungsplanung für einen Roboter und eine SPS eingegangen wird. Diese beiden Beispiele verdeutlichen das breite Anwendungsspektrum der neuen Vorgehensweise und der technischen Umsetzung.

### 6.1 Planung der automatischen Montage eines elektrischen Dosenöffners

In diesem Anwendungsbeispiel wird die Endmontage eines elektrischen Dosenöffners auf der Kleingerätemontageanlage des iwb geplant. Der Schwerpunkt der Darstellung liegt auf der Stufe 2 der Vorgehensweise, der Planung der unterschiedlichen Teiltorgänge. Eine Analyse der Planungsergebnisse hinsichtlich Zeiten und Kosten erfolgt hier nicht.

#### 6.1.1 Ausgangssituation

Ursprünglich gab es den Dosenöffner in einer Ausführung mit Netzstecker und in einer Ausführung mit Akku. Außer Schneideeinrichtung und Getriebe existierten keine gemeinsamen Teile in beiden Ausführungen. Die Gehäuseform war komplett unterschiedlich. Zur Senkung der Herstellkosten besteht die Aufgabenstellung darin, sowohl eine automatisierte Montage zu realisieren, als auch die unterschiedlichen Ausführungen soweit als möglich zu vereinheitlichen, um die Teilevielfalt und den Montageaufwand zu minimieren.

Die folgenden Abschnitte zeigen, wie die Planung der automatisierten Montage der neuen Version des Dosenöffners (s. Abbildung 56) mit dem Werkzeug CosMonAut abläuft und wie daraus Randbedingungen für die Gestaltung des Produktes abgeleitet werden. Es handelt sich somit um eine anlagengeriebene Planung (s. Kapitel 4.2.3).

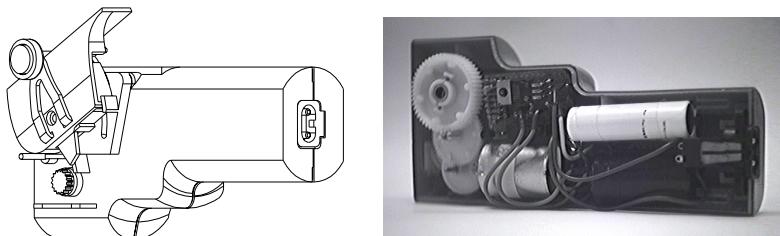


Abbildung 56: CAD-Modell und teilmontierter Dosenöffner (neue Variante)

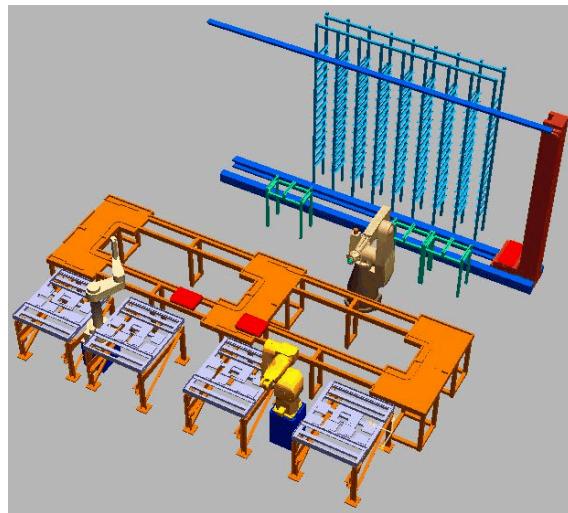


Abbildung 57: Simulationsmodell der Anlage

Die Montageanlage (s. Abbildung 57) kommt für unterschiedliche Produkte zum Einsatz (vgl. z.B. FICHTMÜLLER 1996, KUBA 1997). Für die Montage des Dosenöffners ist die Anlage entsprechend zu rüsten. Dabei ergibt sich die prinzipielle Anlagenstruktur gemäß Abbildung 57. Außer dem Lager stehen eine Vormontagezelle und eine Endmontagezelle zur Verfügung (s. Abbildung 58).

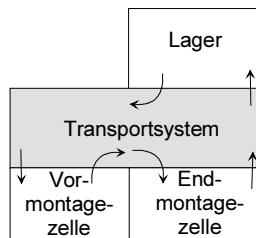


Abbildung 58: Schematische Layoutstruktur der Montageanlage

### 6.1.2 Stufe 1 A - Bestimmung der Generellen Montagerielenfolge

Der Dosenöffner besteht aus zahlreichen, in Komponenten vormontierten Bau- teilen. In der Montagezelle sind zwei automatisierte Zellen mit Roboter vorhanden, die jeweils über zwei Laststände verfügen (s. Abbildung 57 links). Um flexibel zu sein, sollen auf jeweils einem Laststand abgeschlossene Montage- operationen durchgeführt werden, sodass zwischendurch ein Umrüsten der Anlage auf andere Produkte möglich ist, wenn die Kapazitätslage das erfordert. Die Anlieferung aller Produkte geschieht immer losweise über das Materialflusssystem auf Werkstückträgern der Größe 450 \* 300 mm. Diese lassen

sich im Lager zwischenlagern. Auf einem Werkstückträger finden vier Gehäusehälften sowie zwei montierte Dosenöffner Platz. Neben dem Werkstückträger werden auf dem Laststand die notwendigen Betriebsmittel, wie Greifer zur Werkstückhandhabung und Montagevorrichtungen, untergebracht. Durch die modulare Bauweise mit definierten Schnittstellen stehen für das Layout des Laststandes lediglich begrenzte Anordnungsalternativen zur Verfügung. Der Umfang der Endmontage umfasst das Einsetzen der Schneideeinrichtung und Schließen des Gehäuses (s. Abbildung 59). Für alle anderen Zusammenbauschritte besteht die Notwendigkeit einer separaten bzw. externen Vormontage.

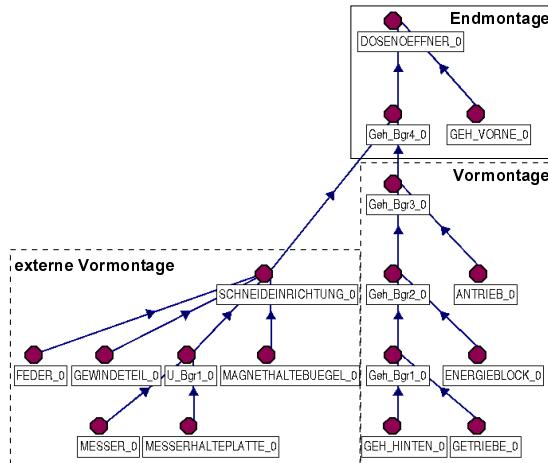


Abbildung 59: Montagestruktur des Dosenöffners

Der Zusammenbau der Schneideeinrichtung wird in dieser Anlagenkonfiguration nicht erledigt, sondern findet separat statt. Die Teile werden hier komplett montiert angeliefert und verbaut. Für die Endmontage erstellt der Planer neben der globalen Struktur bereits den Ablaufplan in einer ersten Version im System CosMonAut.

Für die Produktgestaltung bedeutet dies in der Konsequenz, dass die Schneideeinheit weiterhin eine separate Einheit bleibt und ferner das Getriebe und der Energieblock (Akku, Netzanschluss) ebenfalls eigenständige, bereits vormontierte, Module sind. Lösungen wie etwa ein Integralgehäuse, das sämtliche Einzelteile aufnimmt, scheiden aufgrund des damit verbundenen großen Montageaufwandes innerhalb einer einzigen Montagestufe aus.

### 6.1.3 Stufe 2 A: Planung der Teilvergänge

Die Grundlage der Planung ist der Entwurf des Ablaufplanes. Bei Bedarf werden neue Teilschritte in CosMonAut ergänzt oder existierende Beschreibungen modifiziert. Für die einzelnen Aufgaben lassen sich nun die Detailbetrachtungen anstellen. Geplante Teilschritte sind bereits in der Petri-Netz-Repräsentation

## 6.1 Planung der automatischen Montage eines elektrischen Dosenöffners

tation über die Aufrufe durch MMS-Befehle einzubinden, sodass die Planungsdaten im Rechnersystem stets aktuell und vollständig sind.

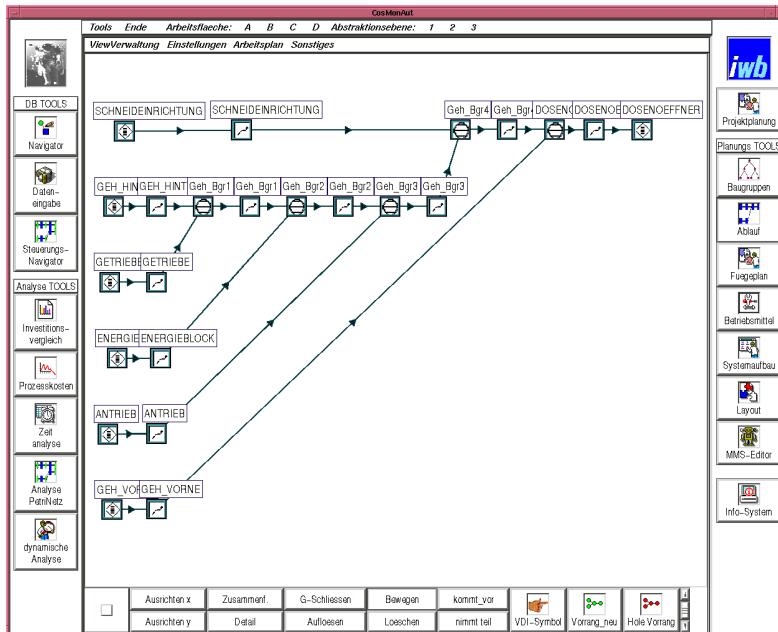


Abbildung 60: Erster Entwurf des Ablaufplans

Als Betriebsmittel stehen ein 6-Achs-Roboter der Firma Stäubli mit einer Adept-Steuerung sowie ein Greifer für die alte Akku-Variante zur Verfügung. Zuerst erfolgt das Rüsten der Zelle für die Montage des Dosenöffners. Das Anlagenkonzept (FICHTMÜLLER 1996) sieht vor, dass sich auf dem neutralen Grundaufbau der Laststände unterschiedliche Komponenten platzieren. Diese werden teilweise über das Materialflusssystem angeliefert und der Roboter ist in der Lage, die Zelle entsprechend umzurüsten. Hier setzt sich die Idee der Modularisierung fort. Es gibt standardisierte Schnittstellen für den Roboterflansch.

Durch die Festlegung des Roboters werden die Bewegungen in der 3D-Simulation bereits in der RC-Programmiersprache erstellt, in diesem Fall in V+. Nach der Festlegung des Roboterbewegungsprogramms ist dieses entsprechend in die Steuerungssequenz über primäre und sekundäre MMS-Befehle integrierbar.

Das maximale Öffnungsmaß des Greifers definiert hier die maximale Breite des Gehäuses. Gleichzeitig ist von der Nutzlast des Roboters das Greifergewicht abzuziehen, um das maximal erlaubte Gewicht des Dosenöffners zu bestimmen. Im vorliegenden Fall bleiben aber noch gut 8 kg Nutzlast, sodass das tatsächliche Gewicht des Dosenöffners eher durch ergonomische Aspekte be-

schränkt wird. Die Wahl eines filigraneren Roboters steht hier nicht zur Debatte, da das Gerät einerseits bereits als freie Kapazität vorhanden ist und andererseits auch die Anlage für andere Produkte zum Einsatz kommt.

### a) Stufe 2 – 1 A: Werkstückunabhängige Nebenprozesse

Der initierende Rüstvorgang der Zelle kann bereits geplant werden, selbst wenn sich Details in den Betriebsmitteln noch ändern.

Der Greifer steht in einem Greiferbahnhof auf einer definierten Schnittstelle des Laststandes zur Verfügung und wird vor der Handhabung der einzelnen Werkstücke an die Roboterhand angeschlossen.

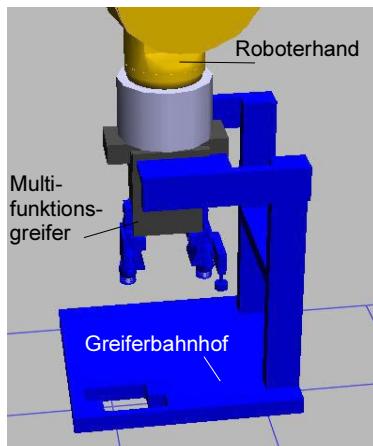


Abbildung 61: Planen der Greiferaufnahme in der 3D-Simulation

Der Aufnahme- und Absetzvorgang des Greifers lässt sich nun in der 3D-Simulation planen (s. Abbildung 61). Der Planer fügt den Rüstvorgang in der Montagevorgangsbeschreibung in CosMonAut hinzu.

### b) Stufe 2 – 2 A: Periphere Montagebewegung

Das Layout auf dem Laststand gibt die Lage für die diversen Montagebetriebsmittel grob vor. Zudem ist die Entscheidung gefallen, dass die Montagevorrichtung zum Einsetzen der Schneidvorrichtung weiterhin eingesetzt wird, da sich diese nicht ändert. Somit kann sich der Planer bereits eine ungefähre Bewegung vom Ort des Werkstückträgers auf dem Laststand zur Montagevorrichtung überlegen. Dieser Schritt wird dann später mit der konkreten Geometrie unter Zuhilfenahme der automatischen Bahnplanung im 3D-Simulationssystem nochmal wiederholt und das Ergebnis weiter verfeinert.

### c) Stufe 2 – 3 A: Be-/Entladen der Bereitstellung

Die Bereitstellung ist in diesem Falle zweistufig: Zunächst werden über das Transportsystem losweise die Werkstücke auf Trägern an die Montagezelle

geliefert, die dann vom Transportwagen auf den Laststand zu übernehmen sind. Anschließend sind die einzelnen Werkstücke den Trägern zu entnehmen und dann den nachfolgenden Operationen zuzuführen.

Die Übernahme des kompletten Trägers vom Materialflusssystem durch den Roboter ist bereits sehr genau planbar, da die standardisierten Träger und Aufnahmestellen auf dem Laststand bereits bekannt sind. Diese Operation ist als eine der ersten durchzuführen, damit die Montage überhaupt starten kann. Im Anschluss gilt es, den Weg vom abgesetzten Träger zum Greiferbahnhof zu bestimmen; dieser fällt wiederum in die Kategorie der Werkstückunabhängigen Nebenprozesse. Die Entnahme der Gehäusehälften kann ebenfalls bereits sehr fein geplant werden, da dieselben Werkstückträger wie beim Vorgängermodell zum Einsatz kommen und die Randbedingungen bezüglich Gehäusebreite und -länge dadurch bereits feststehen.

### d) Stufe 2 – 4 A: Annähern / Verlassen der Fügestelle

Hier wird der Weg zur Montagevorrichtung geplant, in der bereits der erste Fügepartner eingelegt ist. Beispielsweise ist die Schneideeinrichtung bereits abgelegt. Der Greifer führt die vormontierte Gehäusehälfte an die Fügestelle heran.

### e) Stufe 2 – 5 A: Elementare Montagebewegung

In diesem Schritt wird nun die Montage der Schneideeinrichtung in das Gehäuse sowie das Schließen der Gehäusehälften geplant. Abbildung 62 zeigt den entsprechenden Ausschnitt des Ablaufplans. Die vorgesehene Montagevorrichtung ist dem Planer bereits bekannt.

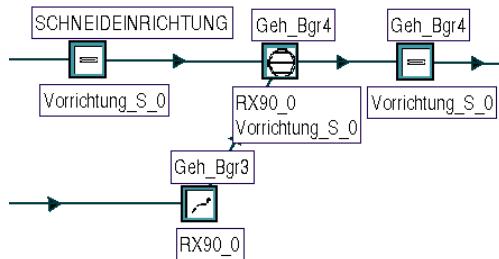


Abbildung 62: Ausschnitt des Montageablaufplans des Dosenöffners

Die Lösung sieht vor, dass die Schneideeinrichtung in einer Aufnahme bereit liegt und der Roboter das Gehäuse in den Bajonettverschluss einsetzt und verriegelt (s. Abbildung 63, hier ist die Vorrichtung allerdings ausgeblendet). So mit ist die prinzipielle Bewegungskinematik festgelegt. Ferner lassen sich aus den Aufnahmepunkten der Vorrichtung wiederum Vorgaben an die Außenkontur ableiten.

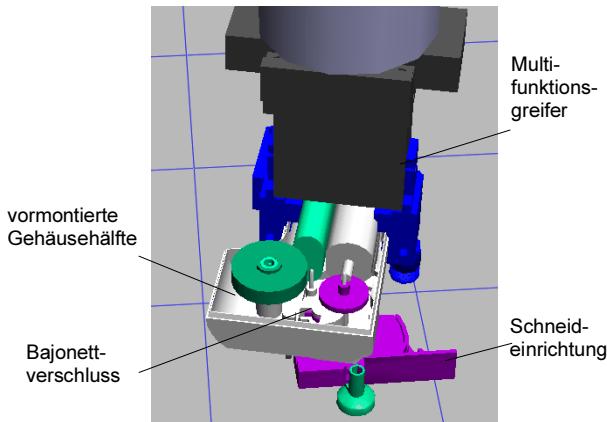


Abbildung 63: Montage von Gehäuse und Schneideeinrichtung

#### 6.1.4 Stufe 3 A: Synchronisation

Nachdem für alle Teilvergänge der Montagevorgangsbeschreibung auch die entsprechenden Roboterbewegungsprogramme feststehen und in der Ablaufsteuerung korrekt eingegliedert sind, kann der Montageablauf zunächst simulativ getestet werden. Dazu wird das Petri-Netz in einzelnen Schritten manuell durchgetaktet und die Reaktion der simulierten Betriebsmittel in der 3D-Simulation beobachtet. Abbildung 64 zeigt den Ausschnitt im Petrinetz, der in Abbildung 62 als Ablaufplan dargestellt war. Für jede Montageaufgabe ist nun eine Kombination von den an der Aufgabe beteiligten Objekten als Kreis dargestellt. Dazwischen sind die Transitionen zu sehen. Zusätzlich ist im Petri-Netz auch der Ablauf des Roboters RX90 modelliert. In diesem Anwendungsbeispiel müssen lediglich die Bewegungsabläufe des Roboters koordiniert werden, da dieser das einzige Handhabungsbetriebsmittel ist.

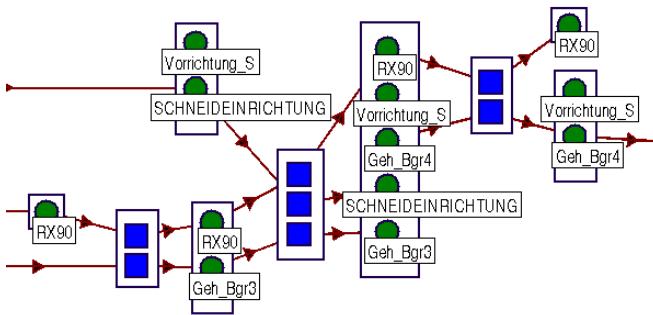


Abbildung 64: Steuerungsnetz für die Dosenöffnermontage

## 6.2 Planung einer Bohrmaschinengehäusemontage

---

Über die entsprechende Simulations-VMD kann der Roboter in der 3D-Simulation angesprochen werden, um den Montagevorgang zu verifizieren.

### 6.1.5 Stufe 4 A: Montageanlauf

Treten in der Simulation keine Fehler auf, kann der Planer anstelle der Simulations-VMD die VMD für den realen RX130 Roboter mit dem Client in CosMonAut verbinden und die reale Anlage aus dem System CosMonAut steuern (s. Abbildung 65). Die Planung ist damit abgeschlossen.



Abbildung 65: Steuerung der realen Dosenöffnermontage mit CosMonAut

## 6.2 Planung einer Bohrmaschinengehäusemontage

In dieser Fallstudie ist die Montage eines Bohrmaschinengehäuses zu planen. In den Vordergrund der Betrachtung rückt hier die Stufe 3, die Synchronisation der Einzelvorgänge, zudem kommt die Analyse des Montageablaufes zur Anwendung. Geplant wird ein Vormontageschritt an einer automatischen Montagestation: das Einsetzen der Spindel. In den hier nicht mehr betrachteten nachgelagerten Montageschritten werden die Zahnräder eingelegt und das Getriebe fertiggestellt. Den Abschluß bildet der Datenaustausch zur übergeordneten PPS-Ebene.

### 6.2.1 Planungsvoraussetzungen

In diesem Beispiel erfolgt im Wesentlichen eine Umplanung, bei der sowohl das Produkt als auch die Primärkomponenten von der vorhergehenden auto-

matisierten Montagelösung übernommen werden konnten. Lediglich die neue Arbeitsaufteilung und damit Anlagenstrukturänderung erfordert diese Planung.

### 6.2.1.1 Produktkomponenten

Die Einzelkomponenten für die Vormontage sind in Abbildung 66 dargestellt: Das Gehäuse aus Aluminium-Druckguss, der Distanzring, die Spindel als Baugruppe mit Axiallager, der Sicherungsring (von links nach rechts).

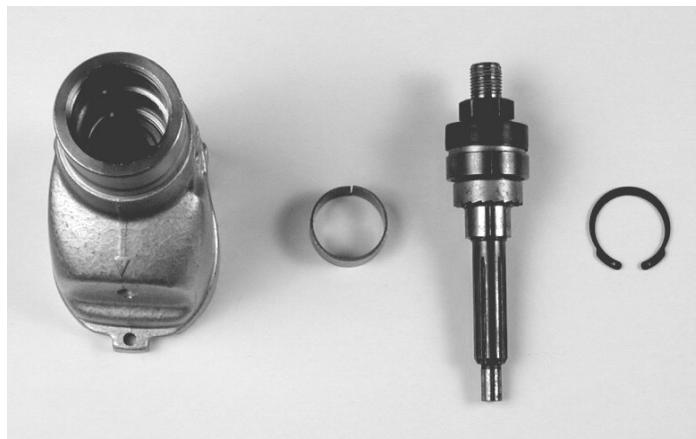


Abbildung 66: Komponenten für die Vormontage des Getriebes

### 6.2.1.2 Einzusetzende Komponenten der Anlage

Die Montagevorgangsbeschreibung ergibt sich aus der Struktur des Gesamtablaufs. Hier überwiegt der Einfluss der Montageanlage, da teilweise die bewährten Betriebsmittel wie Greifer, Laststand und Pressmodul wiederverwendet werden sollen. Auf dem Pressmodul befinden sich ein Magazin für die Distanzringe sowie ein Magazin für die Sicherungsringe. Die Komponentensteuerung des Pressmoduls bedient die Magazine. Ferner soll als Handhabungsbetriebsmittel der Montagezelle ein Roboter RX 90 von Stäubli beschafft werden.

Dieser Roboter hat einen kleineren Arbeitsraum als der im oben genannten Anwendungsbeispiel eingesetzte (900 mm Sphärendurchmesser statt 1300 mm). Eine Analyse in der 3D-Simulation ergibt, dass die Anordnung des Roboters neben dem Laststand hier nicht sinnvoll ist, weil nur ein geringer Teil des Laststandes erreichbar wäre. Aus diesem Grund platziert der Planer den Roboter in die Mitte des Laststandes. Da die Planung und Inbetriebnahme mit dem System CosMonAut und dem MMS-CORBA-Ansatz durchgeführt werden soll, muss der Roboter mit entsprechender Steuerung mit Ethernet-Anschluss ausgestattet sein. Ferner soll der modulare Ansatz auch in der Hardware seinen Niederschlag finden, daher fällt die Entscheidung, das Pressmodul mit einer separaten SPS als Komponentensteuerung zu versehen. Hier kommt eine Siemens S7-300 Steuerung zum Einsatz. Beide Automatisierungskompo-

nenten werden über einen Windows NT-PC mit den entsprechenden Softwarepaketem der Hersteller bedient (s. Abbildung 67).

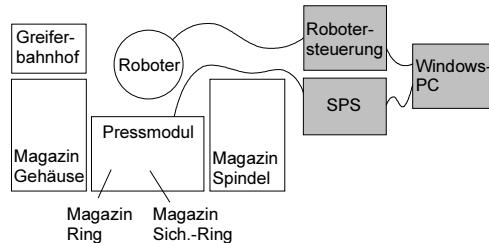


Abbildung 67: Schematisches Layout der Montageanlage

### 6.2.2 Stufe 1 P: Produktkomponenten und Struktur des Ablaufs

Die Produktstruktur ist gleichzeitig die Montagereihenfolge. Aufgrund des Funktionsprinzips der Konstruktion wurde diese hier produktgetrieben definiert, wobei bereits im Design allgemeine montagetechnische Grundsätze, wie Einheitlichkeit der Fügerichtung, Berücksichtigung finden. Die Bestandteile können alle sequentiell in die vordere Getriebeöffnung eingeführt werden. Die Darstellung dieses Montagevorranggrafen in CosMonAut zeigt Abbildung 68.

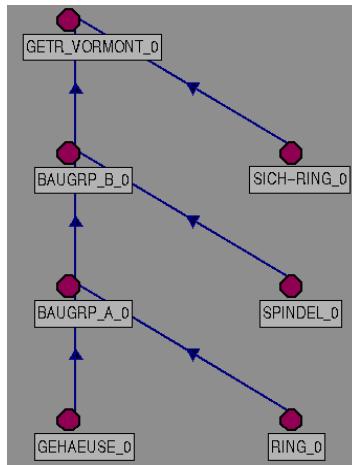


Abbildung 68: Montagevorranggraf der Getriebevormontage

### 6.2.3 Stufe 2: Planung der Teiltorgänge

In CosMonAut wird der Ablaufplan erstellt und die jeweiligen Betriebsmittel den einzelnen Montageaufgaben zugewiesen. Für die Detailplanung steht die Anbindung zur 3D-Simulation zur Verfügung. Es werden die einzelnen Teilschritte der Montagevorgangsbeschreibung sukzessive fertiggeplant. Als Besonderheit ist hier zu erwähnen, dass bei dieser Umplanung sämtliche Produktdaten bereits vollständig vorhanden sind. Trotzdem ist die Planung der Vorgangsbeschreibung überwiegend anlagengetrieben.

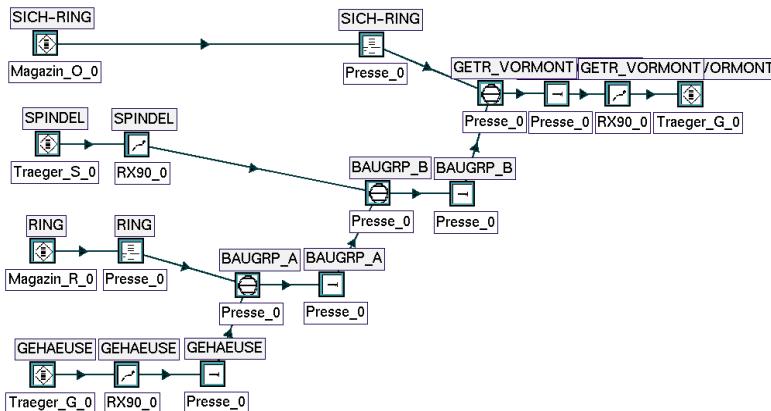


Abbildung 69: Ablaufplan der Getriebemontage in CosMonAut

Der Ablauf sieht vor, dass das Gehäuse vom Roboter aus dem Werkstückträger entnommen und zum Pressmodul gebracht wird. Das Gehäuse wird auf dem verfahrbaren Schlitten abgesetzt und von diesem unter das Distanzringmagazin gebracht, wo ein Ring eingesetzt wird. Inzwischen holt der Roboter eine Spindel aus dem anderen Werkstückträger; der Schlitten fährt schließlich wieder in die Übergabeposition zurück.

Das im Pressmodul integrierte Magazin wirft einen Distanzring. Dieser fällt in das darunter vom Transportschlitten des Moduls bereitgestellte Gehäuse. Danach fährt der Schlitten wieder in die Übergabeposition, wo der Roboter die Spindel montiert (s. Abbildung 70). Zuletzt fährt der Schlitten unter den Pressenstempel. Der Sicherungsring wird eingelegt und verpresst.

Im Anschluss findet die Planung der fünf unterschiedlichen Teiltorgänge statt. Die Vorgehensweise erfolgt analog zu der Darstellung im vorangegangenen Beispiel und wird hier deshalb nicht weiter erläutert.

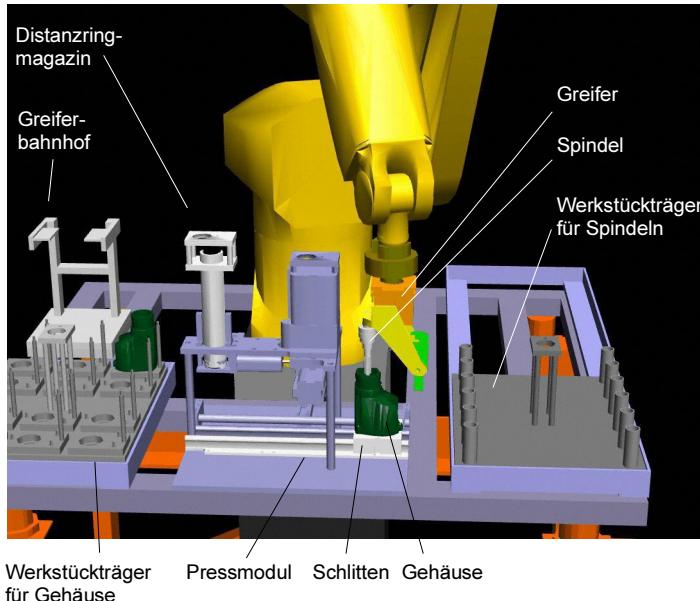


Abbildung 70: Einsetzen der Spindel in der Simulation

### 6.2.4 Stufe 3: Synchronisation der Steuerung der Anlage

Die MMS-Befehle zum Starten der Einzeltätigkeiten des Roboters und des Pressmoduls werden so gestaltet, dass die Reihenfolge stimmt und auch die Koordination von Roboter und SPS erfolgt. Diese Koordinationsstellen sind im Petri-Netz (s. Abbildung 71) an den gemeinsamen Transitionen der Teilnetze von Pressmodul und Roboter zu erkennen, z. B. die verknüpfte zweite Transition unten links mit drei Einzeltätigkeiten, an der überprüft wird, ob der Roboter „RX90“ das Gehäuse abgesetzt und den Greifer geöffnet hat, bevor das Pressmodul „Presse“ den Schlitten zum Einsetzen des Distanzringes in Bewegung setzt. Die im Netz markierten Stellen beschreiben das Holen der Spindel durch den Roboter und den parallelgeschalteten Vorgang im Pressmodul, der das Gehäuse mit dem eingesetzten Ring (Baugruppe A, s. Abbildung 68) in die Übergabeposition bringt. Aufgrund der vielen Netzelemente wurde hier die Darstellung lediglich mit den vereinfachten Symbolen für das Netz gewählt. Die Gesamtansicht wäre in dieser verkleinerten Darstellung mit den Symbolen für die jeweiligen MMS-Befehle nicht mehr deutlich zu erkennen.

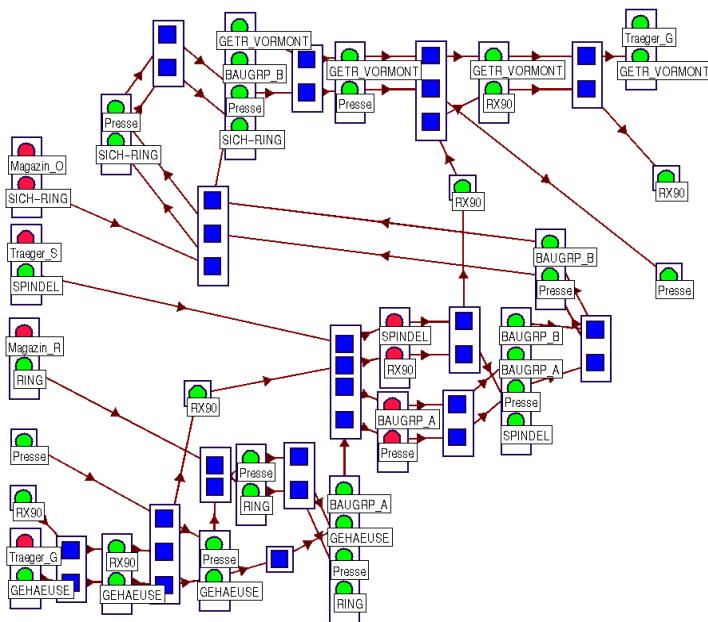


Abbildung 71: Vorgangsbeschreibung mittels Petri-Netz

Zur Beurteilung der Planungsqualität kommen hier die Analysewerkzeuge zum Einsatz. Abbildung 72 zeigt das oben dargestellte Netz im Werkzeug CosMon-Aut, gleichzeitig wurde der Editor zur Analyse des Petri-Netzes aktiviert. Das Analyseergebnis erscheint als Balkendarstellung an den einzelnen zeitbemaßten Stellen sowie die summarische Zahlenangabe im Textblock unten rechts und gibt Aufschluss über die Takt- und Durchlaufzeit dieses Montageprozesses. Neben dieser Betrachtung ist auch eine monetäre Bewertung der Montage erforderlich. Hierfür können im Analysewerkzeug auch die Prozesskosten am Petri-Netz ermittelt und visualisiert werden.

## 6.2 Planung einer Bohrmaschinengeriebemontage

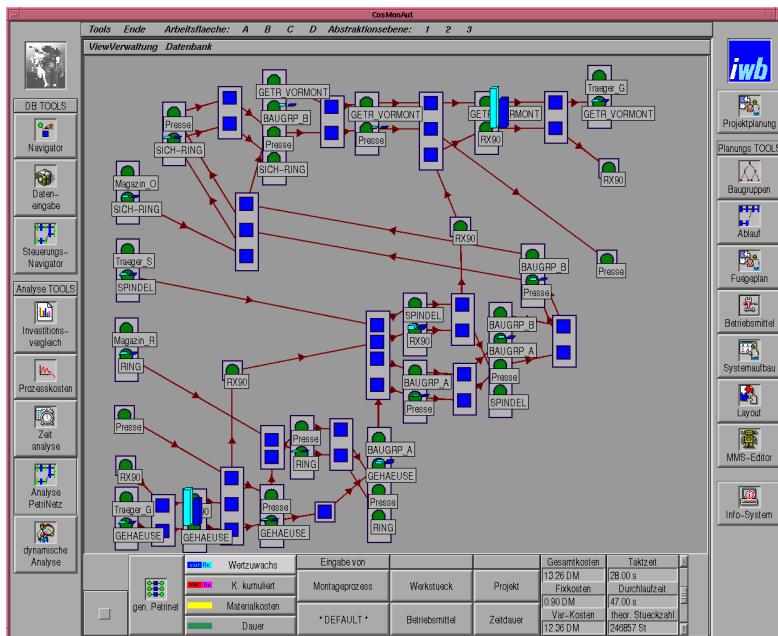


Abbildung 72: Kostenanalyse bezogen auf die Kostenträger

### 6.2.5 Stufe 4: Montageanlauf

Nach erfolgter Validierung des gesamten Montagevorgangs in der 3D-Simulation und ebenfalls nach dem Aufbau der Anlagenkomponenten durch den Hersteller kann nun aus CosMonAut die reale Anlage gesteuert werden (s. Abbildung 73). Dabei findet die Kommunikation nicht mehr mit den CORBA-VMDs der simulierten Komponentensteuerung statt. Die MMS-Befehle der Montagevorgangsbeschreibung werden direkt an die VMD für den Roboter RX90 und an die VMD für die Siemens S7-300 SPS geschickt.



Abbildung 73: Einsetzen der Spindel durch den Roboter

Nach der Kalibrierung des realen Hardwareaufbaus wird der Ablauf in CosMonAut schrittweise durchgetaktet. Die Robotergeschwindigkeit ist zunächst reduziert. Abbildung 73 zeigt den Einbau der Spindel in das Getriebegehäuse. Der Vorgang ist vorher in der Simulation (s. Abbildung 70) geplant worden.

### 6.2.6 Datenaustausch mit der Auftragssteuerungsebene

Die Daten aus der Montagevorgangsplanung werden anschließend über die Schnittstelle in das PPS-System Lowis übertragen, um dort für den Produktivbetrieb zur Verfügung zu stehen. Aufgrund der unterschiedlichen gespeicherten Informationen, die aus dem Anwendungsfeld der Werkzeuge resultiert, ist im PPS-System noch eine Nachbearbeitung erforderlich, beispielsweise die Vergabe von Artikelnummern, welche in den Planungsschritten in CosMonAut nicht benötigt werden.

Die Abbildung 74 zeigt einen Screenshot des PPS-Systems. Der Arbeitsplan listet die erforderlichen Handhabungsschritte je Komponente auf (im Bild links unten). Über die Schnittstelle ist es auch möglich, gesamte Aufträge zu exportieren (Dialogbox rechts unten).

## 6.2 Planung einer Bohrmaschinengebremontage

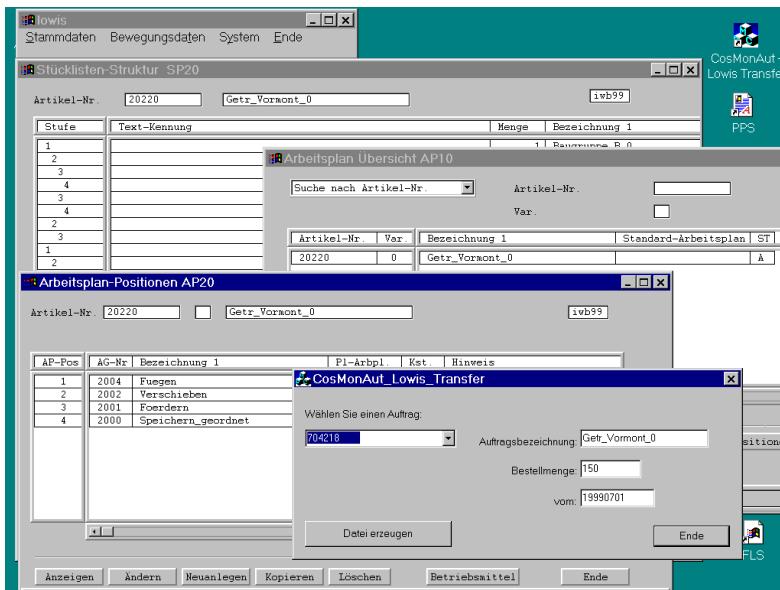


Abbildung 74: Datenaustausch mit dem PPS-System

---

## 7 Bewertung des Ansatzes

### 7.1 Vorgehensweise

Die vorgestellte Vorgehensweise unterstützt eine durchgängige Beschreibung des Montageablaufes vom Konzept bis zum Anlauf der Montageanlage. Durch eine Unterscheidung in einen produktgetriebenen und einen anlagengetriebenen Ablauf wird alternativ der Einfluss des Produktes auf den Montagevorgang und die Anlage bzw. umgekehrt der Einfluss der Anlage auf den Vorgang und das Produkt berücksichtigt. Diese Konzeption erfüllt die Forderungen aus Kapitel 2.5. In den beiden Anwendungsbeispielen wurde die Vollständigkeit des Ansatzes vorgestellt. Für eine weitergehende Beurteilung der Praktikabilität in der industriellen Praxis wären weitergehende Studien notwendig, die über den Umfang der Zielsetzung dieser Arbeit hinausgehen.

### 7.2 Datenmodellierung

Die Vorteile der objektorientierten Modellierungsweise sind mittlerweile allgemein anerkannt. Die separate Abbildung der einzelnen Vorgänge der Betriebsmittel bewährte sich in der Anwendung. Der Ablauf zeichnet sich durch eine hohe Transparenz aus, zudem sinkt durch die Aufteilung die Komplexität für den Systemanwender.

CHOUKA U. A. (1998) haben insgesamt 43 Beschreibungsarten für die Automatisierungstechnik untersucht. In ihren Ergebnissen geben auch sie den Petri-Netzen die meisten positiven Bewertungen. Die Petri-Netze sind laut dieser Aufstellung auch die einzige Beschreibungstechnik, die die vier Phasen Spezifikation, Modellbildung, Implementierung und Betrieb gut unterstützen können (S. 589). Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen auch LITZ & FREY: „Im wesentlichen sind es zwei Arten solcher [formaler] Darstellungen, die sich in jüngster Zeit als praktikabel erwiesen haben: Es sind bestimmte Ausprägungen von Petri-Netzen und von endlichen Automaten. Praktikabel bedeutet dabei, daß sie zur Lösung nicht nur akademischer Probleme geeignet sind, daß sie in verfügbare Entwurfswerzeuge integriert sind und daß zwischen der formalen Darstellung und der Realisierung eine automatische Umsetzung möglich ist. (1999, S. 150).“ Somit wird die Wahl dieses Ansatzes als Basis der vorliegenden Arbeit bestätigt.

### 7.3 Kommunikation der Steuerung

Die Kommunikation zwischen Zellensteuerung und Komponentensteuerung erfolgt auf Basis des CORBA Übertragungsstandards, die Befehle werden gemäß MMS formuliert (CUIPER & RÖGGODERER 1997). Mittlerweile setzen auch andere auf das Konzept: Ebenfalls mit CORBA arbeiten LEI U. A. (1998), die - eine agentenorientierte Prozessplanung und Maschinensteuerung entwickelt haben. Die Architektur basiert auf CORBA zur Kommunikation, die Spezifikation des Nachrichteninterfaces fußt aber auf keinem Standard, sondern ist

selbst erstellt. DUCROUX (1999, S. 478) kündigt eine ‚Integration Platform‘ mit CORBA und MMS an, um Engineering-Prozesse für Automatisierungstechniken zu unterstützen. Bislang ist aber noch kein Planungswerkzeug auf dieser Basis vorgestellt worden.

Die Tatsache, dass auch andere dieses Konzept gewählt haben, bestätigt den in der Arbeit eingeschlagenen Weg.

## 7.4 Erfüllung der aufgestellten Forderungen

### 7.4.1 Forderung 1: Die Prozessplanung steht im Vordergrund der Betrachtung

Die zentrale Komponente der vorgestellten Planungsvorgehensweise ist die Montagevorgangsbeschreibung (s. Kapitel 4.1.2). Es wurden fünf Kategorien an Teilvergängen definiert, um abgeschlossene Planungsaufgaben für den Montageplaner schnüren zu können. Der gesamte Montagevorgang wird in insgesamt 4 Stufen systematisch entwickelt (s. Kapitel 4.2.1). Im Unterschied zu anderen Planungsmethodiken werden das Produkt und die Anlage als Teilnehmer am Montagevorgang betrachtet, im Vordergrund steht die Planung des Montageablaufes. Somit ist die Forderung 1 erfüllt.

### 7.4.2 Forderung 2: Wechselseitige Berücksichtigung von Anlagen- und Produkteinflüssen

In der vorgestellten Planungsvorgehensweise wird unterschieden, ob das Produkt oder die Anlage das treibende Moment bilden. Insbesondere ergibt sich eine unterschiedliche Reihenfolge bei der Planung der Teilvergänge. Somit wird berücksichtigt, welche Gegebenheiten von Produkt bzw. Anlage in Verbindung mit der Planung des Montagevorgangs welche Vorgaben für die Gestaltung von Anlage bzw. Produkt festlegen. Die Forderung 2 ist also erfüllt.

### 7.4.3 Forderung 3: Durchgängigkeit von der Idee bis zur Realisierung

Die vier Stufen der Planung umfassen das gesamte Spektrum von der Vorgangsstrukturplanung bis zum Montageanlauf an der realen Anlage (s. Kapitel 4.2). Auch das in dieser Arbeit weiterentwickelte Rechnersystem CosMonAut (s. Kapitel 5) bietet nun in allen Stufen Unterstützung für den Planer. Die Anbindung an die übergeordnete PPS-Ebene stellt eine durchgängige Datenverwendung über den Anwendungsbereich des Planungswerkzeugs hinaus sicher. Die Forderung 3 ist ebenfalls erfüllt.

## 7.5 Wirtschaftliche Bewertung

Die Aufwand-/ Nutzen-Abschätzung ist für die beschriebene Vorgehensweise nicht allgemeingültig durchführbar. Einerseits liegt das prototypische Werkzeug nicht als kommerzielles Produkt vor, sodass Angaben für die Investitionssumme lediglich geschätzt werden können. Als Anhaltswert dienen beispielsweise die Preise für die Planungsumgebung von Tecnomatix, demnach sind für eine Kombination von Prozessplanung und 3D-Simulation ca. 73.000 DM<sup>29</sup> anzusetzen, die Funktionalität der Steuerungsplanung und -anbindung ist hierbei allerdings noch nicht enthalten.

Andererseits hängt der erzielbare Nutzen sehr stark von der spezifischen Situation ab; Einsparpotentiale bei der Wiederverwendung von automatisierten Montageanlagen sind nicht allgemeingültig quantifizierbar. Allein die Investition in einen 6-Achs-Roboter kann mit Steuerung mit ca. 94.500 DM<sup>30</sup> zu Buche schlagen. Es ist im Einzelfall stets zu prüfen, ob die Anlagen bereits amortisiert sind, wie lange die geplante Produktionsdauer und die zu erwartende restliche Produktionsmittellebensdauer geschätzt wird.

Eine qualitative Gegenüberstellung (s. Tabelle 3) identifiziert daher lediglich die elementaren Einflussgrößen, denen im konkreten Fall die entsprechenden Werte zugewiesen werden müssen.

Aufwände ergeben sich insbesondere durch die Anschaffungskosten der Rechnersysteme und entsprechende Mitarbeiterschulung sowie durch die Änderung der Ablauf- und ggf. Aufbauorganisation, die u.U. ebenfalls Mitarbeiter-training in Bezug auf Teamverhalten etc. erforderlich machen. Diese Aufwände sind als einmalig zu betrachten.

Die Nutzenpotenziale sind im Planungsablauf selbst zu sehen: Dort fällt weniger Blindleistung wie Datenaufbereitung etc. an, zudem ist die Vorgehensweise durch die Festlegung des Treibers effizienter und weniger fehleranfällig, weil gleich die richtigen Prämissen bei der Planung in Betracht gezogen werden. Zudem steckt ein enormes Potenzial im effizienten Einsatz von vorhandenen Kapazitäten bzw. Produktkomponenten oder durch den gezielten Technologiewechsel mit entsprechendem Rationalisierungspotenzial bei Produkt bzw. Anlage. Hierbei unterstützt auch das Planungswerkzeug selbst, indem es Analysewerkzeuge für die Zeit- und Kostenbetrachtung vorhält.

Das gesamte Nutzenpotenzial lässt sich bei jeder Planung, die nach diesem Ansatz abläuft, erneut ausschöpfen.

---

<sup>29</sup> Auskunft von Technomatix 5/2000: eMWorkplace ca. 34.000 DM, eMPlanner ca. 39.000 DM

<sup>30</sup> Listenpreis 5/2000 für einen Stäubli RX 90 mit ethernetfähiger Steuerung: 94.490 DM

Aufwand ist zu erwarten durch	Nutzen ist zu erwarten durch
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anschaffung des Rechnerwerkzeugs für Prozess- und Steuerungsplanung sowie ggf. der Hardware</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimierter Datenkonvertierungsaufwand durch konsistentes Modell über die gesamte Entwicklung bis zum Betrieb der Anlage</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schulung des Personals für das Werkzeug: Arbeitszeit und Lehrgangsgebühren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effizientere Vorgehensweise mit <ul style="list-style-type: none"> <li>- besseren Zwischenergebnissen</li> <li>- weniger und kürzeren Änderungsschleifen</li> <li>- integrierter Analyse und Bewertung der Planung</li> </ul> </li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anlaufverluste beim Implementieren des treiberorientierten Entwicklungsablaufes im Betrieb</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potentiale durch individuelle Treiberfestlegung: <ul style="list-style-type: none"> <li>- geringerer Entwicklungsaufwand bei identischen Komponenten im Nachfolgeprodukt</li> <li>- längere Kapitalrückflussperioden für Amortisierung der Anlagen / Bildung stiller Reserven bei Weiterverwenden bestehender Investitionen</li> <li>- Effizienzsteigerung bei Einsatz wirtschaftlicherer Technologien für das Produkt oder die Anlage</li> </ul> </li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kürzere Gesamtentwicklungszeit, d.h. schnellerer Markteintritt</li> </ul>

Tabelle 3: Einflussgrößen der Aufwand-/Nutzen-Abschätzung

Insgesamt ist zu erwarten, dass die Nutzeffekte die Aufwendungen deutlich übersteigen und somit aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten die Umsetzung des vorgestellten Konzepts sinnvoll ist.

---

## 8 Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt eine Vorgehensweise und ein Rechnerwerkzeug zur durchgängigen Planung von Montagevorgängen und den zugehörigen Anlagen vor.

Die Konzeption erfolgte unter Berücksichtigung der drei Forderungen:

- Explizite Betrachtung der Vorgangsbeschreibung im Planungsablauf
- Berücksichtigung von Anforderungen durch das Produkt oder die Montageanlagen
- Durchgängigkeit von der Idee zur Realisierung

Der Stand der Technik erfüllt diese noch nicht adäquat.

Die Vorgehensweise fußt auf der getrennten Betrachtung der Gestaltungselemente Produkt, Montagevorgangsbeschreibung und Montageanlage. Dabei kann entweder das Produkt oder die Anlage zum Treiber der Entwicklung werden und die Vorgaben an die beiden anderen Gestaltungselemente diktieren. So wird den unterschiedlichen Anforderungen aus der betrieblichen Praxis, wie etwa Einführung neuer Technologien im Produkt oder in der Montage bzw. Weiternutzung einer unausgelasteten Montageanlage bzw. von etablierten Produktkomponenten Rechnung getragen. Für die Montagevorgangsbeschreibung wurden fünf Kategorien von Teiltätigkeiten definiert. Bei der Berücksichtigung von Produkt oder Anlage als Treiber ändert sich neben den Eingangsinformationen auch die Reihenfolge, in der diese Teiltätigkeiten geplant werden.

Eine hierarchische, sukzessive aufgebaute Beschreibung des Montagevorgangs begleitet den Planer während seiner gesamten Arbeit.

Für die Steuerung der Anlage wird das hierarchische Prinzip favorisiert, in dem eine Ablaufsteuerung in einem neutralen Format die einzelnen Komponentensteuerungen koordiniert. Zum Einsatz kommt MMS als Steuerungssprache; die Kommunikation selbst wird über CORBA abgewickelt. Der Vorteil dieses Konzeptes liegt darin, dass es sowohl für die Steuerung einer simulierten Anlage zur Verifizierung des Modells als auch für die Steuerung der realen Komponenten eingesetzt werden kann. Der Austausch einzelner Komponentensteuerungen in der Gesamtanlage ist aufgrund des standardisierten Interfaces (VMD) sehr leicht möglich, ohne dass der Gesamtablauf grundlegend zu überarbeiten ist.

Die prototypische Umsetzung erfolgte im System CosMonAut. Dieses unterstützt die Planung des Montagevorgangs von der Reihenfolgestruktur über die Ablauf- und Arbeitsgangfolgeplanung bis hin zum Steuerungsprogramm. Neu definierte Symbole für die Steuerungsbefehle erleichtern die Programmierung. Die grafisch-interaktive Bedienung ließ sich konsequent beibehalten. Als Komponenten der Demonstrationsanlage wurden VMDs für Stäubli-Roboter mit Adept-Steuerung sowie eine Siemens SPS S7-300 realisiert. Diese VMDs gibt es sowohl für die reale Anlage als auch für das Simulationsmodell. Durch die

---

Auswahl der entsprechenden VMD kann ein Umschalten zwischen Realität und Planung erfolgen, das Steuerungsmodell bleibt dasselbe.

Die vierstufige Planungsvorgehensweise für den Montagevorgang kann produkt- oder anlagengetrieben ablaufen und umfasst alle Aktivitäten von der Vorgangsstrukturplanung bis zum Montageanlauf. Das weiterentwickelte Rechnersystem CosMonAut unterstützt den gesamten Planungsablauf. Somit werden alle drei Forderungen erfüllt, was sich vorteilhaft auf den Entwicklungsprozess auswirkt.

Der Gesamtverbund aus Vorgehensweise und Rechnerwerkzeugen ermöglicht eine durchgängige Planung des Montagevorgangs in Abhängigkeit von den Vorgaben des Produktes oder der Anlage (s. Abbildung 75) und liefert somit einen weiteren Beitrag, die Ideen der Virtuellen Produktion Realität werden zu lassen.

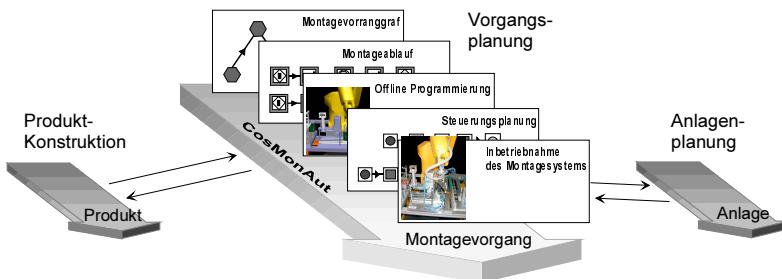


Abbildung 75: Ergebnis der Arbeit: Die durchgängige Entwicklung des Montagevorgangs

---

## Literaturverzeichnis

### AGGTELEKY 1987

Aggteleky, B.: Fabrikplanung – Werksentwicklung und Betriebsrationalisierung. Band 1: Grundlagen, Zielplanung, Vorarbeiten. 2. Aufl., München: Hanser 1987.

### ALBERT & TOMASZUNAS 1998

Albert, J.; Tomaszunas, J.: Rapid Prototyping von speicherprogrammierbaren Steuerungen an virtuellen Maschinen. *Industrie Management* 14 (1998) 5, S. 34 – 38.

### AMBROSY U. A. 1996

Ambrosy, S.; Aßmann, G.; Bindbeutel, K.; Cuiper, R.; Feldmann, C.; Schmalzl, B.: Integriertes Produkt- und Prozeßmodell für Konstruktion und Planung. *ZWF* 91 (1996) 12, S. 607 – 611.

### AMMER 1982

Ammer, D.: Rechnerunterstützte Vorranggraphenerstellung – ein Schritt zur rationellen Montageplanung. *Industrie Anzeiger* 104 (1982) 14, S. 27 – 28.

### BALDWIN U. A. 1991

Baldwin, D.; Abell, T.; Man-Cheung, M.; De Fazio, T.; Whitney, D.: An Integrated Computer Aid for Generating and Evaluating Assembly Sequences for Mechanical Products. *IEEE Transaction on Robotics and Automation* 7 (1991) 1, S. 78 – 94.

### BALZERT 1996

Balzert, H.: Lehrbuch der Softwaretechnik - Band 1 „Software Entwicklung“. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1996.

### BARTHELMEß 1987

Barthelmeß, P.: Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung. Berlin: Springer 1987 (iwb Forschungsberichte 9). Zgl. München: Techn. Univ., Diss., 1987.

### BENDER 1996

Bender, K.: Produktionssystemsteuerung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): *Hütte – Taschenbuch für Betriebsingenieure (Betriebshütte)*. 7. Auflage. Berlin: Springer, 1996, Teil 2, S. 10-89 – 10-103.

### BENDER U. A. 1997

Bender, K.; Bindbeutel, K.; Glander, M.; Karcher, A.: Framework technology for tool integration in integrated product development. *Proceedings of International Conference on Manufacturing Automation, ICMA'97*. Hong Kong 1997, S. 1001 – 1006.

---

BENN U. A. 1997

Benn, W.; Dürr, H.; Dube, H; Löbi, S.; Kunzmann, U.: ISO 10303 (STEP) – Datenaustauschformat oder Modellierungsbasis? *Industrie Management* 13 (1997) 6, special: *Engineering Management 1997/98*, S. 34 – 37.

BERGER 1999

Berger, H.: Automatisieren mit STEP 7 in AWL und SCL. Speicherprogrammierbare Steuerungen SIMATIC S7-300/400. Weinheim: Wiley, 1999.

BERNHART 1993

Bernhart, W.: Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten – Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem. Karlsruhe: Diss. Universität (TH), 1993 (wkb Forschungsberichte 49).

BEUDERT 1999

Beudert, R.: TCP/IP, OPC, DDE... – Von der Leitebene zum Feldbus: TCP/IP und Microsoft markieren den Weg. *it.AV* 2/99, S. 38 – 40.

BLOOMER 1992

Bloomer, John: Power Programming with RPC. Sebastopol: O'Reilly & Associates Inc., 1992.

BOLLER 1993

Boller, A.: Companion Standards für Roboter und CNC. *pa Produktionsautomatisierung* 4/93, S. 45 – 48.

BROCKHAUS 1996

Brockhaus – Die Enzyklopädie: In 24 Bänden. 20. Auflage. Mannheim: F. A. Brockhaus, 1996.

BULLINGER 1986

Bullinger, H. (Hrsg): Systematische Montageplanung – Handbuch für die Praxis. München: Hanser 1986.

BULLINGER & WARSCHAT 1995

Bullinger, H.; Warschat, J. (Hrsg): Concurrent Simultaneous Engineering Systems. Berlin: Springer 1995.

BULLINGER & HEGER 1997

Bullinger, H.; Heger, R.: Interaktive Montageplanung in einer virtuellen Umgebung. *ZWF* 92 (1997) 3, S. 92 – 95.

BURKHART 1997

Burkhart, R.: UML – Unified Modeling Language: Objektorientierte Modellierung für die Praxis. Bonn: Addison-Wesley-Longman, 1997.

CHEN 1997

Chen, K., Lu S.: A Petri-net and entity-relationship diagram based object-oriented design method for manufacturing systems control. *Computer Integrated Manufacturing* 10 (1997) 1-4, S. 17 – 28.

CHEN-LEONG U. A. 1998

Cheng-Leong, A.; Horng, L.; Junhong, Z.: Enactment of IDEF0 Models. In: Proceedings of 14th International Conference on Computer-Aided Production Engineering (CAPE), Tokyo, 8.-10.09.1998, S. 43 – 52.

CHO U. A. 1998

Cho, K.; Oh, J.; Ryu, K.; Choi, H.: An Integrated Process Planning and Scheduling System for Block Assembly in Shipbuilding. *Annals of the CIRP* 1998 (47) 1, S. 419 – 422.

CHOUIKA U. A. 1998

Chouika, M.; Jahnsen, A.; Schnieder, E.: Klassifikation und Bewertung von Beschreibungsmitteln für die Automatisierungstechnik. *at – Automatisierungstechnik* 46 (1998) 12, S. 582 – 591.

COLOMBO 1998

Colombo, A.: Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High-Level Petri Nets. Bamberg: Meisenbach, 1998 (Fertigungstechnik – Erlangen 82). Zgl. Erlangen: Universität, Diss., 1998.

CUIPER U. A. 1996

Cuiper, R.; Feldmann, C.; Roßgoderer, U.: Rechnerunterstützte Parallelisierung von Konstruktion und Montageplanung. *ZWF* 91 (1996) 7-8, S. 338 – 341.

CUIPER & ROßGODERER 1997

Cuiper, R.; Roßgoderer, U.: Durchgängige Planung und Steuerung von Montageanlagen. *Industriemanagement* 13 (1997) 1, S. 60 – 63.

CUTTING-DECELLE & MICHEL 1999

Cutting-Decelle, A., Michel, J.: MANDATE (ISO 15531): A Standardised Way Towards a Dynamic Modelling of Manufacturing Data. In: Roller, D. (Hrsg.): Advanced Manufacturing in The Automotive Industry. Proceedings of 32nd ISATA. 14. –18. Juni 1999. Wien. Croydon: ISATA 1999, S. 441 – 449.

DAENZER & HUBER 1992

Daenzer, W.; Huber, F.: Systems Engineering. 7. Aufl. Zürich: Industrielle Organisation, 1992.

DAMMERTZ 1996

Dammertz, R.: Ein Programmiersystem zur graphisch strukturierten Erstellung von Roboterprogrammen und Programmoberflächen. Aachen: Shaker, 1996 (Berichte aus der Produktionstechnik; Bd. 96, 30).

DIN 19226-1

DIN 19226, Teil 1: Leittechnik – Regelungstechnik und Steuerungstechnik. Allgemeine Grundbegriffe. Berlin: Beuth, 1994.

---

## DIN 19237

DIN 19237: Messen, Steuern, Regeln. Steuerungstechnik. Begriffe. Berlin: Beuth, 1980.

## DIN EN 61131-3

DIN EN 61131, Teil 3: Speicherprogrammierbare Steuerungen – Programmiersprachen (IEC 1131-3). Berlin: Beuth, 1994.

## DIN 66312-1

DIN 66312, Teil 1: Industrial Robot Language (IRL). Berlin: Beuth, 1993.

## DEUTSCHLÄNDER 1989

Deutschländer, A.: Integrierte rechnergestützte Montageplanung. München: Hanser, 1989 (Produktionstechnik – Berlin; 72). Zgl. Berlin: TU Berlin, Diss., 1989.

## DREHER & CUHLS 1999

Dreher, C.; Cuhls, K.: Produktion und Management der Zukunft – Ergebnisse der Delphi '98-Befragung. *wt Werkstattstechnik* 89 (1999) 3, S. 111 – 114.

## DREWS & WEYRICH 1997

Drews, P.; Weyrich, M.: Produktionsplanung und Anlagensimulation mit Methoden der "Virtual Reality". *Industrie Management* 13 (1997) 1, S. 18 – 22.

## DUCROUX 1999

Ducroux, M.: An Integrated Platform for CAD/CAM in the Extended Enterprise. In: Roller, D. (Hrsg.): *Advanced Manufacturing in the Automotive Industry*. Proceedings of 32nd ISATA. 14 - 18. Juni 1999. Wien. Croydon: ISATA 1999, S. 475 – 483.

## DÜRR & KOHL 1998

Dürr, H.; Kohl, S.: Informationsstrukturen für eine durchgängige Auftragsabwicklung. *ZwF* 93 (1998) 3, S. 76 – 79.

## EAI-DELTA 1999

EAI-Delta GmbH (Hrsg.): *ERGOPro – Integrierte Produkt- und Prozeßplanung*. Fellbach: EAI-Delta, Produktschrift, 1999.

## EHRLENSPIEL 1995

Ehrlenspiel, K.: *Integrierte Produktentwicklung – Methoden für die Prozeßorganisation, Produkterstellung und Konstruktion*. München: Hanser, 1995.

## ELMARAGHY U. A. 1998

ElMaraghy, H.; Abdallah, I., ElMaraghy, W.: *On-Line Simulation and Control in Manufacturing Systems*. *Annals of the CIRP* 47 (1998) 1, S. 401 – 404.

ELSHENNAWY U. A. 1993

Elshennawy, A.; Krishnaswamy, G.; Mollaghazemi, M.: Concurrent Engineering Deployment: A Virtual Reality Approach. Integrated Manufacturing Systems 4 (1993) 4, S. 24 – 28.

ESPRIT 1995

ESPRIT Consortium CCE-CNMA (Eds.): MMS: A Communication Language for Manufacturing. Berlin: Springer, 1995.

EVERSHEIM 1989

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik Band 3: Arbeitsvorbereitung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989.

EVERSHEIM U. A. 1993

Eversheim, W.; Baumann, M.; Marczinski, G.; Leber, M.: STEP als Integrationskern für die Produktdatengenerierung. VDI-Z 135 (1993) 7, S. 63 – 66.

EVERSHEIM U. A. 1995

Eversheim, W.; Bochtler, W.; Laufenberg, L.: Simultaneous Engineering. Berlin: Springer 1995.

EVERSHEIM 1996

Eversheim, W.: Integrierte Produkt- und Prozeßgestaltung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Hütte – Taschenbuch für Betriebsingenieure (Betriebshütte). 7. Auflage. Berlin: Springer, 1996, Teil 1, S.7-1 – 7-150.

EVERSHEIM & HACK 1996

Eversheim, W.; Hack, T.: Managing Multiple Product Variants in Assembly Control with a Fuzzy Petrinet Approach. CIRP Annals 1995, Vol. 45 (1996) 1, S. 45 – 48.

EVERSHEIM & SCHENKE 1999

Eversheim, W.; Schenke, F.: Das Virtuelle Produkt – Hilfsmittel zur effizienten Produktgestaltung. wt Werkstattstechnik 89 (1999) 3, S. 73 – 77.

FELDMANN 1996

Feldmann, C.: Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung. Berlin: Springer 1996 (iwb Forschungsberichte 104). Zgl. München: Techn. Univ., Diss., 1996.

FELDMANN & COLOMBO 1999

Feldmann, K.; Colombo, A.: Simulationsbasierte Entwicklung und Implementierung von Steuerungssoftware für flexible Produktionssysteme. In: Feldmann, K.; Reinhart, G. (Hrsg.): Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion - Modellaufbau, Simulationsexperimente, Einsatzbeispiele. Berlin: Springer, 1999, S. 161 - 194.

FICHTMÜLLER 1996

Fichtmüller, N.: Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme. Berlin: Springer 1996 (iwb Forschungsberichte 104). Zgl. München: Techn. Univ., Diss., 1996.

---

FINOTTO & CRESTANI 1996

Finotto, P.; Crestani, D.: Hierarchical Petri Nets For Manufacturing Systems. In: Jamshidi, M.: Robotic and Manufacturing Systems. World Automation Congress (WAC '96). Montpellier. TSI Press 1996, S. 293 – 298. (Proceedings of the World Automation Congress 3)

FLAIG & THRAINSSON 1996

Flaig, T.; Thrainsson, M. T.: Virtual Prototyping – Neue Wege in Konzeption, Entwurf und Ausarbeitung. *wt – Produktion und Management* 86 (1996) S. 189 – 194.

FORREST 1988

Forrest, A.: Geometric Computing Environments – Some Tentative Thoughts. In: Theoretical Foundations of Computer Graphics and CAD. Berlin: Springer, 1988 (NATO ASI Series 40).

Fox & BLEY 1994

Fox, M.; Bley: Entwicklung eines featurebasierten Konzepts zur Montageplanung. *VDI Berichte* 1171. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994, S. 231 – 250.

FURRER 1998

Furrer, F.: Ethernet - TCP/IP für die Industrieautomation – Grundlagen und Praxis. Heidelberg; Hüthig, 1998.

FREUND U. A. 1998

Freund, E.; Theis, K.; Uthoff, J.: LUCAS: Distributed and Network Transparent Control of Flexible Manufacturing Systems. In: Proceedings of the 29th International Symposium on Robotics, Birmingham: 1998.

FRIEDMANN 1989

Friedmann, T.: Zuerst demontieren – Simultaneous Engineering in der Montageplanung. *Technische Rundschau* 32/89, S. 48 – 53.

FROMMHERZ & HORNBERGER 1988

Frommherz, B.; Hornberger, J.: Automatische Erzeugung von Vorranggraphen. *Technische Rundschau* 24/88, S. 54 – 60.

GANGHOFF 1993

Ganghoff, P.: Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme – Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung im Bereich der Montagesystemplanung. Karlsruhe: Diss. Universität (TH), 1993 (wbk Forschungsberichte 50).

GANGHOFF U. A. 1996

Ganghoff, P.; Köhne, A.; Näger, G.; Osmers, U.: KNOSPE - Ein unterstützendes Planungssystem für die integrierte Montagesystemplanung. *Informatik Forschung und Entwicklung* (1996) 11, S. 37 – 43.

GAUSEMEIER U. A. 1997

Gausemeier, J.; v. Bohuszewicz, P.; Ebbesmeyer, P.: Gestaltung industrieller Leistungsprozesse mit Virtual Reality. *Industrie Management* 13 (1997) 1, S. 33 – 37.

GEITNER 1987

Geitner, U.: Betriebsinformatik für Produktionsbetriebe. Teil 5. Produktionsinformatik. 2. Aufl. München: Hanser, 1987

GEYER 1998

Geyer, M.: Montageplanung mit 3D-Simulation. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Moderne Methoden zur Montageplanung. München: Herbert Utz Wissenschaft 1998, S. 3-1 – 3-14 (iwb Seminarberichte 36).

GOLDRATT & COX 1987

Goldratt, E.; Cox, J.: Das Ziel – Höchstleistung in der Fertigung. Hamburg: McGraw-Hill, 1987.

GRABOWSKI 1990

Grabowski, H.: Bedeutung der Normung von Produktmodellen in CIM. In: VDI-Gemeinschaftsausschuss CIM (Hrsg.): Rechnerintegrierte Konstruktion und Produktion – eine organisatorische, personelle und technische Herausforderung. München, 22. - 24.10.1990, S. 75 – 89 (VDI Berichte 830).

GRABOWSKI U. A. 1994a

Grabowski, H.; Erb, J.; Polly, A., Anderl, R.: STEP- Grundlage der Produktdatentechnologie: Aufbau und Entwicklungsmethodik. CIM Management 10 (1994) 4, S. 45 – 51.

GRABOWSKI U. A. 1994b

Grabowski, H.; Erb, J.; Polly, A., Anderl, R.: STEP- Grundlage der Produktdatentechnologie Teil 2: Das integrierte Produktmodell. CIM Management 10 (1994) 5, S. 36 – 43.

GRABOWSKI 1995

Grabowski, H.: Elektronische Datenverarbeitung. In: Beitz, W.; Küttner, K.: Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau. 18. Auflage. Berlin, Springer 1995, S. Y1ff.

GRABOWSKI 1996

Informationsmanagement für das Produkt. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Hütte – Taschenbuch für Betriebsingenieure (Betriebshütte). 7. Auflage. Berlin: Springer, 1996, Teil 2, S.17-32 – 17-53.

GREWAL U. A. 1995

Grewal, S.; Tran, P.; Bhaskare, A.: Assembly Planning Software. Annals of the CIRP 44 (1995) 1, S. 1 – 6.

GROHA 1988

Groha, A.: Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme. Berlin: Springer 1988 (iwb Forschungsberichte 14), Zgl. München: Techn. Univ., Diss., 1988.

HAASIS 1997

Haasis, S.: Nutzenpotentiale der durchgängigen Feature-Verarbeitung. VDI-Berichte 1322. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997, S. 63 – 82.

---

HABERMANN & WEIß 1999

Habermann, M.; Weiß, T.: STEP7 Crashkurs. Berlin: VDE 1999.

HEGER 1996

Heger, R.: Montagevorgänge in einer virtuellen Umgebung planen. ZWF 91 (1996) 10, S. 505 – 506.

HEIDENBLUT & VOGEL 1997

Heidenblut, V.; Vogel, S.: Optimierung von Produktionsprozessen durch Simulation und Visualisierung. Industrie Management 13 (1997) 2, S. 48 – 51.

HEIMBERG & FREY 1997

Heimberg, R.; Frey, K.: CAPE – Computer Aided Production Engineering. Industrie Management 13 (1997) 6, Supplement Engineering Management, S. E27 – E29.

HIRSCHMANN 1999

Hirschmann Rheinmetall Elektronik (Hrsg.): Hirschmann Network Systems White Paper – Real Time Services (QoS) In Ethernet Based Industrial Automation Networks. Nürtingen: Richard Hirschmann GmbH & Co. (Eigenverlag), 1999.

HÖRMANN & HÖRMANN 1990

Hörmann, A.; Hörmann, K.: Planung kollisionsfreier Greifoperationen. Robotersysteme 6 (1990) 2, S. 39 – 50.

HOMEM DE MELLO & SANDERSON 1991

Homem de Mello, L.; Sanderson, A.: A Correct and Complete Algorithm for the Generation of Mechanical Assembly Sequences. IEEE Transactions on Robotics and Automation 7 (1991) 2, S. 228 – 240.

HUG 1991

Hug, H.: Die Kommunikations-Infrastruktur in der Fertigung. CIM Management 1/91, S.20 – 29.

ILIC & CUIPER 1998

Illic, D.; Cuiper, R.: Erfolgreiche Produktionsrückverlagerung nach Deutschland. In: Reinhart, G.: Montage-Management - Lösungen zum Montieren am Standort Deutschland. München: TCW 1998 (TCW-report Nr. 6), S. 85 – 93.

ISO 7498

ISO 7498: Information Processing Systems – Open Systems Interconnection. Basic Reference Model. Berlin: Beuth, 1984.

ISO 9506-1

ISO 9506: Industrial Automation Systems: Manufacturing Message Specification (MMS). Part 1: Service Definition. Genf: ISO, 1990.

ISO 9506-3

ISO 9506: Industrial Automation Systems: Manufacturing Message Specification (MMS). Part 3: Companion Standard for Robotics. Genf: ISO, 1991.

ISO 10303-1

ISO 10303: Product Data Exchange and Representation. Part 1: Overview and Fundamental Principles. Genf: ISO, 1994.

ISO/DIS 15187

International Organization for Standardization (ISO), Technical Committee ISO/TC 184/SC2 (Hrsg.): Draft International Standard ISO/DIS 15187: Manipulating industrial robots – Graphical user interfaces for programming and operation of robots (GUI-R). Genf: ISO, 1998.

IWATA U. A. 1997

Iwata, K.; Onosato, M.; Teramoto, K.; Osaki, S.: Virtual Manufacturing Systems as Advanced Information Infrastructure for Integrating Manufacturing Resources and Activities. *Annals of the CIRP* 46 (1997) 1, S. 335 – 338.

JOHN & TIEGELKAMP 1995

John, K.; Tiegelkamp, M.: SPS-Programmierung mit IEC 1131-3. Berlin: Springer, 1995.

KAFTAN 1998.

Kaftan, J.: SPS- Grundkurs mit SIMATIC S7. Würzburg: Vogel, 1998

KANAI U. A. 1996

Kanai, S.; Takahashi, H; Makino, H.: ASPEN: Computer-Aided Assembly Sequence Planning and Evaluation System Based on Predetermined Time Standard. *Annals of the CIRP* 45 (1996) 1, S. 35 – 39.

KARNER 1999

Karner, M.: Simulationsgestützte Planung von Produktionssystemen – Praxisbeispiele. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Virtuelle Produktion – Prozeß- und Produktionsimulation. München: Herbert Utz Wissenschaft, 1999, S. 85 – 111 (iwb Seminarberichte 47).

KETTNER U. A. 1984

Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. München, Hanser 1984.

KILLE 1999

Kille, K.: Auf dem Weg zur digitalen Fabrik. In: 7. ERGOPlan Anwendertag 1999 – Offene virtuelle Fabrik, Fellbach, 20.09.99. Fellbach: EAI-Delta GmbH (Eigenverlag), 1999.

KRALLMANN 1990

Krallmann, H. (Hrsg.): CIM – Expertenwissen für die Praxis. München: Oldenbourg, 1990

---

KRAUSE U. A. 1996 A

Krause, F.; Ciesla, M.; Lüddemann, J.; Stephan, M.; Ulbrich, A.: STEP-basierte Informationsmodelle für die Produktentwicklung. ZWF 91 (1996) 7-8, S. 316 – 322.

KREIS U. A. 1997

Kreis, W.; Bönker, T.; Albers, S.: Montage- und Handhabungstechnik, Industrieroboter. VDI-Z 139 (1997) 4, S. 44 – 50.

KUBA 1997

Kuba, R.: Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion. Berlin: Springer 1997 (iwb Forschungsberichte 104). Zgl. München: Techn. Univ., Diss., 1997.

KUGELMANN 1999

Kugelmann, D.: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern. München: Herbert Utz Wissenschaft 1999 (iwb Forschungsberichte 127). Zgl. München: Techn. Univ., Diss., 1999.

LAY U. A. 1989

Lay, K.; Menges, R., Rettich, U.: Am Bildschirm geplant – Softwaresystem zur Gestaltung manueller Montagearbeitsplätze. Montage 1/89, S. 37 – 42.

LAY & MENGES 1989

Lay, K.; Menges, R.: Planung und Gestaltung von Montagearbeitsplätzen im CIM-Umfeld. In: Bullinger, H.; Lay, K. (Hrsg): CIM-Technologie im Maschinenbau. Ehninge: expert-Verlag, 1989, S. 215 – 243.

LEI U. A. 1998

Lei, M.; Yang, X., Tseng, M.; Yang, S.: Design an Intelligent Machine Center – Strategy and Practice. Mechatronics 8 (1998), S. 271 – 285.

LINDEMANN U. A. 1998

Lindemann, U.; Aßmann, G.; Freyer, B.: Vernetzte Information zur Handhabung von Entwicklungswissen. ZWF 93 (1998) 9, S. 386 – 389.

LINDERMAIER 1998

Lindermaier, R.: Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen. Berlin: Springer, 1998 (iwb Forschungsberichte 115) Zgl. München: Techn. Univ., Diss., 1998.

LITZ & FREY 1999

Litz, L.; Frey, G.: Methoden und Werkzeuge zum industriellen Steuerungsentwurf – Historie, Stand, Ausblick. at – Automatisierungstechnik 47 (1999) 4, S. 145 – 156.

MAIER 1997

Maier, M.: Integrierte Produktmodelle – Modellierungs- und Implementierungsaspekte. In: Eversheim, W. (Hrsg.): SFB 361 - Workshop 'Integrierte Produkt- und Prozeßmodellierung' 10.07.97. Aachen: RWTH Aachen (Eigenverlag), 1997.

**MALLE 1995**

Malle, K.: Fertigungssteuerung für „agile intelligente Produktionssysteme“  
VDI-Z 137 (1995) 7/8, S. 12.

**MANSOUR U. A. 1998**

Mansour, I.; Rondeau, E.; Divoux, T.: OMT Modelling to Specify MMS Companion Standard. In: Borne, P.; Ksouri, M.; El Kamel, A. (Editors): Proceedings of IMACS/IEEE Multiconference Computational Engineering in Systems Applications (CESA) '98, Hammamet, 01. – 04.04.1998. Vol. 3, S. 166 – 171.

**MARCA & MCGOWAN 1988**

Marca, D.; McGowan, C.: SADT: Structured Analysis and Design Techniques. New York: McGraw-Hill, 1988.

**MARTIN & MEIER 1997**

Meier, H.; Martin, M.: Ganzheitliche Methode zum systematischen Entwurf und Inbetriebnahme von SPS-Software. In: Schnieder, E.; Abel, D. (Hrsg.): Entwurf komplexer Automatisierungssysteme '97 (EKA '97), Braunschweig, 21. – 23. 5. 1997. Band 2. Braunschweig: IfRA, 1997, S. 501 – 512.

**MATTHES U. A. 1997**

Matthes, J.; Bullinger, H.; Warschat, J.: Featureorientierte Produktbeschreibung zur konstruktionsbegleitenden Montageplanung. In: Features verbessern die Produktentwicklung - Integration von Prozeßketten. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1987, (VDI Berichte 1322), S. 135 – 160.

**MAUDERER & BILLING 1999**

Mauderer, M.; Billing, G.: Enhancing Efficiency and Transparency of Manufacturing System Planning through Comprehensive and Integrated Tool Support. In: Proceedings of 15<sup>th</sup> Int'l Conference on Computer-Aided Production Engineering (CAPE), Durham, 19.-21.04.1999, S. 138 – 143.

**MENGES & BAUER 1998**

Menges, R.; Bauer, J.: Rechnergestützte Arbeitssystemplanung – Modernes Prozeßengineering. In: Zülch, G. (Hrsg.): Neue Methoden der Montageplanung – Rechnerunterstützung für die Praxis. Karlsruhe: Universität Fridericiana (Eigenverlag), 1998.

**MILBERG 1992**

Milberg, J. (Hrsg.): Von CAD/CAM zu CIM. Berlin: Springer, 1992.

**MILBERG 1997**

Milberg, J.: Produktion – eine treibende Kraft für unsere Volkswirtschaft. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Mit Schwung zum Aufschwung: Information - Inspiration – Innovation. Tagungsband zum Münchener Kolloquium 1997. Landsberg: Moderne Industrie, 1997, S. 17 – 39.

---

#### MILBERG & KOEPFER 1990

Milberg, J.; Koepfer, T.: Wettbewerbsvorteile durch rechnerintegrierte Konstruktion und Produktion. In: VDI-Gemeinschaftsausschuß CIM (Hrsg.): Rechnerintegrierte Konstruktion und Produktion – eine organisatorische, personelle und technische Herausforderung. München, 22.-24.10.1990, S. 1 – 25 (VDI Berichte 830)

#### MILBERG U. A. 1999

Milberg, J.; u. a.: Virtual Engineering – Leistungsfähige Systeme für die Produktentwicklung. In: Eversheim, W.; u. a. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik – Aachener Perspektiven. Tagungsband zum Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium 10.-11.06.1999. Aachen: Shaker, 1999, S. 141 – 167.

#### MILBERG & SCHÄFFER 1991

Milberg, J., Schäffer, G.: Mit MAP zur autonomen Produktionszelle. Produktion 45/91, S. 3.

#### MITSUBISHI 1997

Mitsubishi (Hrsg.): MELSEC / MEDOC plus SPS Programmiersoftware. Ratingen: Mitsubishi Electric Europe, Produktschrift, 1997.

#### MORI U. A. 1998

Mori, K.; Tsukiyama, M.; Fukuda, T.: Petri Net Modeling of an Artificial Immunity Based Production Control System. In: Proceedings of 14th International Conference on Computer-Aided Production Engineering (CAPE), Tokyo, 8.-10.09.1998, S. 89 – 94.

#### MTM 1999

Deutsche MTM-Gesellschaft Industrie- und Wirtschaftsberatung mbH (Hrsg.): TiCon – TimeControl for Better Workflow. Hamburg: Deutsche MTM, Produktschrift, 1999.

#### MURAYAMA U. A. 1998

Murayama, T.; Tokoro, K.; Oba, F.: Assembly Sequence Planning by Case-based Reasoning. In: Proceedings of 14th International Conference on Computer-Aided Production Engineering (CAPE), Tokyo, 8.-10.09.1998, S. 119 – 125.

#### N. N. 1996

N. N.: Softer Schlauberger. NC-Fertigung (1996) 7, S. 38 – 39.

#### N. N. 1997

N. N.: Virtuelle Beratung kann Kosten um ein Drittel senken. Blick durch die Wirtschaft 40 (1997) 228, S. 1.

#### OESTERREICH 1998

Oestreich, B.: Objektorientierte Software-Entwicklung mit der Unified Modeling Language, 4., aktual. Auflage. München: Oldenbourg, 1998.

OMG 1995

Object Management Group (OMG) 1995: The Common Object Request Broker: Architecture and Specification, Rev. 2.0. OMG (Eigenverlag): Framigham, 1995.

Ou-YANG & CHANG 1999

Ou-Yang, C.; Chang, C.: Developing an Integrated Intelligent Framework to Support an Engineering Change Process for an Axial Piston Pump. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 15 (1999), S. 345 – 355.

OSMERS 1998

Osmers, U.: Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality. Karlsruhe: Diss. Universität (TH), 1998 (wbk Forschungsberichte 87).

PAHL & BEITZ 1986

Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendungen. 2. Auflage. Berlin: Springer 1986.

PARK 1992

Park, H.: Rechnerbasierte Montageplanung in der Mittelserienfertigung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992. (Fortschritt-Berichte Reihe 2, Nr. 246). Zgl. Hannover: Universität, Diss., 1992.

PETIT U. A. 1996

Petit, F.; Leroy, A.; Raument, B.; Aguirre, E.: Interactive Design of a Product and its Assembly Line. In: Proceedings of the 6th FAIM Conference, Atlanta, 1996, S. 499 – 508.

PETRI 1962

Petri, C.: Kommunikation mit Automaten. Bonn: Schriften des Instituts für Instrumentelle Mathematik. Zgl. Bonn: Universität, Diss., 1962.

PETRY 1991

Petry, M.: Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmbaukastens für robotergeführte Klebeprozesse. Berlin: Springer 1992 (iwb Forschungsberichte 44). Zgl. München: Techn. Univ., Diss., 1991.

PFEIFF 1998

Pfeiff, N.: Die Prozeßsimulation in der Fertigung als wichtiger Schritt zur Digitalen Fabrik. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Moderne Methoden zur Montageplanung. München: Herbert Utz Wissenschaft 1998, S. 4-1 – 4-22 (iwb Seminarberichte 36).

PFEIFFER 1997

Pfeiffer, V.: IEC 1131-3 im Vergleich zu anderen Beschreibungsmitteln. In: Schnieder, E.; Abel, D. (Hrsg.): Entwurf komplexer Automatisierungssysteme '97 (EKA '97), Braunschweig, 21. – 23. 5. 1997. Band 1. Braunschweig: IfRA, 1997, S. 94 – 113.

---

PRITSCHOW 1991

Pritschow, G.: Flexible Automation für die Fabrik von morgen. In: Kreis, W. (Hrsg.): Flexible Produktionseinrichtungen: Planen – Automatisieren – Qualität verbessern. Köln: TÜV Rheinland: 1991, S. 15 – 41 (Automatisierungstechnik aktuell).

RAMPERSAD 1995 A

Rampersad, H.: Concurrent design of product, process and robotic assembly system. *Assembly Automation* 15 (1995) 1, S. 21 – 28.

RAMPERSAD 1995 B

Rampersad, H.: A Case Study in the Design of Flexible Assembly Systems. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 7 (1995): S. 225 – 286.

RANKY 1994

Ranky, P.: Concurrent Engineering and Enterprise Modelling. *Assembly Automation* 14 (1994) 3, S. 14 – 21.

REDLICH 1996

Redlich, J.: CORBA 2.0 - Praktische Einführung für C++ und Java. Bonn: Addison-Wesley, 1996.

REFA 1974a

REFA - Verband für Arbeitsstudien e.V.: Methodenlehre der Planung und Steuerung. Teil 1: Grundlagen. 1. Aufl., München: Hanser, 1974.

REFA 1974b

REFA - Verband für Arbeitsstudien e.V.: Methodenlehre der Planung und Steuerung. Teil 2: Planung. 1. Aufl., München: Hanser, 1974.

REINHART 1998

Reinhart, G.: Die Montage – eine Stärke des Standorts! In: Reinhart, G.: Montage-Management - Lösungen zum Montieren am Standort Deutschland. München: TCW 1998, S. 3 – 6 (TCW-report Nr. 6).

REINHART 2000

Reinhart, G.: Im Denken und Handeln wandeln. In: Reinhart, G., Hoffmann, H. (Hrsg.): ...nur der Wandel bleibt: Wege jenseits der Flexibilität. Tagungsband zum Münchener Kolloquium 1997. München: Herbert Utz Wissenschaft, 2000, S. 19 – 40.

REINHART U. A. 1998

Reinhart, G., Cuiper, R.; Loferer, M.: Cooperative Engineering - nur ein neues Schlagwort? In: Reinhart, G.: Montage-Management - Lösungen zum Montieren am Standort Deutschland. München: TCW 1998, S. 13 – 17 (TCW-report Nr. 6).

REINHART U. A. 1999

Reinhart, G.; Grunwald, S.; Rick, F.: Virtuelle Produktion – Technologie für die Zukunft. *VDI-Z Special C-Techniken* Oktober 1999, S. 26 – 29.

**REINHART & CUIPER 1998**

Reinhart, G.; Cuiper, R.: Kooperative Entwicklung von Produkt und Montageanlage. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Moderne Methoden zur Montageplanung. München: Herbert Utz Wissenschaft 1998, S. 1-1 – 1-21 (iwb Seminarberichte 36).

**REINHART & CUIPER 1999**

Reinhart, G., Cuiper, R.: Assembly Process and Assembly Control Development – A Holistic and Consistent Approach. *Annals of the CIRP* 48 (1999) 1, S. 25 – 28.

**REINHART & FELDMANN 1995 A**

Reinhart, G; Feldmann, C.: Assembly Planning on the Basis of an Object Oriented Petri Net Model. In: Hamza, M. (Ed.): Proceedings of the IASTED International Conference on "Applied Modelling, Simulation and Optimization", Cancun, Mexico, 15.-17. Jun 1995. Anaheim: ACTA Press 1995, S. 249 - 253.

**REINHART & FELDMANN 1995 B**

Reinhart, G.; Feldmann, C.: Gemeinsam gehts besser. *AV* 32 (1995) 5, S. 360 – 364.

**REINHART & ROßGODERER 1998**

Reinhart, G.; Roßgoderer, U.: Spatial Planning of Manual and Automated Work Stations Utilising Mathematic Algorithms and Virtual Reality Devices. In: Juslin, K. (Ed.): Proceedings of the Eurosim'98 Simulation Congress, Helsinki 1998, Vol. 3, S. 499 – 505.

**REITER 1998**

Reiter, R.: Integrierte Gestaltung automatischer Prüfmittel für die flexible Montage. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998. (Fortschritt-Berichte Reihe 8, Nr. 720). Zgl. München: Techn. Univ., Diss., 1998.

**RICHTER 1992**

Richter, M.: Integrierte Produktentwicklung und Montageplanung. *REFA-Nachrichten* (1992) 2, S. 10 – 21.

**RIX & SCHROEDER 2000**

Rix, J.; Schroeder, K.: Virtual Reality als integraler Bestandteil des Virtual engineering Konzeptes. *Industrie Management* 16 (2000) 1, S. 70 - 75.

**Roos 1998**

Roos, E.: Anwendungsorientierte Meß- und Berechnungsverfahren zur Kalibrierung off-line programmiert Roboterapplikationen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998 (Fortschritt-Berichte Reihe 8, Nr. 709). Zgl. Hamburg: Universität der Bundeswehr, Diss., 1998.

**ROSE 2000**

Rose, B.: BMW verschmilzt Entwicklung und Produktion. *VDI-Nachrichten* Nr. 7, 18.02.2000, S. 9.

---

Roßgoderer 1999

Roßgoderer, U.: Vom CAD-Modell zur Digitalen Fabrik. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Virtuelle Produktion – Prozeß- und Produktsimulation. München: Herbert Utz Wissenschaft, 1999, S. 50 – 63 (iwb Seminarberichte 47).

RUMBAUGH U. A. 1993

Rumbaugh, J. et al.: Objektorientiertes Modellieren und Entwerfen. München: Hanser, 1993.

SCHARF & SIMON 1994

Scharf P., Simon M.: Montageplanung schon während der Produktkonstruktion: Das Softwaresystem CAPAS ermöglicht Simultaneous Engineering. In: Kurth, W. (Hrsg.): Entwicklungsmanagement: Simultaneous Engineering. Tagungsbericht zu den 2. Entwicklungsmanagementtagen in Mittelhessen. Herborn: Oranien-Verlag, 1994, S. 301 – 315.

SCHELBERG 1994

Schelberg, H.: Objektorientierte Projektierung von SPS-Software. Karlsruhe: Diss. Universität (TH), 1994 (wbk Forschungsberichte 57).

SCHMIDT 1993

Schmidt, M.: Konfiguration und Inbetriebnahme eines MAP/MMS-Netzes. pa Produktionsautomatisierung 4/93, S. 41 – 44.

SCHMIDT & GANGHOFF 1991

Schmidt, J.; Ganghoff, P.: Wissensbasierte Planung der Aufbau- und Ablaufstruktur von Montagesystemen. VDI-Z 133 (1991) 11, S. 85 – 92.

SCHNIEDER & ABEL 1997

Schnieder, E.; Abel, D. (Hrsg.): Entwurf komplexer Automatisierungssysteme '97 – Methoden, Anwendungen und Tools auf der Basis von Petri- netzen und anderer formaler Beschreibungsmittel (EKA '97), Braunschweig, 21. – 23. 5. 1997 (2 Bände). Braunschweig: IfRA, 1997.

SCHOLZ 1990

CIM-Seminar: Heterogene lokale Netze: MAP. CIM Management 1/90, S. 25 – 28.

SCHOLZ-REITER 1991

Scholz-Reiter, B.: CIM-Schnittstellen: Konzepte, Standards und Probleme der Verknüpfung von Systemkomponenten. 2. Aufl. München: Oldenbourg, 1991.

SCHUSTER 1992

Schuster, G.: Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage. Berlin: Springer 1992 (iwb Forschungsberichte 55). Zgl. München: Techn. Univ., Diss., 1992.

**SCHWARZ 1991**

Schwarz, Karlheinz: Manufacturing Message Specification (MMS) – Übersicht über die Methoden, Modelle, Objekte und Dienste. *atp – Automatisierungstechnische Praxis* 33 (1991) 7, S. 369 – 378.

**SELIGER 1988**

Seliger, G.: Integrierte Montageplanung. *ZWF-CIM Sonderheft* (1988) S. 45 – 47.

**SELIGER 1990**

Seliger, G.: Montagetechnik – Schwerpunkt produktionstechnischer Unternehmensstrategie. In: Krallmann, H. (Hrsg.): *CIM – Expertenwissen für die Praxis*. München: Oldenbourg, 1990, S. 81 – 96.

**SILBERNAGEL 1998**

Silbernagel, R.: Erfolgsfaktoren für die besten Produkte. In: Tagungsunterlagen zum 14. Deutschen Montagekongress, 18.-19.03.1998, München. Landsberg: Moderne Industrie, 1998.

**SIMON 1994**

Simon M.: Rechnergestützte Planung von Anlagen für die variantenreiche Serienmontage. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994. (Fortschritt-Berichte Reihe 20, Nr. 146). Zgl: Siegen: Universität, Diss., 1994.

**SOFTECH 1981**

Softech, Inc. (Hrsg.): *Integrated Computer-Aided Manufacturing (ICAM) Architecture Part II, Vol. IV – Functional Modelling Manual (IDEF0)*. Technical Report AFW AL-TR-81-4023. Dayton: Wright-Patterson, 1981.

**SOMMER & BÄRNREUTHER 1993 A**

Sommer, E., Bärnreuther, B.: MAP für Gerätesteuerungen in Montagezellen Teil 1. pa – Produktionsautomatisierung 2/93, S. 42 – 44.

**SOMMER & BÄRNREUTHER 1993 B**

Sommer, E., Bärnreuther, B.: MAP für Gerätesteuerungen in Montagezellen Teil 2. pa – Produktionsautomatisierung 3/93, S. 53 – 56.

**SPATH U. A. 1997**

Spath, D.; Osmers, U.; Guinand, P.: Virtual Engineering: 3D-Projektierung und Simulation komplexer Produktionssysteme am Beispiel SPS-gesteuerter Anlagen. *Industrie Management* 13 (1997) 1, S. 38 – 41.

**SPUR U. A. 1993**

Spur, G.; Mertins, K.; Jochem, R.: *Integrierte Unternehmensmodellierung*. Berlin: Beuth, 1993.

**SPUR & KRAUSE 1997**

Spur, G.; Krause, F.: *Das virtuelle Produkt – Management der CAD Technik*. München: Carl Hanser, 1997.

---

SPUR 1999

Spur, G.: Das digitale Produktmodell als virtueller Prototyp. ZWF 94 (1999) 7-8, S. 370 – 375.

STEIN 1997

Stein, W.: Objektorientierte Analysemethoden – Vergleich, Bewertung, Auswahl. 2. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1997 (Angewandte Informatik).

STEINWASSER 1996

Steinwasser, P.: Modulares Informationsmanagement der integrierten Produkt- und Prozeßplanung. Bamberg: Meisenbach 1997 (Fertigungstechnik Erlangen 63). Zgl. Erlangen: Universität, Diss., 1996.

SWEENEY 1992

Sweeney, M.: How to perform Simultaneous Process Engineering. Integrated Manufacturing Systems 3 (1992) 1, S. 15 – 19.

TECNOMATIX 1999a

Tecnomatix (Hrsg.): Process Planner – The Process Data Model for Creating, Modifying, Navigating & Managing Process Data. Neu-Isenburg: Tecnomatix Automatisierungssysteme GmbH 1999 (Eigenverlag).

TECNOMATIX 1999b

Tecnomatix (Hrsg.): STEP7 and ROBCAD/PLC – Jointly Control the Digital Factory. Neu-Isenburg: Tecnomatix Automatisierungssysteme GmbH 1999 (Eigenverlag).

THALER 1993

Thaler, K.: Regelbasiertes Verfahren zur Montageablaufplanung in der Serienfertigung. Berlin: Springer, 1993. Zgl. Stuttgart: Universität Stuttgart, Diss., 1993.

TÖNSHOFF U. A. 1992

Tönshoff, H.; Menzel, E.; Park, H.: A Knowledge-Based System for Automated Assembly Planning. Annals of the CIRP Vol. 41 (1992) 1, S.19 – 24.

VAJNA 1997

Vajna, S.; Wegner, B.: Features zur Optimierung des Produktentstehungsprozesses und der datenverarbeitungstechnischen Integration. VDI-Berichte 1322. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997, S. 51 – 62.

VAN BRUSSEL 1990

Van Brussel, H.: Planning and Scheduling of Assembly Systems. Annals of the CIRP 39 (1990) 2, S. 637 – 644.

VDI 1983

VDI (Hrsg.): Lexikon der Produktionsplanung und –steuerung: Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1983.

VDI 1990

VDI-Gemeinschaftsausschuß CIM (Hrsg.): Rechnerintegrierte Konstruktion und Produktion. Band 2: Produktdatenverarbeitung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990.

VDI 2221

VDI Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1986.

VDI 2860

VDI Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik – Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990.

VDI/VDE 3683

VDI/VDE-Richtlinie 3983. Beschreibung von Steuerungsaufgaben. Anleitung zum Erstellen eines Pflichtenheftes. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1986.

VDMA 1999

VDMA Fachgemeinschaft Robotik und Automation (Hrsg.): Portrait der Branche 1998/99. Frankfurt: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) (Eigenverlag), 1999.

VOSSEN & BECKER 1996

Vossen, G.; Becker, J. (Hrsg.): Geschäftsprozeßmodellierung und Workflow-Management – Modelle, Methoden, Werkzeuge. Bonn: International Thomson Publishing 1996 (Informatik Lehrbuch-Reihe).

WAGNER 1999

Wagner, M.: Der virtuellen Welt entspringen ausgereifte Serienproduktionen. EAI-DELTA News (1999) 9. Fellbach: EAI-DELTA GmbH (Eigenverlag) 1999, S. 1.

WANG 1997

Wang, L.: An Integrated Object-Oriented Petri Net Paradigm for Manufacturing Control Systems. Computer Integrated Manufacturing 9 (1997) 1, S. 73 – 87.

WECK & DAMMER 1997

Weck, M.; Dammer, M.: Integration von CAE-Systemen auf Basis technischer Elemente. Industrie Management 13 (1997) 1, S. 23 – 27.

WECK & FRIEDRICH 1997

Weck, M.; Friedrich, J.: MMS 3D - Toolkit for MMS Device Driver Development. Production Engineering 4 (1997) 1, S. 117 – 122.

WEULE & FRIEDMANN 1987

Weule, H.; Friedmann, T.: Rechnerunterstützte Produktanalyse in der Montageplanung. VDI-Z 129 (1987) 12, S. 59 – 63.

---

XIROUCHAKIS U. A. 1998

Xirouchakis, P.; Kiritsis, D.; Persson, J.-G.: A Petrinet Technique for Process Planning Cost Estimation. *Annals of the CIRP* 47 (1998) 1, S. 427 – 430.

YANG & MAREFAT 1994

Yang, C.; Merefat, M.: Object oriented concepts and mechanisms for feature-based computer integrated inspection. *Advances in Engineering Software*, Vol. 20 (1994) S. 157 – 179.

ZHAO & MASOOD 1999

Zhao, J.; Masood, S.: An Intelligent Computer-Aided Assembly Process Planning System. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 15 (1999), S. 332 – 337.

ZÜLCH & WALDHIER 1992

Zülch, G.; Waldhier, T.: Integrated computer aided planning of manual assembly systems. In: Mattila, M.; Karkowski, W. (Hrsg.): *Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Ergonomics and Safety – CAES'92*, Tampere, Finland, 18.-20.5.92. Amsterdam: Elsevier, 1992, S. 159 – 166.

ZÜLCH U. A. 1998

Zülch, G.; Müller, R.; Schiller E. F.: Simulationsunterstützte Planung von manuellen Montagesystemen. In: Zülch, G. (Hrsg.): *Neue Methoden der Montageplanung – Rechnerunterstützte Verfahren für die Praxis* – Karlsruhe, Universität Fridericiana (Eigenverlag), 1998.

---

## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Planung und Steuerung nach REFA (1974a, S. 13) .....	6
Abbildung 2: Betrachtungsbereich dieser Arbeit.....	8
Abbildung 3: Bedarf an rechnergestützter Prozessplanung (HEIMBERG & FREY 1997).....	10
Abbildung 4: Die Ebenen der Produktionssteuerung (nach MILBERG 1992, BENDER 1996) .....	10
Abbildung 5: Ausgangssituation.....	11
Abbildung 6: Zusammenhang von Schema und Modell.....	15
Abbildung 7: Das ISO/OSI Referenzmodell (nach FURRER 1998, S. 10).....	19
Abbildung 8: Ethernet für zeitkritische Anwendungen (nach FURRER 1998, S. 12).....	20
Abbildung 9: Steuerungseinrichtung (nach VDI 3683) .....	22
Abbildung 10: Funktionen eines Zellensteuerungssystems (nach BENDER 1996, S. 10-93).....	24
Abbildung 11: Übergang von Bausteinen der DIN 19239 zu POEs der IEC 1131-3 (JOHN & TIEGELKAMP 1995, S. 30) .....	27
Abbildung 12: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (nach VDI 2221) .....	32
Abbildung 13: Richtlinie zur integrierten Entwicklung von Produkt und Montage (SCHUSTER 1992, S. 48).....	41
Abbildung 14: Das Integrale Montagemodell (RAMPERSAD 1995 A).....	42
Abbildung 15: Die Fünf-Schichten-Methode der Montageplanung (FELDMANN 1996, S. 75).....	44
Abbildung 16: Zeitliche Einteilung (VAN BRUSSEL 1990, S. 637) .....	46
Abbildung 17: Informationsaustausch zwischen den Modulen (STEINWASSER 1996, S. 118).....	52
Abbildung 18: Einteilung einer Montagezelle in die drei Teilnehmergruppen .	62
Abbildung 19: Standardstruktur eines Handhabungsvorgangs (KUGELMANN 1999, S. 55).....	63
Abbildung 20: Beispiel einer Elementaren Montagebewegung.....	64

---

Abbildung 21: Beispiel für das Annähern der Fügestelle .....	65
Abbildung 22: Beispiel für das Entladen der Bereitstellung .....	65
Abbildung 23: Beispiel für eine Peripherie Montagebewegung.....	66
Abbildung 24: Beispiel eines Werkstückunabhängigen Nebenprozesses.....	66
Abbildung 25: Hierarchische Detaillierung der Montage- vorgangsbeschreibung .....	70
Abbildung 26: Das Petri-Netz wird um Steuerungsbefehle erweitert (exemplarische Darstellung) .....	72
Abbildung 27: Treiber im Entwicklungsprozess .....	73
Abbildung 28: Einteilung nach dem überwiegend vorherrschenden Treiber...	74
Abbildung 29: Die konkreten Planungsprojekte finden jeweils in einer Ablaufebene statt.....	75
Abbildung 30: Aufbau und Elemente des hierarchischen Steuerungskonzepts.....	78
Abbildung 31: Zuordnung MMS zu IEC 1131.....	79
Abbildung 32: Modellierung der Hierarchie im Petrinetz oder in den einzelnen Komponenten .....	80
Abbildung 33: Symbolik zu den MMS-Befehlen - Programmausführung .....	82
Abbildung 34: Symbolik zu den MMS-Befehlen - Verwaltungsaufgaben .....	81
Abbildung 35: Symbolik zu den MMS-Befehlen - Variablenzugriff .....	82
Abbildung 36: Symbolik zu den MMS-Befehlen - Statusvergleich .....	82
Abbildung 37: Die Schritte zur Gestaltung des Montagevorgangs .....	84
Abbildung 38: Gesamtdarstellung der produktgetriebenen Montagevorgangsplanung .....	88
Abbildung 39: Gesamtdarstellung der anlagengetriebenen Montagevorgangsplanung .....	91
Abbildung 40: Gegenüberstellung der Planungsvorgehen.....	92
Abbildung 41: Das integrierte Produkt- und Prozessmodell besteht aus mehreren Partialen .....	93
Abbildung 42: Bild des Datenschemas .....	94
Abbildung 43: Bild eines instanzierten Datenmodells mit Steuerungsbefehlen .....	95

Abbildung 44: Das CosMonAut Basissystem und die Erweiterungen .....	99
Abbildung 45: Icon-Boxen zur Auswahl von MMS-Befehlen .....	100
Abbildung 46: Grafisch dargestellte MMS-Befehlssequenz .....	101
Abbildung 47: Wahlweise kann die Steuerung eines realen oder simulierten Betriebsmittels von CosMonAut angesprochen werden ..	104
Abbildung 48: Schematischer Aufbau einer CosMonAut CORBA-MMS-VMD .....	106
Abbildung 49: Konfigurieren der jeweiligen VMD für die Komponenten.....	106
Abbildung 50: VMDs für die simulierten Komponenten.....	107
Abbildung 51: VMD für einen Roboter Stäubli RX 90 / RX130 .....	108
Abbildung 52: VMD für eine SPS Siemens S7-300 .....	110
Abbildung 53: Schnittstellen zwischen CosMonAut und dem PPS-System Adicom Lowis .....	111
Abbildung 54: Dialog zur manuellen Eingabe von Attributen beim Datentransfer.....	112
Abbildung 55: Architektur des gesamten Planungssystems .....	113
Abbildung 56: CAD-Modell und teilmontierter Dosenöffner (neue Variante). .	114
Abbildung 57: Simulationsmodell der Anlage.....	115
Abbildung 58: Schematische Layoutstruktur der Montageanlage.....	115
Abbildung 59: Montagestruktur des Dosenöffners .....	116
Abbildung 60: Erster Entwurf des Ablaufplans.....	117
Abbildung 61: Planen der Greiferaufnahme in der 3D-Simulation .....	118
Abbildung 62: Ausschnitt des Montageablaufplans des Dosenöffners .....	119
Abbildung 63: Montage von Gehäuse und Schneideeinrichtung .....	120
Abbildung 64: Steuerungsnetz für die Dosenöffnermontage .....	120
Abbildung 65: Steuerung der realen Dosenöffnermontage mit CosMonAut .	121
Abbildung 66: Komponenten für die Vormontage des Getriebes .....	122
Abbildung 67: Schematisches Layout der Montageanlage .....	123
Abbildung 68: Montagevorranggraf der Getriebevormontage .....	123
Abbildung 69: Ablaufplan der Getriebemontage in CosMonAut.....	124

---

Abbildung 70: Einsetzen der Spindel in der Simulation .....	125
Abbildung 71: Vorgangsbeschreibung mittels Petri-Netz.....	126
Abbildung 72: Kostenanalyse bezogen auf die Kostenträger .....	127
Abbildung 73: Einsetzen der Spindel durch den Roboter .....	128
Abbildung 74: Datenaustausch mit dem PPS-System .....	129
Abbildung 75: Ergebnis der Arbeit: Die durchgängige Entwicklung des Montagevorgangs.....	135

Tabelle 1: Erfüllung der Forderungen durch den Stand der Technik und der Forschung.....	60
Tabelle 2: Klassifizierung der Teiltätigkeiten .....	67
Tabelle 3: Einflussgrößen der Aufwand-/Nutzen-Abschätzung.....	133

---

# Stichwortverzeichnis

## A

Ablaufplanung	7, 33
Ablaufsteuerung	22
aktiver Teilnehmer	61
Aktor-/Sensorebene	22
Analytische Planung	31
anlagengetriebene Planung	73, 76
Annähern der Fügestelle	65
Antriebssteuerung	22
AnySIM	35
Arbeitsablaufplanung	32
Arbeitsplan	33
Arbeitsplanung	32
Arbeitssystemplanung	32
Arbeitsvorbereitung	32
Attribut	15
Automatisierung	2

## B

Beladung der Bereitstellung	65
<b>C</b>	
CAPAS	49
CIM	46
Computer Aided Design (CAD)	16
Computer Integrated Manufacturing (CIM)	16
Concurrent / Cooperative Engineering (CE)	9
CORBA	21
COSEM	41
CosMonAut	44

## D

Datenmodell	14, 16
Datenschema	15
DENEb	55
Domain	25
Domänen-Engineering	55

## E

Einzelprozess	7
Einzelsteuerung	22
Elementare Montagebewegung	64
eM-Human	35
eM-Planner	47
eM-Workplace	35
Entität	15
Entladung der Bereitstellung	65
ERGOPlan	34
Ethernet	19

## F

Feature	17
Funktion (FUN)	27
Funktionsbaustein (FB)	27

## G

Generelle Montagereihenfolge	63
Gestaltungsobjekt	7
Gruppensteuerung	22

## I

IDAP	49
IDEFx	17
IEC 1131-3	27
Instanzierung	15
IRL	58
ISO-OSI-Modell	19
IUM	18

## K

Konstruktion	9
--------------	---

## L

Leitsteuerung	22
---------------	----

## M

manuelles Arbeitssystem	35, 40
Manufacturing Automation Protocol (MAP)	28
Manufacturing Message Specification (MMS)	24
MOGRAPH	49
Montage	2, 7
Montageplanung	9
Montageprozess	7
Montagevorgangsbeschreibung	7, 62

## O

Object Modeling Technique (OMT)	16
Objekt	15
objektbezogenes Petri-Netz	44, 69
Offline-Programmierung	35
OPERA	59

## P

passiver Teilnehmer	62
PDM-System	9
Periphere Montagebewegung	66
Petri-Netz	18
Planung	5, 6, 7
Planungssarten	33
Primärkomponente	40
Produktentwicklung	9
produktgetriebene Planung	73, 75
Produktionsplanung	45
Produktionsplanungs- und Steuerungs-(PPS) System	23
Produktionssteuerung	45
Produktmodell	16
Program Invocation (PI)	25
Programm (PROG)	27

---

Programmorganisationseinheit (POE) ....	27	Synthetische Planung .....	31
Prozess .....	7	System .....	6
Prozessplanung .....	47	<b>T</b>	
Prozessteilnehmer .....	61	Task .....	109
<b>R</b>		TCP/IP .....	19
RAPP .....	48	TiCon .....	35
Rechnerunterstützung .....	16	<b>U</b>	
ROBCAD .....	35	Unified Modeling Language (UML) .....	16
<b>S</b>		<b>V</b>	
Sekundärkomponente .....	41	VDI 2860 .....	38, 69
Simultaneous Engineering (SE) .....	9, 40	Verlassen der Fügestelle .....	65
SPS .....	27	Virtual Engineering .....	1
statischer Teilnehmer .....	62	Virtual Manufacturing Device (VMD) .....	25
STEP .....	17	Virtual Reality (VR) .....	2
Steuerung .....	5, 6, 7	Virtuelle Produktion .....	1
Steuerungsebene .....	22	Virtuelles Produkt .....	1
Steuerungsentwicklung .....	9	Vorgangsbeschreibung .....	61
Steuerungskonzept .....	46		
Structured Analysis and Design Technique (SADT) .....	17, 18		



# iwb Forschungsberichte Band 1–121

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

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

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

28 *Teich, K.*  
Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion  
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8

29 *Pfrang, W.*  
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze  
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6

30 *Tauber, A.*  
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung  
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X

31 *Jäger, A.*  
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme  
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5

32 *Hartberger, H.*  
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme  
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5

33 *Tuzcek, H.*  
Inspektion von Karosserierechteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung  
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4

34 *Fischbacher, J.*  
Planungsstrategien zur störmungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten  
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X

35 *Moser, O.*  
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen  
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8

36 *Naber, H.*  
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente  
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7

37 *Kupec, Th.*  
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen  
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4

38 *Maulhardt, U.*  
Dynamisches Verhalten von Kreissägen  
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1

39 *Götz, R.*  
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile  
1991 · 88 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1

40 *Koepfer, Th.*  
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung  
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4

41 *Schmidt, M.*  
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme  
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9

42 *Burger, C.*  
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen  
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5

43 *Hoßmann, J.*  
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen  
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0

44 *Petry, M.*  
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabaukastens für robotergeführte Klebeprozesse  
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6

45 *Schönecker, W.*  
Integrierte Diagnose in Produktionszellen  
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4

46 *Bick, W.*  
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades  
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0

47 *Gebauer, L.*  
Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen  
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9

48 *Schräfer, N.*  
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung  
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9

49 *Wissbacher, J.*  
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen  
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9

50 *Gernic, F.*  
Laserbearbeitung mit Robotern  
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7

51 *Eubert, P.*  
Digitale Zustanderegelung elektrischer Vorschubantriebe  
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2

52 *Glaas, W.*  
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung  
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0

53 *Heilm, H.J.*  
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose  
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4

54 *Lang, Ch.*  
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung  
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2

55 *Schuster, G.*  
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage  
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6

56 *Bomm, H.*  
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme  
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7

57 *Wendt, A.*  
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen  
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0

58 *Hansmaier, H.*  
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung  
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2

59 *Dilling, U.*  
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen  
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

60 *Strahmayer, R.*  
Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringereinrichtungen  
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X

61 *Gles, J.*  
Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware  
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5

62 *Stetter, R.*  
Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrieroboter Einsatzes  
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1

63 *Dirndorfer, A.*  
Roboter systeme zur förderbandsynchronen Montage  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4

64 *Wiedemann, M.*  
Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen  
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9

65 *Woenckhaus, Ch.*  
Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung  
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8

66 *Kummelsteiner, G.*  
3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme  
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9

67 *Kugelmann, F.*  
Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionsystemen  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9

68 *Schwarz, H.*  
Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik  
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4

69 *Viethen, U.*  
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen  
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7

70 *Seehuber, M.*  
Automatische Inbetriebnahme  
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler  
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X

71 *Amann, W.*  
Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionsystemen  
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9

72 *Schöpf, M.*  
Rechnergestütztes Projektinformations- und Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld  
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2

73 *Welling, A.*  
Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge  
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0

74 *Zetlmayer, H.*  
Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion  
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0

75 *Lindl, M.*  
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung  
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5

76 *Zipper, B.*  
Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer flexiblen Fertigung  
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3

77 *Raith, P.*  
Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung  
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1

78 *Engel, A.*  
Strömungstechnische Optimierung von Produktionssystemen durch Simulation  
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4

79 *Zäh, M. F.*  
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen  
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5

80 *Zwanzer, N.*  
Technologisches Prozeßmodell für die Kugelschleifbearbeitung  
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2

81 *Romanow, P.*  
Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen  
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3

82 *Kahlenberg, R.*  
Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen  
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1

83 *Huber, A.*  
Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung  
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X

84 *Birkel, G.*  
Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen  
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8

85 *Simon, D.*  
Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement  
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2

86 *Nedeljkovic-Groha, V.*  
Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflussteuerungen  
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8

87 *Rockland, M.*  
Flexibilisierung der automatischen Teilebereitstellung in Montageanlagen  
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6

88 *Linner, St.*  
Konzept einer integrierten Produktentwicklung  
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1

89 *Eder, Th.*  
Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionssysteme  
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6

90 *Deutschle, U.*  
Prozessorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen  
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3

91 *Dieterle, A.*  
Recyclingintegrierte Produktentwicklung  
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

92 *Hechl, Chr.*  
**Personalorientierte Montageplanung für komplexe und varianteureiche Produkte**  
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5

93 *Albertz, F.*  
**Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen**  
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8

94 *Trunzer, W.*  
**Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren**  
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X

95 *Fichtmöller, N.*  
**Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme**  
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1

96 *Trucks, V.*  
**Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen**  
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8

97 *Schäffer, G.*  
**Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme**  
1995 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X

98 *Koch, M. R.*  
**Autonome Fertigungszeilen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung**  
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5

99 *Motezuma de la Barrera, J.L.*  
**Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie**  
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2

100 *Geuer, A.*  
**Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung**  
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8

101 *Ebner, C.*  
**Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten**  
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0

102 *Pischetsrieder, K.*  
**Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion**  
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0

103 *Köhler, R.*  
**Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen varianteureichen Kleinprodukten**  
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9

104 *Feldmann, Ch.*  
**Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung**  
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1

105 *Lehmann, H.*  
**Integrierte Materialfluss- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem**  
1997 · 98 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0

106 *Wegner, M.*  
**Steuerungsintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe**  
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5

107 *Lorenzen, J.*  
**Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen**  
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4

108 *Krämer, U.*  
**Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitssuche und Standardisierung**  
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3

109 *Pfersdorf, I.*  
**Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service**  
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3

110 *Kuba, R.*  
**Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion**  
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0

111 *Kaiser, J.*  
**Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen**  
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3

112 *Geyer, M.*  
**Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung**  
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5

113 *Martin, C.*  
**Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz**  
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6

114 *Löffler, Th.*  
**Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse**  
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X

115 *Lindnermaier, R.*  
**Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen**  
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64868-8

116 *Koehler, J.*  
**Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung**  
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7

117 *Schuler, R. W.*  
**Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen**  
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1

118 *Debuschewitz, M.*  
**Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung**  
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3

119 *Bauer, L.*  
**Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen**  
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1

120 *Pfob, E.*  
**Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen**  
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5

121 *Spitznagel, J.*  
**Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen**  
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

# Seminarberichte iwb

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

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim

Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, [utz@utzverlag.com](mailto:utz@utzverlag.com)

- 1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung  
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt  
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung  
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte  
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung  
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung  
86 Seiten · ISBN 3-931327-76-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen  
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel  
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte  
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel  
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion  
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionssysteme  
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen  
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 15 Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung  
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart  
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen  
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen  
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung  
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme  
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen  
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale  
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 EDM Engineering Data Management  
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationale Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele  
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag  
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt  
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt  
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar  
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends  
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 33 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension  
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz  
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben  
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion  
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätsteigerung durch technische und organisatorische Ansätze  
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung  
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau  
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen  
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen  
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 Stückzahlflexible Montagesysteme  
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern  
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen  
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele  
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation  
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1
- 47 Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation  
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen  
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping - Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung  
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6

- 50 **Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion**  
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 **Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle**  
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien**  
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 **lieferbar ab ca. 01/01**
- 54 **Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation**  
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2

# Forschungsberichte iwb

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

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

122 Schneider, Burghard  
**Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile**  
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5

123 Goldstein, Bernd  
**Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung**  
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3

124 Mößmer, Helmut E.  
**Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme**  
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4

125 Gräser, Ralf-Günter  
**Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern**  
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6

126 Trossin, Hans-Jürgen  
**Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik**  
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1

127 Kugelmann, Doris  
**Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern**  
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X

128 Diesch, Rolf  
**Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen**  
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4

129 Lulay, Werner E.  
**Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen**  
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6

130 Murr, Otto  
**Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen**  
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2

131 Macht, Michael  
**Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping**  
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9

132 Mehler, Bruno H.  
**Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbünden**  
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1

133 Heitmann, Knut  
**Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle**  
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3

134 Blessing, Stefan  
**Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen**  
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7

135 Abay, Can  
**Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik**  
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

136 Brandner, Stefan  
**Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken**  
2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6

137 Hirschberg, Arnd G.  
**Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung**  
2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6

138 Reek, Alexandra  
**Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen**  
2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X

139 Sabbah, Khalid-Alexander  
**Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen**  
2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3

140 Schliffenbacher, Klaus U.  
**Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken**  
2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7

141 Sprenzel, Andreas  
**Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung**  
2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1

142 Gallasch, Andreas  
**Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion**  
2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4

143 Cuiper, Ralf  
**Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen**  
2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0 · lieferbar ab ca. 02/01

144 Schneider, Christian  
**Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion**  
2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X