

UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

SCHRIFTENREIHE PRODUKTIONSTECHNIK

Herausgeber: H. Bley und C. Weber



Band 43

Jens Kiefer

**Mechatronikorientierte Planung
automatisierter Fertigungszellen
im Bereich Karosserierohrbau**

LFT

**Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM
Saarbrücken 2007**

Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau

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

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Jens Kiefer

Tag der Einreichung: 22.05.2007

Tag des Kolloquiums: 05.11.2007

Dekan:	Prof. Dr. Uli Müller
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Stefan Diebels
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Helmut Bley
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Akademischer Mitarbeiter:	Dr.-Ing. Nikolay Avgoustinov

Saarbrücken 2007

Jens Kiefer

**Mechatronikorientierte Planung automatisierter
Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau**

Universität des Saarlandes

Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 43

Geleitwort der Herausgeber

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

Prof. Dr.-Ing. C. Weber

Prof. Dr.-Ing. H. Bley

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

ISBN 978-3-930429-72-1

ISSN 0945-6244

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit im Bereich „IT for Engineering“ am DaimlerChrysler Forschungszentrum in Ulm.

Wissenschaftlich betreut wurde die Arbeit von Herrn Professor Dr.-Ing. Helmut Bley, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungstechnik/CAM der Universität des Saarlandes, der mir durch sein fachliches Interesse und die produktive Zusammenarbeit in gemeinsamen Konferenzbeiträgen stets eine große Unterstützung war. Ihm gilt daher mein besonderer Dank.

Herrn Professor Dr.-Ing. Jürgen Fleischer, Inhaber des Lehrstuhls für Produktionstechnik der Universität Karlsruhe (wbk), danke ich für sein Interesse an dieser Arbeit und für die Übernahme des Korreferates.

Den Kollegen am DaimlerChrysler Forschungszentrum in Ulm, die mich während dieser Zeit begleitet und gefördert bzw. die durch kritische Diskussionen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, danke ich an dieser Stelle ganz herzlich. Besonders hervorzuheben sind hierbei Herr Dr.-Ing. Thomas Bär und Herr Dipl.-Ing. Marco Müller. Zudem möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Martin Bergert, Herrn Dipl.-Ing. Sven Mandel und Herrn Dipl.-Ing. Gauthier Pelloquin bedanken, die mir durch ihre Arbeiten und fachliche Diskussionen stets eine große Hilfe waren. Nicht zuletzt danke ich Herrn Dipl.-Ing. Axel Braun für die Bereitstellung der zur Konzeptumsetzung benötigten IT-Infrastruktur sowie Herrn Dr.-Ing. Christian Zenner für die kritische Durchsicht der Arbeit und die dabei entstandenen wertvollen Anregungen.

Ein großes Dankeschön möchte ich an dieser Stelle auch den Kollegen aus dem Mercedes LKW-Werk in Wörth aussprechen, die mich sowohl bei der Analyse der Ist-Situation tatkräftig unterstützt als mir auch die für das Anwendungsbeispiel erforderlichen Daten zur Verfügung gestellt haben. Besonders hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang Herr Dipl.-Ing. Hans-Josef Schwaab, Herr Dipl.-Ing. Dirk Hofmann, Herr Dipl.-Ing. Norbert Wingerter, Herr Dipl.-Ing. Andreas Wiedemann, Herr Dipl.-Ing. Michael Jonas, Herr Dipl.-Ing. Patrick Heid, Herr Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Peter sowie Herr Dipl.-Ing. Michael Lust.

Der größte Dank gilt jedoch meiner Frau Katja Bachelier. Durch ihr permanentes Verständnis, ihre Unterstützung und die kritische Durchsicht des Manuskripts hat sie mir bei der Erstellung dieser Arbeit sehr geholfen. Darüber hinaus hat sie mir in dieser Zeit mit der Geburt unseres Sohnes Lukas die größte Freude bereitet.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein neuartiges Konzept zur durchgängigen, domänenübergreifenden Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohrbau vorgestellt, auf dessen Basis sich sowohl in der Produktionsplanung als auch während des Produktionsanlaufs bedeutende und nachhaltige Verbesserungspotentiale erschließen lassen.

Verglichen mit der Durchführung heutiger Planungsprojekte bzw. mit heute existierenden Ansätzen zur Verbesserung des Produktionsplanungsprozesses liegen dem entwickelten Gesamtkonzept einige weit reichende Neuerungen zugrunde. Diese beziehen sich vor allem auf den Einsatz mechatronischer Ressourcen- und Prozesselemente, die alle relevanten mechanischen, elektrischen und steuerungstechnischen Anlagendaten zentral bündeln und den am Planungsprozess beteiligten Fachbereichen in Form standardisierter, wieder verwendbarer Planungsobjekte zur Verfügung gestellt werden. Unter Verwendung dieser neu konfigurierten Planungsobjekte erfolgt die bereichsübergreifende, vernetzte Entwicklung eines mechatronischen PPR-Datenmodells (PPR: **P**rodukt, **P**rozess, **R**essource). Bezogen auf den gesamten Lebenszyklus automatisierter Produktionssysteme nimmt dieses integrierte Datenmodell eine mannigfaltige Rolle ein. Während des Produktionsplanungsprozesses dient es als interdisziplinäre Kommunikationsplattform und bildet zudem die informationstechnische Basis zur automatisierten Generierung standardisierter Arbeitsunterlagen und zellenspezifischer SPS-Programme. Darüber hinaus kann das mechatronische PPR-Modell als kollaborative 3D-Validierungsplattform zum Testen und Optimieren realer Steuerungsprogramme verwendet werden, was letzten Endes eine wichtige Grundlage zur Durchführung beschleunigter und stabiler Produktionsanläufe mit dem Ergebnis höherer Reifegrade und geringen Gesamtkosten darstellt.

Die softwaretechnische Umsetzung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Planungsmethode basiert auf kommerziellen IT-Werkzeugen der Digitalen Fabrik, die entsprechend den methodischen Anforderungen angepasst und erweitert werden. Neben der Untersuchung und Bewertung der informationstechnischen Umsetzungsmöglichkeiten werden weiterhin die prozessualen und organisatorischen Auswirkungen der Planungsmethode am Beispiel eines ausgewählten Nutzfahrzeugherstellers aufgezeigt. Anhand eines Praxisbeispiels erfolgen schließlich eine Demonstration der technischen Anwendbarkeit der neuen Methode sowie eine abschließende Bewertung der mit der neuen Gesamtlösung zu erschließenden Nutzenpotentiale.

Abstract

The present thesis describes a new concept for seamless, cross-domain production planning of automated manufacturing cells in the automotive body shop. On the basis of this concept, significant and sustainable use potentials can be developed not only in production planning but also in ramp-up processes.

When comparing the accomplishment of today's planning projects and existing approaches of improving the production planning process, the developed concept is based on some fundamental innovations. These innovations refer particularly to the use of mechatronic resource as well as process elements that bundle all relevant mechanical, electrical and control technical cell data together and that are made available to the related departments in the form of standardized and reusable planning objects. Using these newly configured planning objects, the cross-domain and meshed development of a mechatronic PPR data model takes place (PPR: **p**roduct, **p**rocess, **r**esource). Related to the overall life cycle of automated manufacturing systems this data model has a diverse role. During the production planning process it serves as an interdisciplinary communication platform, which additionally forms the basis for the automated generation of standardized working documents and cell-specific PLC programs. Likewise, using the mechatronic PPR data model, both real PLC programs and associated factory information systems can be validated and optimized without needing the physical manufacturing system. This validation process of virtual commissioning forms an important basis for the accomplishment of accelerated and more robust ramp-up processes resulting in higher degrees of maturity and lower overall project costs.

The software-technical implementation of the developed planning methodology is based on commercial IT tools of the digital factory that are adapted and extended according to the methodological requirements. Apart from the investigation and evaluation of the software-technical implementation possibilities, the process-related and organizational effects of the planning methodology are shown using a selected commercial vehicle manufacturer. Finally, using a practical scenario, both a demonstration of the technical applicability and a concluding evaluation of the associated use potentials of the new planning methodology take place.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	MOTIVATION	1
1.2	ZIELSETZUNG	3
1.3	AUFBAU DER ARBEIT	4
2	DER ENTSTEHUNGSPROZESS AUTOMATISierter FERTIGUNGSZELLEN IM KAROSSERIEROHBAU	7
2.1	FERTIGUNGSZELLEN IM KAROSSERIEROHBAU	7
2.1.1	<i>Produktionsbezogene Eingliederung des Karosserierohbaus.....</i>	<i>8</i>
2.1.2	<i>Aufbau und Strukturierung des Karosserierohbaus.....</i>	<i>8</i>
2.1.3	<i>Ausprägungen automatisierter Rohbau-Fertigungszellen</i>	<i>9</i>
2.1.4	<i>Der Entstehungsprozess von Rohbau-Fertigungszellen.....</i>	<i>12</i>
2.2	GRUNDLAGEN DER PRODUKTIONSPLANUNG.....	14
2.2.1	<i>Begriffsdefinition und Abgrenzungen.....</i>	<i>14</i>
2.2.2	<i>Aufgaben, Ziele und Phasen der technischen Produktionsplanung.....</i>	<i>16</i>
2.2.3	<i>Zellenbezogene Softwareentwicklung</i>	<i>18</i>
2.3	GRUNDLAGEN DES PRODUKTIONSANLAUFS.....	22
2.3.1	<i>Begriffsdefinitionen, Phasen und Aufgabeninhalte</i>	<i>22</i>
2.3.2	<i>Störende Einflussgrößen auf den Produktionsanlauf.....</i>	<i>23</i>
2.3.3	<i>Wiederanläufe nach Integrationsprozessen</i>	<i>26</i>
3	LÖSUNGEN UND DEFIZITE DER DIGITALEN FABRIK.....	27
3.1	BEGRIFFSDEFINITION UND ANWENDUNGSBEREICHE.....	27
3.2	ZIELE UND NUTZEN DER DIGITALEN FABRIK.....	31
3.3	BESTEHENDE VISUALISIERUNGS- UND SIMULATIONSMETHODEN	36
3.3.1	<i>Visualisierungs- und Simulationsmethoden auf Zellenebene.....</i>	<i>36</i>
3.3.2	<i>Virtuelle Inbetriebnahme als maschinennahe Simulationsmethode.....</i>	<i>41</i>

3.4	BESTEHENDE SOFTWARELÖSUNGEN FÜR VIRTUELLE ZELLENINBETRIEBNAHMEN	44
3.4.1	Das Softwaretool DELMIA Automation V5 (DELMIA).....	46
3.4.2	Das Softwaretool Process Simulate Commissioning (Tecnomatix).....	47
3.4.3	Das Softwaretool WinMOD (Mewes & Partner).....	48
3.4.4	Zusammenfassende Bewertung	49
3.5	AKTUELLE PROBLEME UND HANDLUNGSFELDER	50
4	DER ROHBAU-PLANUNGSPROZESS EINES NUTZFAHRZEUGHERSTELLERS.....	53
4.1	UNTERNEHMENSBEREICH UND RAHMENBEDINGUNGEN	53
4.2	VORGABEN FÜR DEN PRODUKTENTSTEHUNGSPROZESS	55
4.3	FACHBEREICHE UND ABLÄUFE IM ROHBAU-PLANUNGSPROZESS.....	56
4.3.1	Fertigungsplanung	57
4.3.2	Betriebsmittelkonstruktion	58
4.3.3	Robotik/Simulation.....	59
4.3.4	Elektro-/Steuerungstechnik	60
4.3.5	Gesamtprozess.....	62
4.4	DEFIZITE IN DER HEUTIGEN PLANUNGSPROZESSKETTE	64
4.5	ANFORDERUNGEN AN EINE RECHNERGESTÜTZTE ROHBAU-PLANUNGSPROZESSKETTE.	68
4.6	BESTEHENDE LÖSUNGSANSÄTZE	69
4.6.1	Ansätze zur automatisierten SPS-Programmgenerierung.....	69
4.6.2	Zusammenfassende Bewertung und Fazit	74
5	KONZEPT ZUR MECHATRONIKORIENTIERTEN ZELLENPLANUNG	77
5.1	MECHATRONIK	78
5.1.1	Begriffsdefinition.....	78
5.1.2	Eigenschaften mechatronischer Systeme	80
5.1.3	Mechatronische Entwicklungsvorgehen.....	82
5.1.4	Zusammenfassung und Fazit	83
5.2	MECHATRONIKORIENTIERTE RESSOURCENPLANUNG.....	84
5.2.1	Inhalte und Bereitstellung mechatronischer Ressourcenkomponenten	84

5.2.2	<i>Entwicklung eines mechatronischen Ressourcenmodells</i>	87
5.3	INTERDISZIPLINÄRE PROZESSPLANUNG AUTOMATISierter FERTIGUNGSZELLEN	89
5.3.1	<i>Motivation und Anforderungen</i>	89
5.3.2	<i>Elemente des Prozessmodells</i>	91
5.3.3	<i>Interdisziplinäre Prozessmodellierung</i>	94
5.4	ERSTELLUNG EINES MECHATRONISCHEN PPR-DATENMODELLS	96
5.4.1	<i>Wechselwirkungen im mechatronischen PPR-Datenmodell</i>	96
5.4.2	<i>Das PPR-Datenmodell als interdisziplinärer „Planungsmaster“</i>	98
5.5	VIRTUELLE INBETRIEBNAHME ALS ÜBERGANG VON DER DIGITALEN IN DIE REALE FABRIK	100
5.5.1	<i>Virtuelle Inbetriebnahme: Vorgehensweise und Nutzenpotentiale</i>	101
5.5.2	<i>Virtuelle Serienbetreuung zugunsten beschleunigter Integrationsprozesse</i>	103
5.5.3	<i>Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit</i>	105
6	IT-UNTERSTÜTZUNG DES INTEGRIERTEN PLANUNGSANSATZES	107
6.1	NUTZUNG MECHATRONISCHER KOMPONENTEN IN DER CAD-BASIERTEN ZELLENKONSTRUKTION	108
6.1.1	<i>Mechatronische Ressourcenmodellierung und -bereitstellung</i>	108
6.1.2	<i>IT-gestützte Entwicklung des mechatronischen Ressourcenmodells</i>	110
6.2	PROZESSMODELLIERUNG MIT DIGITALEN PLANUNGSTOOLS	112
6.3	DAS PPR-MODELL ALS ZENTRALE DATENDREHSCHIEBE	114
6.4	SOFTWAREGESTÜTZTE UMSETZUNG VIRTUELLER INBETRIEBNAHMEN	118
6.5	IT-BEDINGTE EINSCHRÄNKUNGEN	119
7	ANWENDUNGSSZENARIO	121
7.1	BETRACHTUNGS-GEGENSTAND: MAG-SCHWEIßZELLE 6	121
7.2	ZELLENSPEZIFISCHES PPR-DATENMODELL	123
7.2.1	<i>Entwicklung des Ressourcenmodells unter Verwendung mechatronischer Komponenten</i>	123
7.2.2	<i>Digitales Prozessmodell als Basis zur SPS-Programmgenerierung</i>	125

7.2.3	<i>Virtuelle Inbetriebnahme der MAG-Schweißzelle 6</i>	126
7.3	WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG UND FAZIT	127
8	PROZESSUALE UND ORGANISATORISCHE AUSWIRKUNGEN	129
8.1	GRUNDLAGEN DES VERÄNDERUNGSMANAGEMENTS	129
8.1.1	<i>Ganzheitliche Betrachtung von technischen und sozialen Teilsystemen</i>	129
8.1.2	<i>Phasen eines Veränderungsprozesses</i>	130
8.2	DAS MECHATRONIKORIENTIERTE PLANUNGSUMFELD	132
8.2.1	<i>Schrittweise Einführungsstrategie</i>	132
8.2.2	<i>Methodische Auswirkungen auf das Planungsumfeld</i>	133
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	137
9.1	ZUSAMMENFASSUNG DER ARBEIT	137
9.2	ANSÄTZE FÜR WEITERE FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN	140
	QUELLENVERZEICHNIS	143
	LITERATUR	143
	NORMEN UND RICHTLINIEN.....	155
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	157
	TABELLENVERZEICHNIS	161
	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	163
ANHANG A	IT-GESTÜTZTE RESSOURCENPLANUNG.....	167
ANHANG B	IT-GESTÜTZTE PROZESSMODELLIERUNG.....	173
ANHANG C	IT-GESTÜTZTE SPS-PROGRAMMGENERIERUNG	179

1 Einleitung

1.1 Motivation

Nach Jahren des Wachstums sehen sich die Unternehmen der Automobilindustrie derzeit mit stagnierenden oder sogar schrumpfenden Absatzmärkten konfrontiert [ScKF05]. Infolge des daraus resultierenden Konkurrenzkampfes um wichtige Marktanteile finden sich die Automobilhersteller in einem Innovationswettlauf wieder: Neben zunehmend kürzer werdenden Innovations- und Modellzyklen [Dann05] ist dieser insbesondere durch steigende Variantenzahlen [BäHa03] gekennzeichnet. Diese Rahmenbedingungen führen zwangsläufig zu kleineren variantenbezogenen Stückzahlen. Weiterhin gewinnt die Phase des Produktionsanlaufs bzw. die Realisierung schneller Markteintritte – aufgrund des relativ gesehenen höheren Zeitanteils am Produktlebenszyklus – zunehmend an Bedeutung [GeRe04, FWEN05].

Besonders betroffen von diesen marktgetriebenen Herausforderungen sind die Prozesse innerhalb der Produktionsplanung und der anschließenden Anlaufphase. Auf der einen Seite werden diese zunehmend komplexer und dadurch fehleranfälliger [KWES02, WiHW02]. Auf der anderen Seite müssen sie in immer kürzer werdenden Zeitintervallen bewerkstelligt werden. Hierzu erklärt Reithofer: „Wenn wir ein neues Produkt statt in neun Monaten vielleicht in drei Monaten auf volle Produktionskapazität fahren, dann bedeutet das bares Geld für das Unternehmen“ [Reit02]. Diese kostengetriebene Forderung nach beschleunigten und stabileren Produktionsanläufen wird durch die Gewissheit bekräftigt, dass die Anzahl der Produktionsanläufe – nicht zuletzt aufgrund der Zunahme an Produktintegrationen während der laufenden Produktion – zukünftig deutlich ansteigen wird [BuLW03]. So hat sich beispielsweise beim Automobilhersteller DaimlerChrysler die durchschnittliche Anzahl der Serienanläufe pro Jahr in den vergangenen 20 Jahren mehr als verdreifacht [Petr03].

Die wettbewerbsentscheidende Bedeutung des Faktors „Zeit“ konnte bereits in einer Vielzahl von Studien und Untersuchungen nachgewiesen werden. Die Ergebnisse einer solchen Studie, die in [Puhr90] publiziert wurden, sind beispielhaft in Abbildung 1-1 dargestellt. Verglichen mit anderen Faktoren – wie zum Beispiel überhöhte Entwicklungs- und Produktkosten – werfen verzögerte Markteinführungen nicht nur ein nachhaltig schlechtes Image auf das jeweilige Unternehmen. Sie wirken sich auch deutlich negativer auf die wirtschaftliche Gesamtrentabilität eines neuen Produktes aus.

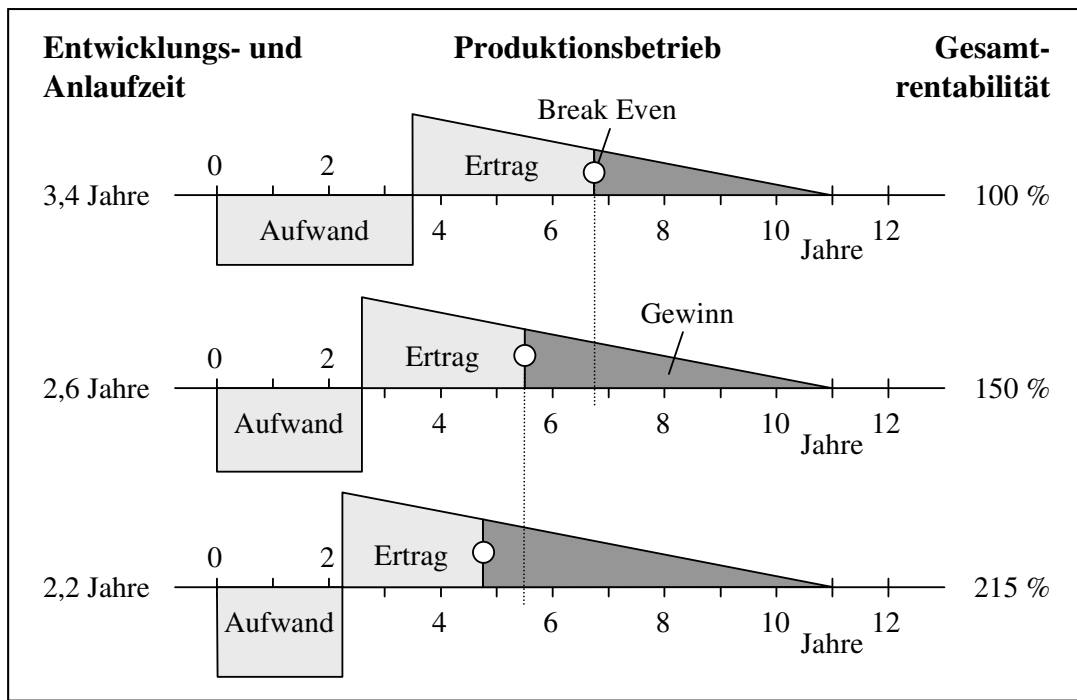


Abbildung 1-1: Auswirkungen des Faktors „Zeit“ auf die Gesamrentabilität nach [Puhr90]

Sowohl die Komplexitätszunahme als auch der marktgetriebene Drang nach beschleunigten Planungs- und Anlaufprozessen tragen wesentlich dazu bei, dass heute etwa „zwei Drittel der Fahrzeuganläufe in Europa sowohl die wirtschaftlichen als auch die technischen Ziele verfehlen“ [Rola03]. Untersuchungen zufolge resultieren diese anlaufbezogenen Schwierigkeiten in erster Linie aus Fehlern und Unzulänglichkeiten, deren Ursachen in der Produktionsplanung zu finden sind [Webe02, DeAm06]. Nach [Sche94, West05] sind dies in den meisten Fällen organisatorische Defizite in Form bereichsübergreifender Missverständnisse sowie technische Fehler, die insbesondere durch den vermehrten Einsatz und die zunehmende Vernetzung von mechanischen, elektrischen und steuerungstechnischen Anlagenkomponenten hervorgerufen werden. All diese Probleme tragen letzten Endes dazu bei, dass die Phase der Inbetriebnahme für bis zu 20 Prozent der Gesamtprojektkosten verantwortlich ist bzw. auf diese Projektphase bis zu 25 Prozent der Gesamtprojektdauer entfällt [Webe02, ZäWü05].

Zur Lösung dieser Konfliktsituation, zunehmend komplexer werdende Produktionssysteme in kürzeren Planungszyklen zu entwickeln bzw. in beschleunigten Anlaufprozessen optimal auf den Produktionsbetrieb vorzubereiten, existieren zwar einige Ansätze, die jedoch nur einzelne Teilaspekte einer gesamten Planungsprozesskette betrachten. Ein gerade in der Automobilindustrie weit verbreiteter Lösungsansatz findet derzeit unter dem Schlagwort „Digitale Fabrik“ zunehmenden Einzug in die operative Praxis [EiBr05].

Die im Rahmen der Digitalen Fabrik entwickelten IT-Werkzeuge weisen gegenwärtig jedoch essentielle Defizite auf. Zum einen existiert bis heute keine durchgängige digitale Planungslösung. Zum anderen unterstützen die bestehenden Partiallösungen lediglich den rein mechanikbezogenen Planungsprozess. Untersuchungen zufolge nimmt die Anlagenmechanik allerdings einen prozentual abnehmenden Anteil der gesamten Anlagenfunktionalität ein. Im Gegensatz dazu werden die elektro- und steuerungstechnischen Anteile eines Fertigungssystems, welche die Hauptursache für verzögerte Inbetriebnahmen darstellen, weiter zunehmen und an Bedeutung gewinnen [ZäWü05].

Jedoch werden in der Digitalen Fabrik gerade diese elektro- und steuerungstechnischen Aspekte bzw. die Schnittstelle zwischen der Mechanikkonstruktion und der Elektro-/Steuerungsprojektierung – sowohl konzeptionell als auch in der softwaretechnischen Umsetzung – bisher nur rudimentär betrachtet.

Es fehlen geeignete Methoden, die in der Mechanikkonstruktion bereits festgelegten Daten für die nachfolgenden Planungsbereiche in vollem Umfang transparent und durchgängig nutzbar zu machen. Die fehlende bereichsübergreifende Datendurchgängigkeit verhindert zudem eine effiziente Rückkopplung der in der Steuerungsprojektierung generierten Daten an die Mechanikkonstruktion. Somit werden wichtige Verbesserungspotentiale bezogen auf einen ganzheitlich optimierten Planungs- und Anlaufprozess von vornherein eingeschränkt. Darüber hinaus existieren keine bereichsübergreifenden Prozess- und Ressourcenbibliotheken, die zugunsten einer Effizienzsteigerung in der Produktionsplanung genutzt werden können. Im Rahmen der Steuerungsprojektierung sind ebenfalls Defizite feststellbar. Diese beziehen sich sowohl auf die Generierung als auch auf das Überprüfen systemspezifischer Steuerungsprogramme. Aufgrund unzureichender Softwareunterstützungen werden die Steuerungsprogramme in heutigen Planungs- und Anlaufprozessen erst während der Anlageninbetriebnahme anhand des realen Produktionssystems getestet und an die realen Gegebenheiten angepasst. Dieser unter einem enormen Zeitdruck stattfindende Anpassungs- und Optimierungsprozess führt jedoch zwangsläufig zu suboptimalen sowie unzureichend dokumentierten Softwarelösungen, was sich letztlich in zeitverzögerten und fehlerbehafteten Produktionsanläufen widerspiegelt.

1.2 Zielsetzung

Um den im Kapitel 1.1 beschriebenen Herausforderungen erfolgreich zu begegnen, bedarf es neuer domänenübergreifender Planungsmethoden. Vor diesem Hintergrund lautet die der Arbeit zugrunde liegende Hypothese wie folgt:

Durch die Realisierung einer mechatronikorientierten digitalen Planungsprozesskette kann nicht nur der ganzheitliche, domänenübergreifende Planungsprozess, sondern auch der Produktionsanlauf komplexer Produktionssysteme sowie Änderungen im laufenden Produktionsbetrieb mit dem Ergebnis höherer Anlagenreifegrade beschleunigt werden.

Grundlage dieser mechatronikorientierten Planungsprozesskette stellt die frühzeitige und integrierte Betrachtung von mechanischen, elektrischen, pneumatischen/hydraulischen und steuerungstechnischen Ressourcendaten dar. Hierzu werden standardisierte domänenübergreifende Ressourcenkomponenten benötigt, die alle zur Projektierung von Produktionssystemen benötigten Ressourceninformationen zentral bündeln und die den jeweiligen Fachbereichen durchgängig und transparent zur Verfügung gestellt werden. Hierbei ist zu klären, welcher Bereich welche Informationen wann bzw. in welcher Form benötigt und wie ein unternehmensweiter Zugriff auf diese interdisziplinären Datenbausteine realisiert werden kann. Auf Basis dieser neu zu entwickelnden Ressourcenkomponenten erfolgt schließlich die methodengestützte Entwicklung eines mechatronischen Ressourcenmodells. Illustriert wird dieser neuartige Ansatz anhand des Entstehungsprozesses automatisierter Fertigungszellen im Karosserierohbau.

Parallel zur Entwicklung des mechatronischen Ressourcenmodells findet die Prozessplanung statt. Aufgrund von Praxisanforderungen soll das den Zellenablauf beschreibende Prozessmodell sowohl als interdisziplinäres Dokumentations- und Kommunikationsmedium als auch als Basis zur automatisierten Generierung von SPS-Programmen dienen.

Eine weitere Zielsetzung dieser Arbeit besteht in der Entwicklung eines Konzepts, das eine vor der realen Anlageninbetriebnahme stattfindende 3D-gestützte Validierung und Optimierung der zellenspezifischen Steuerungsprogramme sowie weiterer produktionsnaher IT-Systeme ermöglicht. Hierzu muss das aus mechatronischen Bausteinen bestehende Ressourcenmodell aufbereitet und mit den realen Steuerungskomponenten verbunden werden. Eine zentrale Herausforderung besteht dabei darin, diese 3D-gestützte Steuerungsvalidierung nicht als eine isolierte Insellösung zu betrachten. Vielmehr ist diese innovative Absicherungsmethode – sowohl methodisch, informationstechnisch als auch organisatorisch – in den ganzheitlich zu betrachtenden Planungsprozess ohne große Mehraufwendungen zu integrieren.

1.3 Aufbau der Arbeit

Im zweiten Kapitel werden zunächst die zum Verständnis dieser Arbeit erforderlichen Grundlagen des Entstehungsprozesses automatisierter Fertigungszellen im Karosserierohbau vermit-

telt. Dabei wird in einem ersten Schritt ein allgemeiner Überblick über den Karosserierohbau in der Automobilindustrie mit dem besonderen Fokus auf die dort eingesetzten automatisierten Fertigungszellen gegeben. Im Anschluss daran erfolgt die Illustration des Entstehungsprozesses solcher Fertigungszellen. Neben den wichtigsten Inhalten und Begriffsdefinitionen der einzelnen Phasen werden in diesem Zusammenhang die gegenwärtigen Problemfelder aufgezeigt und ausgehend davon die wichtigsten Handlungsfelder zusammengetragen.

Um den im zweiten Kapitel beschriebenen Herausforderungen in der Produktionsplanung und im Produktionsanlauf erfolgreich zu begegnen, bietet die „Digitale Fabrik“ verschiedene Lösungsansätze an. Im Rahmen des dritten Kapitels wird daher der derzeitige Stand der Technik im Zusammenhang mit der Digitalen Fabrik evaluiert, bewertet und ausgehend davon die aktuellen Handlungsbedarfe abgeleitet. Schwerpunkt dieses Analyseprozesses bilden die auf der Zellenebene einsetzbaren Simulationsmethoden und IT-Werkzeuge, die nicht nur eine digitale Absicherung mechanischer Leistungsmerkmale, sondern auch eine funktionsorientierte Überprüfung von Steuerungsprogrammen bzw. realen Steuerungskomponenten ermöglichen.

Neben der Evaluierung heute existierender Methoden und IT-Systeme wird im vierten Kapitel der zellenbezogene Rohbau-Planungsprozess eines Nutzfahrzeugherstellers aus verschiedenen Blickwinkeln kritisch analysiert. Ausgehend von dieser Bestandsaufnahme werden die gegenwärtigen Defizite, die aufgrund der vorgenommenen Ergebnisabstraktion auch auf andere Unternehmen dieser Branche übertragbar sind, abgeleitet und die wichtigsten Anforderungen an eine rechnergestützte Planungsprozesskette zusammengetragen. Die Evaluierung bestehender kommerzieller und wissenschaftlicher Lösungsansätze zur Behebung der identifizierten Handlungsfelder bildet den Abschluss des Analyseteils dieser Arbeit.

Auf Basis der im Analyseteil identifizierten Handlungsfelder wird in den Kapiteln 5, 6 und 8 das in dieser Arbeit entwickelte mechatronikorientierte Lösungskonzept vorgestellt und seine wichtigsten Ausprägungen erläutert. Wie in Abbildung 1-2 dargestellt, wird in diesem Zusammenhang nicht nur eine systemneutrale Planungsmethode entworfen, sondern auch deren softwaregestützte Implementierungsmöglichkeiten sowie die prozessualen und organisatorischen Auswirkungen der neuen Methode näher untersucht. Im Gegensatz zu den heute existierenden Planungsmethoden zielt der mechatronikorientierte Planungsansatz nicht auf die Realisierung eines lokalen, bereichsbezogenen Optimums in der Produktionsplanung ab. Vielmehr stellt er einen umfassenden bereichsübergreifenden Ansatz dar, auf dessen Basis sich bedeutende Verbesserungspotentiale entlang des gesamten Lebenszyklus automatisierter Produktionssysteme erwirtschaften lassen.

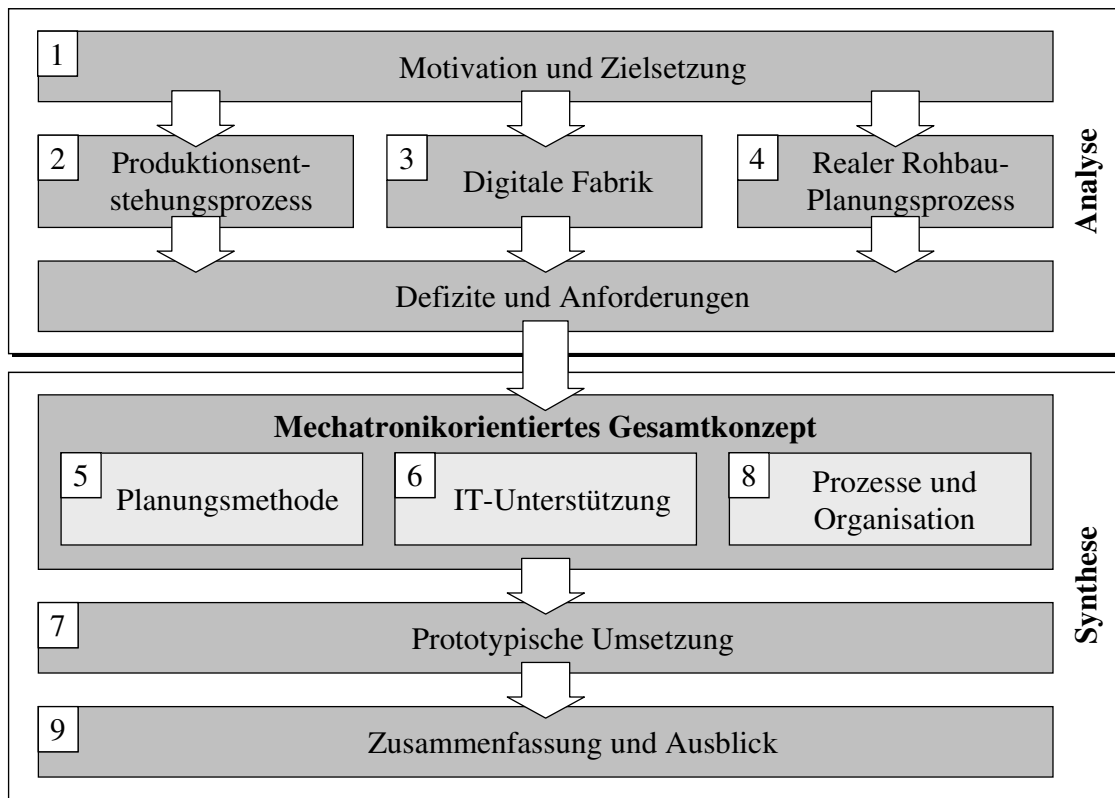


Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit

Fokus des siebten Kapitels bildet die Untersuchung und Bewertung der praktischen Anwendbarkeit der neu entwickelten Planungsmethode und der zur Umsetzung benötigten IT-Infrastruktur anhand eines konkreten Anwendungsszenarios. Hierbei handelt es sich um eine automatisierte Rohbau-Fertigungszelle, die sich seit etwa zwei Jahren im DaimlerChrysler Nutzfahrzeugwerk in Würth im operativen Einsatz befindet. Aufgrund ihrer Ausprägungen (Komponenten, Steuerungstechnik, Automatisierungsgrad etc.) repräsentiert diese Fertigungszelle den derzeitigen Stand der Technik und bietet sich daher als Praxisbeispiel besonders an.

Zum Abschluss werden im neunten Kapitel die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und mögliche Ansätze für weiterführende Forschungsaktivitäten vorgestellt.

2 Der Entstehungsprozess automatisierter Fertigungszellen im Karosserierohbau

Zu Beginn dieses Kapitels wird ein allgemeiner Überblick über den Karosserierohbau in der Automobilindustrie gegeben. Ein besonderer Fokus wird hierbei auf die im Karosserierohbau eingesetzten Fertigungszellen gelegt, die neben ihrem hohen Automatisierungsgrad vor allem durch eine zunehmende Flexibilität gekennzeichnet sind. Der Entstehungsprozess solcher Fertigungszellen stellt den Fokus dieses Kapitels dar. In diesem Zusammenhang werden die einzelnen Phasen des Entstehungsprozesses vorgestellt und ihre wichtigsten Inhalte, Problemfelder und die daraus resultierenden Herausforderungen beschrieben.

2.1 Fertigungszellen im Karosserierohbau

Die deutsche Automobilindustrie ist mit jährlich etwa 5,5 Mio. produzierten PKW und einem Umsatz von etwa 210 Mrd. Euro der drittgrößte Automobilproduzent der Welt und zudem der bedeutendste Wirtschaftszweig in Deutschland [VDA04]. Obwohl sich die Automobilbranche – vor allem in den USA, Japan und Westeuropa – seit einigen Jahren in einer Sättigungsphase befindet [Dann05], hat sich der Beschäftigungsanteil der deutschen Automobilindustrie in den letzten 10 Jahren von 9,5 auf 12,9 Prozent erhöht. Im Jahr 2003 waren ca. 773.200 Menschen in der Automobilindustrie beschäftigt [Wemh05].

Innerhalb der Automobilproduktion nimmt der Karosserierohbau in mehrfacher Hinsicht eine herausragende Stellung ein. Zum einen bestimmt der Rohbau, in dem die Rohkarosserie zusammengesetzt und damit die Außenhaut eines Automobils gefügt wird, maßgeblich das Erscheinungsbild des Automobils und seiner Marke. Aus diesem Grund wird die Fertigung der Fahrzeug-Rohkarosserie auch bei fast allen Automobilherstellern (OEM) als Kernkompetenz gesehen. So beträgt die Eigenleistungstiefe im Karosserierohbau zwischen 80 und 100 Prozent und ist damit fast dreimal so hoch wie in den restlichen Fertigungsbereichen einer Automobilproduktion, deren durchschnittliche Eigenleistungstiefe bei etwa 30 bis 35 Prozent liegt [BINe04]. Zum anderen stellt der Karosserierohbau den mit Abstand kostenintensivsten Fertigungsbereich der gesamten Wertschöpfungskette dar. Nach [SGHV00] müssen dort – nicht zuletzt aufgrund des hohen Automatisierungsgrades von über 90 Prozent (in Westeuropa) – für jedes neu eingeführte Modell Investitionen im dreistelligen Millionenbereich aufgebracht werden. Da die Auslastung der Produktionsanlagen im Karosserierohbau über ihre gesamte

Nutzungsdauer gerechnet in den seltensten Fällen jedoch 50 Prozent übersteigt, fallen hier die hohen Investitionskosten besonders ins Gewicht [Wemh05]. Die eher niedrige Anlagenauslastung auf der einen und der hohe Investitionsbedarf auf der anderen Seite schlagen sich unmittelbar in den Herstellkosten der Fahrzeuge nieder, die mit etwa 15 bis 20 Prozent zum größten Teil vom Karosserierohbau verursacht werden [LoLM02].

2.1.1 Produktionsbezogene Eingliederung des Karosserierohbaus

Eine Automobilproduktion, die im Regelfall sehr produktorientiert organisiert ist, besteht in der Regel aus insgesamt fünf „Hauptgewerken“: dem Presswerk, dem Karosserierohbau, der Oberfläche (Lackiererei), dem Bereich Antriebsstrang (Powertrain) und der Endmontage. Der Begriff „Gewerk“ hat sich in diesem Zusammenhang in der Automobilindustrie fest etabliert und kann allgemein als Synonym für die Begriffe Bereich bzw. Fertigungsbereich verstanden werden. Der grundlegende Zusammenhang zwischen den einzelnen Automobil-Gewerken ist in Abbildung 2-1 dargestellt.

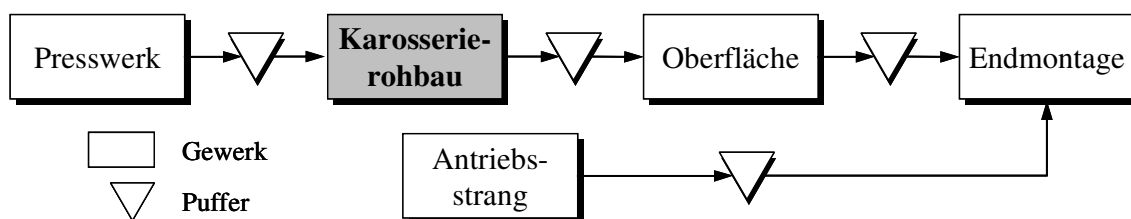


Abbildung 2-1: Produktionsbezogene Eingliederung des Karosserierohbaus

Unter Verwendung der im Presswerk hergestellten Erzeugnisse wird im Karosserierohbau in mehreren Arbeitsschritten die Fahrzeug-Rohkarosserie zusammengefügt. Insgesamt setzt sich eine PKW-Rohkarosserie aus 300 bis 500 Einzelteilen zusammen, die u. a. mit durchschnittlich 3500 bis 5000 Schweißpunkten nicht lösbar miteinander verbunden werden. Nach ihrem Zusammenbau werden die fertigen Rohkarossen zunächst gereinigt, bevor sie zur Lackierung an das Gewerk Oberfläche übergeben werden. Anschließend wird im Rahmen der Endmontage die lackierte Rohkarosserie mit der Innenausstattung (z.B. Cockpit, Sitze) und dem Antriebsstrang komplettiert.

2.1.2 Aufbau und Strukturierung des Karosserierohbaus

Im Allgemeinen ist der Karosserierohbau einer Automobilfabrik in mehrere Ebenen untergliedert. Der gesamte Karosserierohbau setzt sich in aller Regel aus mehreren Linien zusammen, wobei diesbezüglich meist zwischen Haupt- und Nebenlinien unterschieden wird [Wemh05]. Dabei werden in den aus einer Verkettung von Fertigungszellen bestehenden Nebenlinien die

einzelnen aus dem Presswerk stammenden Erzeugnisse zu Baugruppen und Unterbaugruppen zusammengefügt. Anschließend erfolgt der Weitertransport dieser vorgefertigten Module zur Hauptlinie, wo in mehreren Schritten die gesamte Fahrzeug-Rohkarosserie entsteht.

Im Gegensatz zum Aufbau der Nebenlinien ist die Hauptlinie eines Automobilrohbaus in aller Regel in mehrere „Aufbaustufen“ untergliedert, deren Inhalte in Abhängigkeit vom jeweiligen OEM bzw. von der betrachteten Branche differieren können. Abbildung 2-2 zeigt beispielhaft die Gesamtstruktur des PKW-Rohbaus im DaimlerChrysler Werk in Bremen, dessen Hauptlinie aus den drei Aufbaustufen Z1, Z2 und Z3 besteht. Innerhalb der ersten Aufbaustufe (Z1) werden die Baugruppen Vorbau, Hauptboden und Heckboden gefertigt und zur Bodengruppe gefügt. Auf diese Bodengruppe werden in der zweiten Aufbaustufe die beiden Seitenwände, Dach und Rückwand gefügt, deren Ergebnis das so genannte Karosseriegerippe darstellt. Die dritte Aufbaustufe komplettiert schließlich die gesamte Fahrzeug-Rohkarosse, indem das Karosseriegerippe mit weiteren Anbauteilen (Kotflügeln, Türen, Klappen etc.) versehen wird.

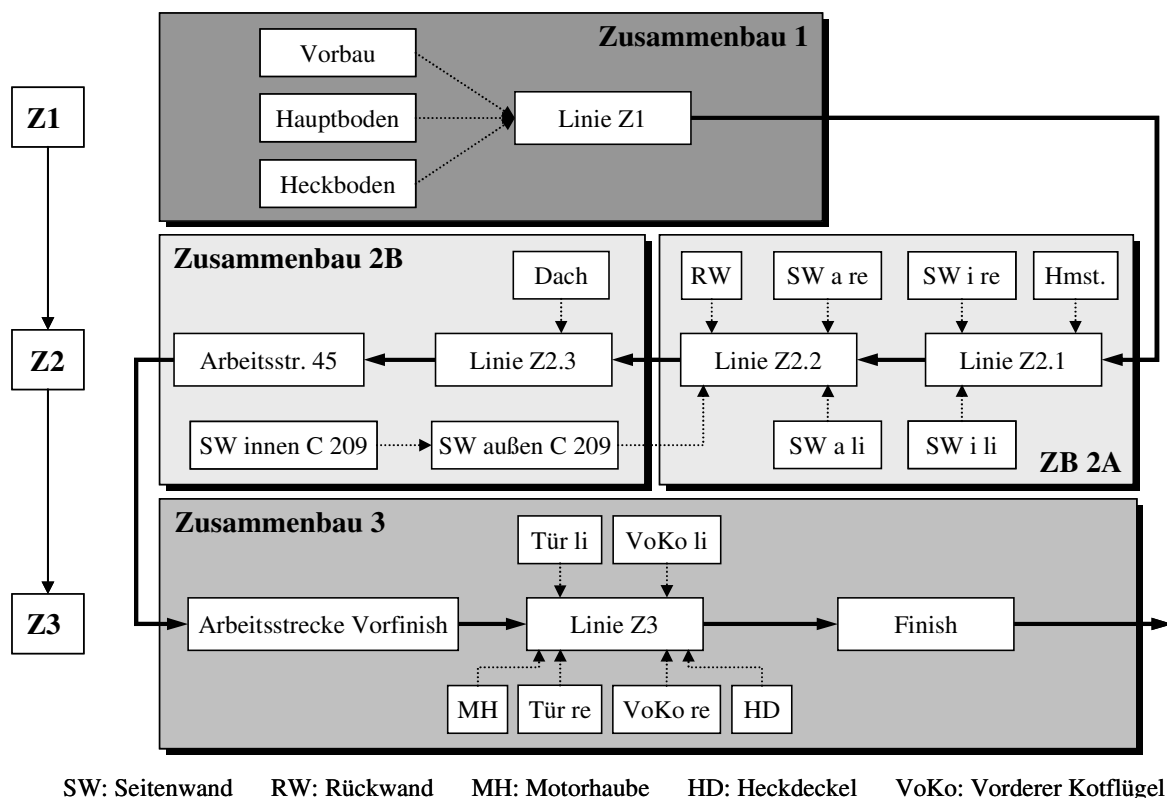


Abbildung 2-2: Strukturierung eines Karosserierohbaus in der Automobilindustrie

2.1.3 Ausprägungen automatisierter Rohbau-Fertigungszellen

In der Vergangenheit wurden die meisten im Karosserierohbau verwendeten Fertigungslinien bzw. -zellen als hochautomatisierte, solitäre Einzellösungen entwickelt und für die Fertigung

eines einzigen Produktes eingesetzt. Die derzeitigen Marktanforderungen in Form steigender Variantenzahlen [BäHa03] sowie sinkender Modellzyklen [Dann05] zwingen die Automobilhersteller allerdings dazu, von dieser produktorientierten und starren Fertigungsstrategie wegzurücken. Nach dem Vorbild japanischer OEM (z.B. Toyota) bemühen sich die europäischen Automobilhersteller gegenwärtig darum, diesen Anforderungen durch den verstärkten Einsatz flexiblerer Rohbaukonzepte zu begegnen. Im Zuge dieser Anlagenflexibilisierung sollen zukünftig auf einer Linie mehrere artverwandte Fahrzeuge bzw. Fahrzeugkomponenten produziert bzw. neu entwickelte Produktvarianten und Fahrzeugmodelle in bereits vorhandene Fertigungslinien integriert werden können.

Mit dieser produktionstechnischen Flexibilität beschäftigen sich eine Reihe wissenschaftlicher Publikationen. Obwohl der Begriff „Flexibilität“ in diesen Beiträgen umfassend diskutiert und erläutert wird, existiert bis heute weder ein einheitliches Verständnis noch eine klare Begriffsdefinition im Kontext produzierender Unternehmen. Als Zusammenfassung der in [Mand78, Pfoh00, TeKu92] publizierten Auffassungen definiert Wemhöner „Flexibilität“ beispielsweise wie folgt: „Flexibilität ist die Fähigkeit eines Systems, sich aufgrund von Freiheitsgraden an unterschiedliche oder sich verändernde, auch unsichere Anforderungen und Randbedingungen effektiv anzupassen“ [Wemh05]. Diese Begriffsdefinition soll auch im Rahmen dieser Arbeit gelten. Eine zunehmende Anlagenflexibilisierung hat zur Folge, dass Anlagenkomponenten – angepasst an die vorliegenden Produkt- und Prozessgegebenheiten – über einen längeren Zeitraum verwendet werden können. Somit lassen sich insgesamt geringere Stückkosten aufgrund des längeren Abschreibungszeitraums der eingesetzten Betriebsmittel realisieren. Jedoch stellt diese verbesserte Wirtschaftlichkeit nur die eine Seite der Medaille dar. Auf der anderen Seite werden im Zuge der zunehmenden Anlagenflexibilisierungen die Planungs- und insbesondere die Anlaufprozesse deutlich komplexer und in Folge dessen auch fehleranfälliger.

Da diese Arbeit den Planungs- und Anlaufprozess automatisierter Fertigungszellen im Karosserierohbau fokussiert, soll im Folgenden der in vielen Ausprägungen existierende Begriff der Fertigungszelle auf den Umfang dieser Arbeit eingegrenzt werden. Wie in Kapitel 2.1.2 erläutert, werden Fertigungszellen im Karosserierohbau in erster Linie zum Fügen von Baugruppen eingesetzt. Dabei kann eine Zelle einen Bestandteil einer Fertigungslinie darstellen oder auch als eine isolierte Fertigungsinsel fungieren. Abbildung 2-3 zeigt beispielhaft das Layout einer typischen automatisierten Fertigungszelle, die als Ausschweißstation einen Teilbereich der in Abbildung 2-2 skizzierten Rohbaulinie Z2.1 darstellt.

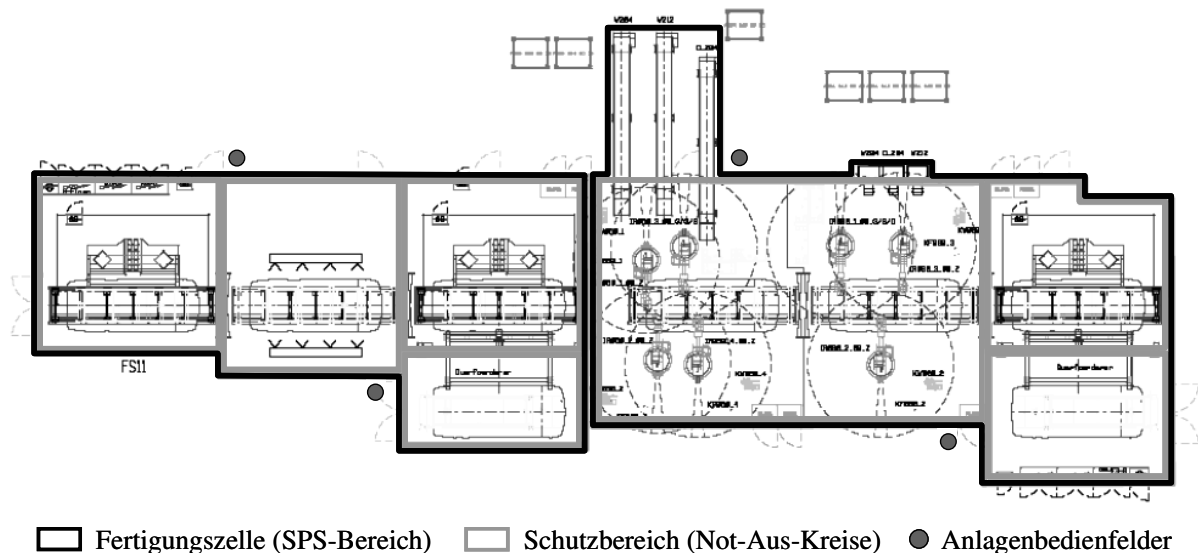


Abbildung 2-3: 2D-Layout einer Fertigungszelle am Beispiel der Rohbaulinie Z2.1

In Analogie zum Begriff der Fertigungszelle werden abhängig vom jeweiligen Fachbereich und der damit verbundenen Blickrichtung meist die Begriffe Arbeitsstation, SPS-Bereich oder Bandabschnitt als Synonyme verwendet. Ein einheitlicher Sprachgebrauch existiert bis heute nicht. Grundsätzlich stellen Fertigungszellen jedoch offene Systeme dar und können demzufolge mit Hilfe der Systemtheorie charakterisiert und beschrieben werden. Nach [Ropo79] beschreibt die Systemtheorie „die Theorie der Beziehungen zwischen den Elementen eines Systems, der Beziehung zwischen Struktur und Funktion von Systemen sowie der Beziehungen zwischen Teilsystemen und Gesamtsystem“. Dem Aufbau eines Systems liegen folgende Regeln zugrunde [Wien97]:

- Ein System besteht aus einer Menge von Elementen und einer Menge von Beziehungen (Relationen), die zwischen diesen Elementen herrschen. Eine Gruppe von Elementen, die über Beziehungen verknüpft sind, bildet eine Struktur.
- Jedes System kann in Subsysteme niedriger Ordnung zerlegt werden. Elemente, die nach einer anderen Beziehung zusammengefasst werden, heißen Teilsysteme.
- Jedes Element, jedes Subsystem und das gesamte System kann mit einer Systemgrenze abgegrenzt und durch Eingänge, Ausgänge und eine Funktion beschrieben werden. Wenn das System als Ganzes keine Eingangs- und Ausgangsgrößen hat, spricht man von einem geschlossenen System, sonst handelt es sich – wie bei Fertigungszellen üblich – um offene Systeme.

Neben diesem recht allgemein gefassten systemtheoretischen Definitionsansatz existieren in der Literatur eine Reihe weiterer Definitionen für Fertigungszellen, die ihren Ursprung meist

im Werkzeugmaschinenumfeld haben. Nach [Bern01] setzt sich eine Fertigungszelle aus „einem Bearbeitungszentrum und einem maschinenexternen Werkstückspeicher zusammen und ist durch die Automatisierung der Materiallogistik gekennzeichnet. Weiterhin verfügt sie über eine eigenständige Steuerung, die bestimmte Transformationsvorgänge vollständig und autonom ausführt und über definierte Schnittstellen der Ver- und Entsorgung mit dem Gesamtorganismus der Produktion verbunden ist“. Ähnliche Definitionen finden sich auch in [Stie99, Wien97]. Grundsätzlich treffen all diese Definitionen auch auf Fertigungszellen im Karosserierohbau zu, wenngleich die Hauptkomponenten von Rohbau-Fertigungszellen im Vergleich zu Werkzeugmaschinen differieren.

Typische Rohbauzellen bestehen in der Regel aus einem oder mehreren Robotern (zum Handhaben, Fügen etc.) sowie aus weiteren Elementen, die für den zellenbezogenen Materialfluss verantwortlich sind. Diese rohbauspezifischen Zellenkomponenten lassen sich nach [Stie99] allgemein in typengebundene und typenungebundene Betriebsmittel unterteilen. Betriebsmittel können dabei als „technische Hilfsmittel verstanden werden, die zur Verrichtung einer gestellten Arbeitsaufgabe erforderlich sind“ [Stie99]. Während typenungebundene Betriebsmittel produktunabhängig eingesetzt werden können (z.B. Spanner), weisen typengebundene Betriebsmittel einen konkreten Produktbezug auf. Beispiele hierfür sind spezielle Vorrichtungskomponenten (z.B. Rahmen, Anbauteile) sowie spezielle Schweißzangen. Hinsichtlich der angestrebten Anlagenflexibilisierung gewinnen vor allem die typenungebundenen Betriebsmittel aufgrund ihres flexibleren Einsatzspektrums zunehmend an Bedeutung.

Analog zu Werkzeugmaschinen bestehen Rohbau-Fertigungszellen neben mechanischen auch aus elektrischen Betriebsmitteln (Aktoren, Sensoren) sowie einer übergeordneten signalverarbeitenden Zellensteuerung (SPS), wobei all diese Komponenten in ständiger Wechselwirkung miteinander stehen. Aus diesem Grund stellen Rohbauzellen, wie in Kapitel 5.1 ausführlicher erläutert, typische Beispiele mechatronischer Systeme dar.

2.1.4 Der Entstehungsprozess von Rohbau-Fertigungszellen

In diesem Abschnitt wird ein grundlegender Überblick über den Entstehungsprozess von Rohbau-Fertigungszellen gegeben, dessen Hauptphasen in den folgenden Abschnitten vorgestellt und hinsichtlich Aufgabeninhalten, Problemfeldern sowie zukünftigen Herausforderungen beschrieben werden. Wie in Abbildung 2-4 illustriert, lässt sich der zellenbezogene Produktionsentstehungsprozess in die Hauptphasen Produktionsplanung, Realisierung und Produktionsanlauf untergliedern. Vervollständigt wird der gesamte Lebenszyklus eines Produktionssystems

durch die beiden Projektphasen Produktionsbetrieb und Redistribution. Nach [WiHW02] setzt sich die Redistributionsphase wiederum aus den beiden Phasen Demontage und Recycling zusammen. Diese Lebenszyklusphase wird in dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet.

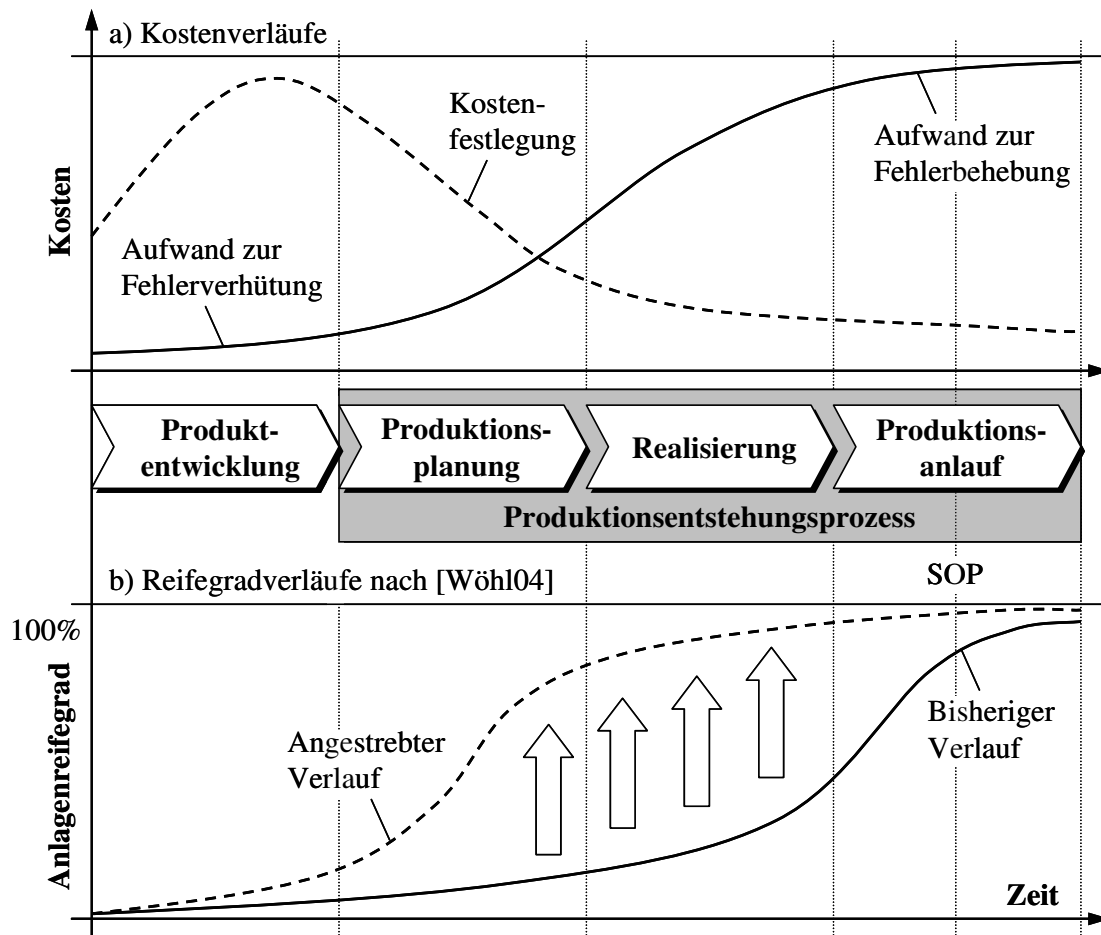


Abbildung 2-4: Kosten- und Reifegradverläufe im Produktentstehungsprozess

Neben den einzelnen Hauptphasen zeigt Abbildung 2-4 die entlang des Produktentstehungsprozesses geltenden Kosten- und Reifegradverläufe. Dabei verdeutlicht insbesondere das obere kostenorientierte Schaubild die herausragende Bedeutung der Produktionsplanung, da diese Phase in hohem Maße für die projektbezogenen Gesamtkosten verantwortlich ist. Zum einen werden hier alle wesentlichen Entscheidungen bezüglich der Prozess- und Produktionsgestaltung getroffen (z.B. Technologie-, Betriebsmittelauswahl). Zum anderen entstehen in dieser Phase die meisten Fehler, die dann im späteren Projektverlauf (insbesondere während der Anlaufphase) mit einem immensen Zeit- und Kostenaufwand behoben werden müssen [Puhr90, VDI2247].

Im unteren Schaubild von Abbildung 2-4 sind der heutige und der zukünftig angestrebte Verlauf des Anlagenreifegrads in qualitativer Form einander gegenübergestellt. In Anlehnung an

die in [MüBW05] diskutierte Reifegradthematik ist der Begriff Reifegrad allgemein als „Einschätzung der verwendungsbezogenen Güte eines Produktes“ zu verstehen. Bezogen auf den Anlagenreifegrad kommt vor allem dem Produktionsanlauf eine entscheidende Bedeutung zu. Dies rührt daher, dass in dieser Phase alle Teilsysteme eines Produktionssystems (Mechanik, Elektrik, Software) erstmals zu einem Gesamtsystem zusammengefügt werden und anschließend miteinander interagieren müssen [ZVWM04]. Aus diesem Grund bestimmt der Produktionsanlauf maßgeblich die produktionsbezogene Güte (Qualität) und demnach auch die Wirtschaftlichkeit des in der Produktionsplanung entwickelten Gesamtsystems.

In den folgenden Kapiteln werden die beiden Phasen der Produktionsplanung und des Produktionsanlaufs vorgestellt und kritisch beleuchtet. Dabei werden die zum Verständnis dieser Arbeit erforderlichen Grundlagen gelegt.

2.2 Grundlagen der Produktionsplanung

Da für den Begriff „Planen“ eine Vielzahl unterschiedlicher Definitionen und Auffassungen existieren, wird in einem ersten Schritt eine eindeutige Begriffseingrenzung auf den Umfang dieser Arbeit vorgenommen. Der zweite Teil dieses Kapitels widmet sich den Planungsphasen und deren Hauptinhalten. Einen besonderen Schwerpunkt stellt dabei die Phase der zellenbezogenen Softwareentwicklung (SPS-Projektierung) dar.

2.2.1 Begriffsdefinition und Abgrenzungen

Nach [Wöhe96] bezeichnet der Begriff Planung die „gedankliche Vorwegnahme zukünftigen Handelns durch Abwägen verschiedener Handlungsalternativen und Entscheidungen für den günstigsten Weg“. Dabei ist Planung gleichzusetzen mit dem „Treffen von Entscheidungen, die in die Zukunft gerichtet sind und durch die der betriebliche Prozessablauf als Ganzes und in seinen Teilen festgelegt wird“ [Wöhe96]. Der „günstigste Weg“ bedeutet in diesem Zusammenhang das Auffinden der wirtschaftlichsten Lösung, die nach [Stie99] dann erreicht wird, wenn „die Kriterien Qualität, Termin und Kosten in ihrer Gesamtheit ein Optimum ergeben“. Eine weitere Definition des Begriffs Planen liefert [Stie99], der darunter das „geistige Vorbereiten zukünftiger, zielgerichteter Handlungen“ versteht. Als die wichtigsten Merkmale einer Planung gelten nach [Wien97] ihre „zielgerichtete Zukunftsbezogenheit sowie das im Gegensatz zur Improvisation rationale, nachvollziehbare Vorgehen“.

Bezogen auf das Umfeld produzierender Unternehmen, in denen abhängig vom betrachteten Industriezweig meist die Begriffe Produktions-, Fertigungs- und Fabrikplanung synonym ver-

wendet werden, muss grundsätzlich zwischen betriebswirtschaftlich- und technisch-orientierten Planungsumfängen unterschieden werden [Zenn06]. Während die betriebswirtschaftliche Produktionsplanung die logistischen Abläufe eines Unternehmens im Sinne der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) fokussiert [GüTe05], widmet sich die technische Produktionsplanung eher den Tätigkeiten, die zur wirtschaftlichen Gestaltung von Produktionsprozessen und -einrichtungen erforderlich sind. Nach Eversheim wird im Rahmen der technischen Produktionsplanung festgelegt, was, wie und womit etwas hergestellt wird [Ever02]. Ein wenig genauer werden die einzelnen Inhalte der technischen Produktionsplanung in der VDI-Richtlinie 4499, die einen engen Bezug zur Automobilindustrie aufweist, beschrieben [VDI4499]. Demnach umfasst diese die „Planung von Produktionsprozessen, -systemen und industriellen Produktionsstätten sowie die Überwachung der Realisierung bis zum Anlauf der Produktion. Der Umfang reicht dabei von der Planung einer einzelnen Maschine mit ihren Nebeneinrichtungen über die Umplanung von Teilbereichen der Produktion bis zur Erstellung eines neuen Werks“.

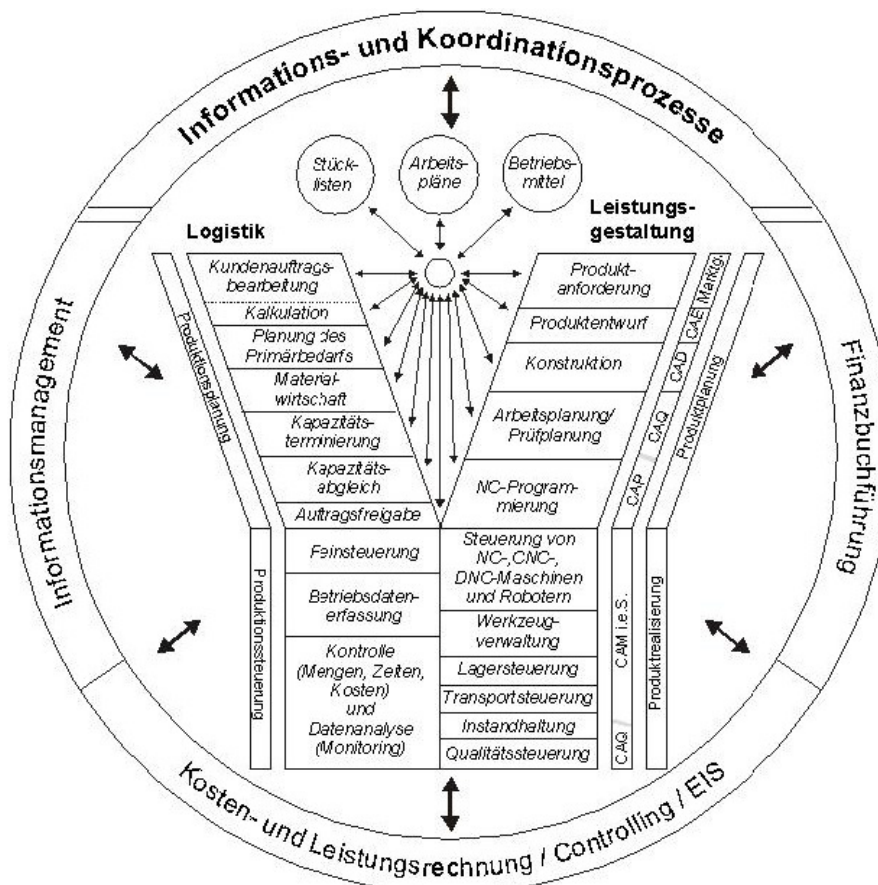


Abbildung 2-5: Y-CIM-Modell nach [Sche97]

Die inhaltliche Abgrenzung bzw. die jeweiligen Zusammenhänge zwischen der betriebswirtschaftlichen und der technischen Produktionsplanung werden im so genannten „Y-CIM-Mo-

dell“ verdeutlicht (Abbildung 2-5). Nach [Sche97] stellt der linke Ast dieses Modells primär die betriebswirtschaftlich-planerisch orientierte Produktionsplanung und -steuerung dar. Der rechte Ast beinhaltet hingegen die technische Produktionsplanung, die den Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt.

2.2.2 Aufgaben, Ziele und Phasen der technischen Produktionsplanung

Aufgrund ihrer Brückenfunktion zwischen der Produktentwicklung und der Produktion nimmt die technische Produktionsplanung in produzierenden Unternehmen eine wichtige Rolle ein. Dabei bezieht sich der Aufgabenbereich der Produktionsplanung „auf alle einmalig auftretenden Planungsmaßnahmen, die unter ständiger Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit zur Sicherung der fertigungsgerechten Herstellung eines Erzeugnisses führen“ [REFA69]. Bezogen auf ihre Aufgabeninhalte umfasst die technische Produktionsplanung sowohl die Neuplanung von Produktionseinrichtungen als auch die Um- bzw. Erweiterungsplanung bestehender Produktionssysteme [KeSG84]. In diesem Zusammenhang besteht nach [Wien97] das vorrangige Ziel darin, „durch ein methodisches Vorgehen unter Nutzung der Informationstechnik ein Optimum aus Planungsaufwand und Arbeitsergebnis zu erreichen. Während der Aufwand durch den Einsatz von Material, Betriebsmitteln und Personal erfolgt, stellt sich das Ergebnis in verkaufsfähigen Erzeugnissen dar“.

Grundlegend können die Aufgaben der Produktionsplanung nach verschiedenen Kriterien – wie zum Beispiel hinsichtlich ihrer zeitlichen Fristigkeit – eingeteilt werden. Nach [REFA85] lassen sich ihre Aufgaben demnach in die kurz- bis mittelfristig ausgerichtete Arbeitsablaufplanung (Prozessgestaltung) und die Arbeitssystemplanung (Produktionsmittelgestaltung) untergliedern. Dabei beinhaltet die Produktionsmittelgestaltung die langfristig-orientierte, wirtschaftliche Auslegung und Gestaltung von Fertigung und Montage. Als die wichtigsten Aufgaben der Prozessgestaltung führt Eversheim u. a. die Grobablauf-, Feinablauf-, Operations-, Fertigungs- und Prüfmittelplanung sowie die Softwareentwicklung an [Ever02].

Um ein strukturiertes Vorgehen innerhalb der Produktionsplanung zu gewährleisten, wird ihr Gesamttablauf in mehrere Phasen untergliedert. Aggteleky unterscheidet dabei beispielsweise zwischen den drei Phasen Vorarbeiten, Projektstudie und Ausführungsplanung [Aggt87]. In der ersten Planungsphase wird im Rahmen der Vorarbeiten eine problembezogene Situationsanalyse durchgeführt und die zugrunde liegenden Annahmen und Projektprämissen in einem Zielkonzept zusammengefasst. Diese münden in eine konkrete Aufgabenstellung. Basierend darauf werden in einem weiteren Schritt verschiedene konzeptionelle Lösungsmöglichkeiten

entwickelt, die anschließend unter technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet und miteinander verglichen werden. Nach der Entscheidungsfindung folgt die zeitintensivste und aufwendigste Planungsphase: die Ausführungsplanung. Diese umfasst u. a. die gesamte Mechanik- und Elektrokonstruktion sowie die anlagenbezogene Softwareentwicklung und endet schließlich mit dem Anlauf des jeweiligen Produktionssystems. Zur Veranschaulichung dieses 3-stufigen Planungsprozesses verwendet Aggteleky die Darstellung einer Planungspyramide. Neben den einzelnen Phasen beinhaltet diese Planungspyramide weiterhin die jeweiligen Zwischenergebnisse, wobei die einzelnen Pyramidenabschnitte in ihrer Fläche den zeitlichen Arbeitsaufwendungen der Planungsphasen entsprechen (Abbildung 2-6a).

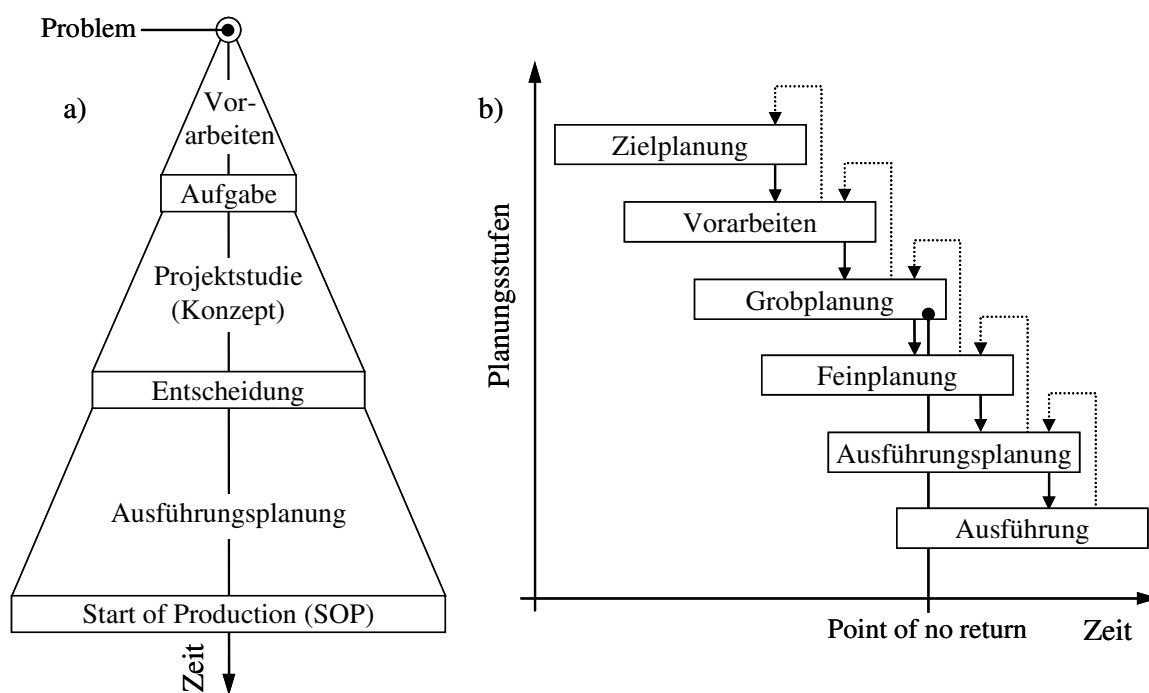


Abbildung 2-6: Planungsphasen nach [Aggt87] (a) und [KeSG84] (b)

Ein weiteres Modell, welches die einzelnen Planungsphasen und ihre individuellen Wechselwirkungen darstellt, ist in [KeSG84] beschrieben. Dabei wird der gesamte Planungsablauf, wie in Abbildung 2-6b illustriert, in die sechs Phasen Zielplanung, Vorarbeiten, Grobplanung, Feinplanung, Ausführungsplanung und Ausführung untergliedert, deren Inhalte jedoch den in [Aggt87] beschriebenen Planungsphasen weitestgehend entsprechen. Im Gegensatz zu Aggteleky betont Kettner allerdings, dass „die einzelnen Planungsstufen weder klar voneinander abgegrenzt noch ausschließlich nacheinander durchzuführen sind. Vielmehr handelt es sich um fließende Übergänge mit einem Ineinandergreifen der einzelnen Stufen und zahlreichen Rückkopplungen im Planungsablauf“ [KeSG84]. Beiden Modellen gemeinsam ist jedoch die prinzipielle Abarbeitung der einzelnen Planungsphasen nach der klassischen „Top-Down-Metho-

dik“, nach der ein Produktionssystem stets vom „Groben zum Feinen“ entwickelt wird. Neben diesen beiden Modellen existieren in der Literatur – sowohl im wissenschaftlichen als auch im industriellen Umfeld – eine Vielzahl weiterer Planungsansätze (z.B. in [Schm95, Stie99, Schl05, Scho06]). Wenngleich sich diese Ansätze zumeist in der namentlichen Bezeichnung der einzelnen Planungsphasen unterscheiden, so orientieren sie sich inhaltlich jedoch weitestgehend an den in [Aggt87] und [KeSG84] dargestellten Grundstrukturen.

2.2.3 Zellenbezogene Softwareentwicklung

Da in den letzten Jahren der Software- bzw. Steuerungsanteil an Produktionssystemen drastisch zugenommen hat und in heutigen Inbetriebnahme- und Produktionsprozessen die größte Fehlerquelle darstellt [ZäWü05], kommt gerade der Softwareentwicklung innerhalb der Produktionsplanung eine entscheidende Bedeutung zu. Ausgehend von den wichtigsten Grundlagen speicherprogrammierbarer Steuerungen werden im Folgenden die in [IEC61131-3] definierten SPS-Programmiersprachen sowie die in der Literatur vorzufindenden Vorgehensmodelle zur Projektierung von SPS-Software vorgestellt und erläutert.

Grundlagen speicherprogrammierbarer Steuerungen (SPS)

Steuerung oder Steuern bezeichnet nach [DIN19226] den „Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen“. Diese Gesetzmäßigkeiten werden dabei in einem Programm formuliert, das in einem Steuerungsrechner – in diesem Fall in einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) – abläuft. Die wichtigsten Funktionselemente einer SPS sind das Steuerwerk mit einem oder mehreren Mikroprozessoren (CPU) sowie die zugehörigen Speicher (RAM) für Daten (Variablen, Parameter etc.) und Programme (Anwender- und Systemprogramme) [Seit03]. Das Hauptcharakteristikum einer SPS ist ihre zyklisch verlaufende Informationsverarbeitung nach dem so genannten „EVA-Prinzip“. Demnach werden zunächst die von Sensoren erfassten Daten (z.B. Teileerkennung, Endlagenmeldungen) in die CPU eingelesen, gemäß dem SPS-Programm verarbeitet und anschließend als Stellsignale an die Aktoren (z.B. Ventile, Motoren) ausgegeben (Abbildung 2-7).

SPS-Programmiersprachen nach IEC 61131-3

Mit der Entwicklung der verschiedenen speicherprogrammierbaren Steuerungen entstanden zahlreiche herstellereigenspezifische Programmierumgebungen. Die IEC 61131-3 wurde mit dem Ziel geschaffen, herstellerunabhängige Programmiersprachen zu definieren und somit die Pro-

grammierung zugunsten einer Reduktion des Engineering- und Instandhaltungsaufwands der Software zu vereinheitlichen [Seit03]. In dieser Norm [IEC61131-3] sind sowohl die Syntax als auch die Semantik von insgesamt fünf verschiedenen Programmiersprachen festgelegt, die sich in einer ersten Näherung in textuelle und graphisch-orientierte Programmiersprachen untergliedern lassen. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über diese SPS-Programmiersprachen gegeben, deren Darstellungsformen Abbildung 2-7 zu entnehmen sind.

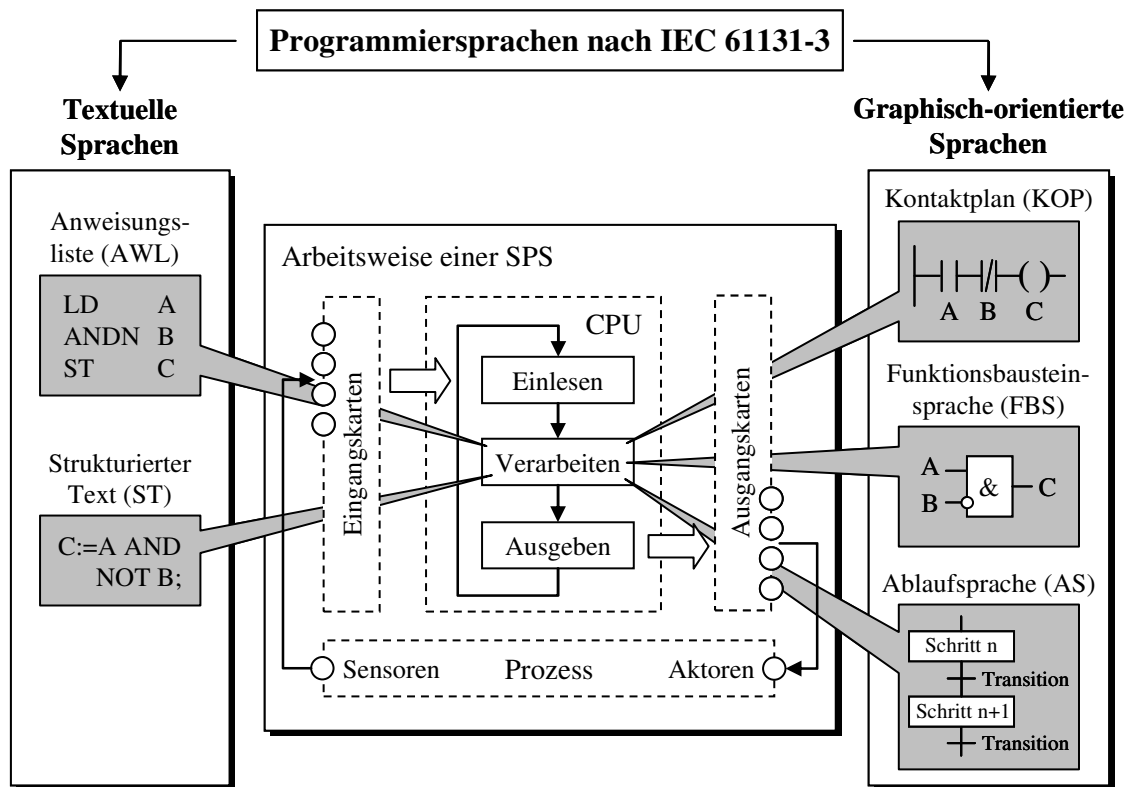


Abbildung 2-7: SPS-Programmiersprachen nach IEC 61131-3

- **Anweisungsliste (AWL):** Textbasierte, maschinennahe Sprache (ähnlich Assembler)
- **Strukturierter Text (ST):** Textbasierte, prozedurale Hochsprache (ähnlich PASCAL)
- **Kontaktplan (KOP):** Graphische Programmiersprache (basiert auf einem genormten Satz von Relaislogik-Programmiersymbolen)
- **Funktionsbausteinsprache (FBS):** Graphische, datenfluss-orientierte Sprache, bei der die Ein- und Ausgänge von Logik-Bausteinen miteinander verschaltet werden
- **Ablaufsprache (AS):** Graphische Programmiersprache, der in dieser Arbeit eine besondere Bedeutung zukommt. Mit ihr werden die zu lösenden Steuerungsaufgaben in Form ablauf-orientierter Schrittketten programmiert. Allgemein bestehen Schrittketten aus Schritten und Transitionen (Weiterschaltbedingungen), die alternierend durch gerichtete Verbindungen

miteinander verbunden sind. Jedem Schritt werden dabei bestimmte Aktionen zugeordnet, die wiederum verschiedene Programme zur Ansteuerung der im Feld eingesetzten Aktoren aktivieren. Der Übergang von einem Schritt zum nächsten erfolgt nur dann, wenn die zwischen den Schritten geschaltete Transitionsbedingung den boole'schen Wert „true“ liefert. Aufgrund ihrer guten Verständlichkeit und Übersichtlichkeit wird die Ablaufsprache, mit der sowohl sequentielle als auch parallele Prozesse formuliert werden können, in der Praxis häufig als Strukturierungsmittel ganzer SPS-Programme verwendet.

Da die zur Anlagensteuerung eingesetzten SPS-Programme in der Praxis regelmäßig gewartet und bei Anlagenoptimierungen an die neuen Gegebenheiten angepasst werden müssen, ist die „Verständlichkeit und Übersichtlichkeit der Software oberstes Gebot“ [Seit03]. Daher sollten übergeordnete SPS-Programme eher unter Verwendung graphisch-orientierter Programmiersprachen übersichtlich und änderungsfreundlich entwickelt werden, während sich komplexere Funktionen am besten mit Hilfe textueller Sprachen realisieren lassen.

Zwar konnte mit der Einführung der IEC 61131-3 eine grundlegende Standardisierung der einzelnen SPS-Programmiersprachen erreicht werden, jedoch macht die Norm beispielsweise keine Aussagen darüber, wann eine Software IEC 61131-3 konform organisiert ist. Dies hat zur Folge, dass sich die in einem SPS-Programmiersystem erzeugten Steuerungsprogramme nicht zwangsläufig in Programmierumgebungen anderer Hersteller überführen lassen. Mit der Realisierung eines standardisierten systemübergreifenden Datenaustausches beschäftigt sich schwerpunktmäßig die im Jahr 1992 gegründete Nutzerorganisation PLCopen, deren Ziel die „Förderung von Entwicklung und Einsatz kompatibler Software für SPSen“ ist [JoTi00]. Dabei wird u. a. die Entwicklung eines standardisierten XML-Austauschformats vorangetrieben. Betrachtet man jedoch die von SPS-Programmierungswerkzeugen bereitgestellten Systemschnittstellen (Tabelle 6-2), so scheint dieses propagierte Ziel vielmehr eine ferne Zukunftsvision als eine in naher Zukunft umsetzbare Lösung darzustellen.

Projektierungsphasen von SPS-Software

Nach dem in [Same97] publizierten Phasen- bzw. Wasserfallmodell kann der softwarebezogene Projektierungsprozess, wie in Abbildung 2-8 dargestellt, in die fünf Phasen Spezifikation, Entwurf, Implementierung, Test und Betrieb/Wartung untergliedert werden.

Ausgehend von den aus der Aufgabenspezifikation entwickelten Softwareanforderungen wird das grundlegende Programmkonzept (Festlegung der Betriebsarten, Entwurf der Programmstruktur etc.) entworfen, das die Grundlage für die anschließende Implementierungsphase bil-

det. Dort wird unter Verwendung bestehender Softwarebibliotheken und Programmiersysteme das vorliegende Programmkonzept in einen ablauffähigen Softwarecode umgesetzt, der nach seiner Fertigstellung in einem weiteren Schritt analysiert und nach gewissen Vorgaben getestet wird. Dazu werden häufig spezielle Testmuster entwickelt, auf deren Basis sich aus Komplexitätsgründen jedoch zumeist nur einzelne Teile des gesamten SPS-Programms überprüfen lassen. Vor diesem Hintergrund wurden in den vergangenen Jahren innovative und umfassende Softwarelösungen entwickelt (Kapitel 3.4). Diese ermöglichen sowohl die Validierung von SPS-Programmen als auch eine Überprüfung der eingesetzten Steuerungshardware. Nach dem Soft- und Hardwaretest erfolgt die Übertragung der Steuerungsprogramme auf das reale Fertigungssystem. Dort muss die im Vorfeld getestete Steuerungssoftware lediglich an die realen Gegebenheiten angepasst werden.

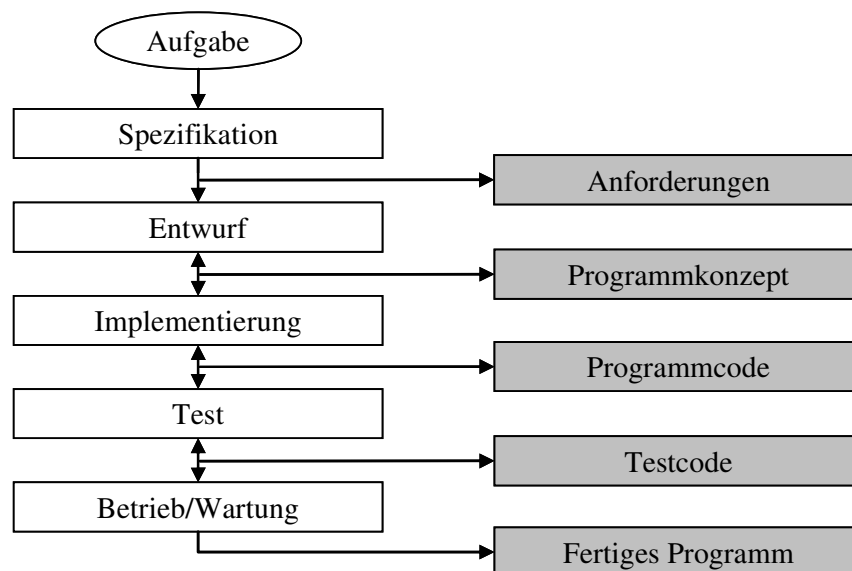


Abbildung 2-8: Wasserfallmodell nach [Same97]

Neben dem Wasserfallmodell existieren in der Literatur noch eine Reihe weiterer Vorgehensmodelle zur Softwareentwicklung. Hierzu zählen beispielsweise das so genannte Spiralmodell [Wall01] und das V-Modell nach [Boeh79]. Während das Spiralmodell eine Erweiterung des Wasserfallmodells um die regelmäßige Durchführung von Risikoanalysen und um den Faktor Kosten darstellt, ist das weit verbreitete V-Modell insbesondere durch das Gegenüberstellen von konstruktiven Tätigkeiten auf der einen und entsprechender Testumfänge auf der anderen Seite gekennzeichnet [Wall01]. Zwar stellen all diese Modelle systematische Vorgehensweisen zur SPS-Programmierung und -validierung dar, werden in der Praxis jedoch aufgrund des zunehmend größer werdenden Zeit- und Kostendrucks und der steigenden Anlagenkomplexitäten nur in den seltensten Fällen angewendet.

2.3 Grundlagen des Produktionsanlaufs

Im Anschluss an die Fertigung und Montage des Produktionssystems schließt sich die Phase des Produktionsanlaufs an. Diese nimmt aufgrund ihrer Brückenfunktion zwischen der Produktionsplanung und dem Produktionsbetrieb in vielerlei Hinsicht eine zentrale Stellung im Lebenszyklus eines Produktionssystems ein. Zum einen treten in dieser Projektphase viele der im Vorfeld getätigten Unzulänglichkeiten zum ersten Mal in Erscheinung, da erst hier das Zusammenspiel der mechanischen, elektrischen, hydraulischen/pneumatischen und steuerungstechnischen Funktionen eines Produktionssystems überprüft werden kann. Zum anderen hat der Produktionsanlauf direkte Auswirkungen auf den Markteintrittszeitpunkt neuer Produkte und bestimmt zudem die Wirtschaftlichkeit des späteren Produktionsbetriebs.

2.3.1 Begriffsdefinitionen, Phasen und Aufgabeninhalte

Für die „Übergangsphase vom stationären Zustand nach der Realisierung des Produktionssystems in den stationären Zustand des Dauerbetriebs“ [Webe02] werden in der Literatur bzw. im industriellen Umfeld häufig die beiden Begriffe „Inbetriebnahme“ und „Inbetriebsetzung“ als Synonyme verwendet. Obwohl die Inbetriebnahme im Lebenszyklus eines jeden Produktionssystems eine zentrale Schlüsselrolle einnimmt, existiert bis heute weder ein einheitliches Begriffsverständnis, noch sind die exakten Aufgabeninhalte einer Inbetriebnahme klar umrissen. So wird beispielsweise in [DIN19246] definiert, dass die Inbetriebnahme allgemein als „funktionsgerechtes Einschalten des Systems in Verbindung mit dem Prozess“ zu verstehen ist. Nach [Ever90] fällt der Inbetriebnahme die Aufgabe zu, „die montierten Produkte termingerecht in Funktionsbereitschaft zu versetzen, ihre Funktionsbereitschaft zu überprüfen und soweit sie nicht vorliegt oder nicht gesichert ist, diese herzustellen. Zur Inbetriebnahme zählen alle Tätigkeiten, die zum Ingangsetzen und zur korrekten Funktion von zuvor montierten und auf vorschriftsmäßige Montage kontrollierten Baugruppen, Maschinen und komplexen Anlagen zu zählen sind“. Weiterhin werden in dieser Projektphase die Anlagendokumentation komplettiert sowie eine Schulung bzw. die Einweisung des Betreiberpersonals vorgenommen. Zusammengefasst sieht Weber die Hauptaufgabe der Inbetriebnahme in der „Überführung der Anlage in einen vertragsmäßigen Dauerbetrieb [...], die im Regelfall mit der Abnahme der in Betrieb genommen Anlage durch den späteren Betreiber endet“ [Webe02].

Anlaufprozesse in der Praxis belegen jedoch immer wieder, dass das Anlagenbetriebsverhalten nach der Abnahme, d.h. nach der eigentlichen Inbetriebnahme, noch nicht stabil ist und die ursprünglich geplanten Leistungsparameter erst einige Zeit später nach zahlreichen Opti-

mierungsmaßnahmen erreicht werden. Aufgrund dieses typischen Charakteristikums schlägt Zeugträger vor, zwischen der Inbetriebnahme und dem so genannten Hochlauf eines Produktionssystems zu differenzieren. Demnach stellt die Inbetriebnahme die „Funktionsbereitschaft und das funktionale Zusammenwirken der zuvor montierten Einzelkomponenten her und prüft die Korrektheit der Einzelfunktionen sowie deren funktionales Zusammenwirken. In der anschließenden Hochlaufphase wird die Anlage unter ihren nominellen, personellen, organisatorischen und technischen Randbedingungen auf eine dauerhafte Nennleistung gebracht. Dabei werden im Rahmen der Optimierung und Stabilisierung des Betriebsverhaltens in organisatorischer und personeller Hinsicht auch die erst jetzt zu erkennenden technischen Unzulänglichkeiten und Frühausfälle behoben“ [Zeug98]. Diese Differenzierung bzw. die der Differenzierung zugrunde liegenden Begriffsdefinitionen sollen auch im Rahmen dieser Arbeit gelten.

Die Anlageninbetriebnahme und der anschließende -hochlauf können nach [Zeug98] wiederum unter dem umfassenden Begriff des Produktionsanlaufs zusammengefasst werden. Abbildung 2-9 veranschaulicht die einzelnen Phasen und Aufgabenumfänge des Produktionsanlaufs und stellt seine Eingliederung in die vor- bzw. nachgelagerten Bereiche dar.

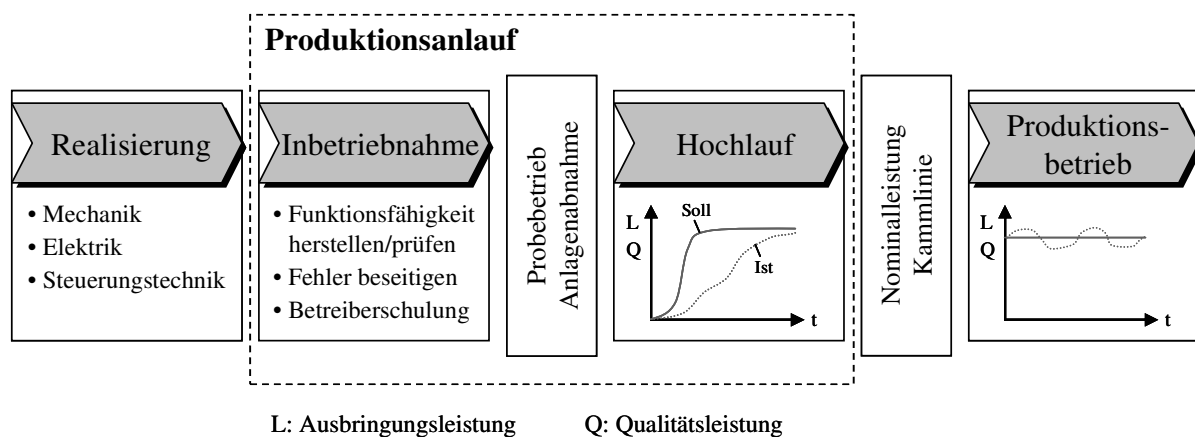


Abbildung 2-9: Phasen und Eingliederung des Produktionsanlaufs nach [WiHW02]

2.3.2 Störende Einflussgrößen auf den Produktionsanlauf

Grundsätzlich ist jeder Produktionsanlauf aufgrund seiner zentralen Stellung und seiner zunehmenden Komplexität einer Vielzahl von Störgrößen ausgesetzt. In Abhängigkeit von der Problemursache lassen sich dabei allgemein die aus dem eigentlichen Systemanlauf stammenden „internen“ Störgrößen und die im Vorfeld verursachten „externen“ Störgrößen unterscheiden. Während die internen Problemquellen vor allem auf den Einsatz neuer Technologien sowie auf die unzureichende Kompatibilität der verwendeten Subsysteme zurückzuführen sind,

resultieren die extern verursachten Störeinflüsse in erster Linie aus Versäumnissen und Fehlern vorgelagerter Projektphasen. Nach Eversheim tragen all diese auf den Produktionsanlauf einwirkenden Störeinflüsse dazu bei, dass „sich die Durchlaufzeiten in der Inbetriebnahme zu mehr als 75 Prozent aus Liege- und Wartezeiten sowie aus störungsbedingten Bearbeitungszeiten zusammensetzen“ [Ever90].

Erfahrungen und Untersuchungen zufolge sind es vor allem die in den vorgelagerten Projektphasen verursachten Fehler und Unzulänglichkeiten, die das Inbetriebnahmepersonal vor große und zeitaufwendige Probleme stellen. Nach [Webe02] sind bis zu 85 Prozent aller Inbetriebnahmeprobleme auf Mängel und Defizite aus den vorgelagerten Phasen zurückzuführen. Diese tragen wesentlich dazu bei, dass die Phase der Inbetriebnahme für bis zu 25 Prozent der Gesamtprojektdauer verantwortlich ist [ZäWü05].

In der Produktionsplanung wird der überwiegende Zeitanteil auf die Entwicklung der mechanischen Anlagenbestandteile aufgewendet. Bei der Anlageninbetriebnahme ist die Situation jedoch eine andere. Nach [ZäWü05] entfallen hierbei bis zu 90 Prozent der Gesamtzeit auf die Funktionsherstellung elektrischer und steuerungstechnischer Anlagenkomponenten sowie auf die Sicherstellung deren ordnungsgemäßen Zusammenspiels. Von diesen 90 Prozent entfallen wiederum rund zwei Drittel der Gesamtzeit auf die Suche und Behebung von Softwarefehlern (Abbildung 2-10). Im Karosserierohbau beziehen diese sich vor allem auf die anlagenbezogenen SPS-Programme bzw. auf das Zusammenspiel von Roboter- und SPS-Programmen.

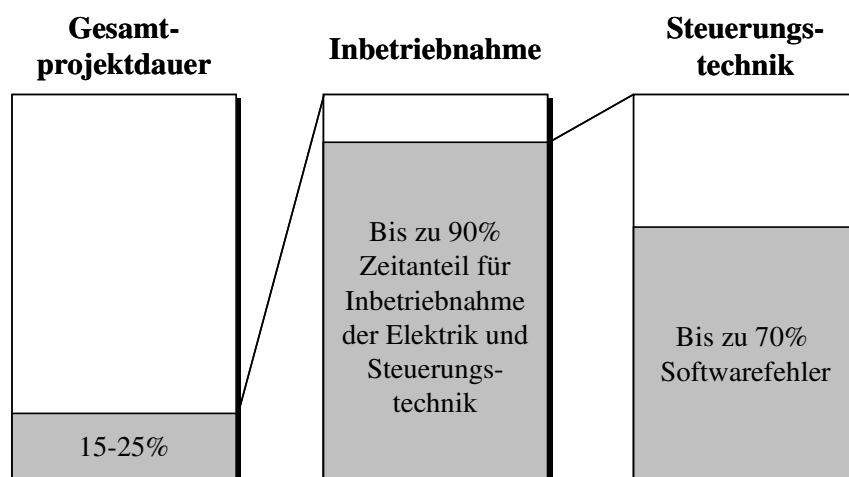


Abbildung 2-10: Bedeutung der Steuerungstechnik bei der Inbetriebnahme nach [ZäWü05]

Dieser hohe prozentuale Anteil an Softwarefehlern lässt sich vor allem dadurch erklären, dass die Softwareentwicklung im heutigen Planungsprozess keine ausreichende und hinsichtlich ihrer zunehmenden Bedeutung adäquate Berücksichtigung findet. Trotz ihres steigenden Ge-

samtfunktionsanteils an Produktionssystemen [ZäWü05] erfolgt die Softwareentwicklung im heutigen sequentiell verlaufenden Planungsprozess erst dann, wenn die Mechanik- und Elektrokonstruktion weitestgehend abgeschlossen sind. Verschärft wird diese Situation dadurch, dass die Softwareentwicklung aufgrund zunehmend kürzer werdender Planungszyklen in immer kleineren Zeitintervallen durchzuführen ist. Die Hauptursache dafür liegt in der unzureichenden Vernetzung zwischen der anlagenbezogenen Mechanikkonstruktion und der Elektro-/Steuerungsprojektierung sowie im mangelhaften Informationsaustausch beider Bereiche.

So ist es beispielsweise keine Seltenheit, dass die Mechanikkonstruktion und die Softwareentwicklung aufgrund eines unzureichenden Änderungsmanagements auf Basis unterschiedlicher Datenbestände arbeiten oder dass die erforderlichen Aufgabenspezifikationen zur SPS-Projektierung nicht vollständig vorliegen bzw. missverständlich formuliert werden. Diese Gegebenheiten führen zwangsläufig dazu, dass die Steuerungsprogramme meist erst während der Inbetriebnahme fertig gestellt und im Zusammenspiel mit den realen Anlagenkomponenten erstmals getestet werden können. Das Ergebnis dieser „Baustellenprogrammierung“ spiegelt sich aufgrund des großen Zeitdrucks zumeist in suboptimalen Softwarelösungen sowie in unzureichenden Softwaredokumentationen wider, die letzten Endes zu verzögerten Produktionsanläufen bzw. zu kostspieligen Stillstandszeiten führen. Eine Verschärfung dieser Problematik entsteht durch die Gewissheit, dass Produktionsanläufe zum einen immer häufiger und zum anderen in immer kürzeren Zeitintervallen zu bewältigen sind [WiHW02].

Neben diesen eher prozessbedingten Defiziten können weitere Störquellen heutiger Inbetriebnahmeprozesse vor allem auf das Fehlen wichtiger Anlageninformationen zur Inbetriebnahme sowie auf unzureichende Schulungsmaßnahmen des später eingesetzten Bedienpersonals zurückgeführt werden. Diese Missstände bewirken verlängerte Diagnose- und Fehlerbehebungszeiten während des Inbetriebnahmeprozesses. Studien und Untersuchungen belegen, dass das Inbetriebnahmepersonal etwa 20 Prozent ihrer Gesamtarbeitszeit mit der Suche und dem Verarbeiten von Anlageninformationen beschäftigt ist [Aßma96].

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Defizite im Produktionsanlauf verdeutlichen die aktuellen Handlungsbedarfe und zeigen wichtige Rationalisierungs- und Verbesserungspotentiale dieser Projektphase auf. Insbesondere vor dem Hintergrund zunehmend komplexer werdender Anlaufprozesse darf das Auffinden und Beheben planungsbedingter Fehler nicht länger eine zentrale, zeitintensive Aufgabe der Inbetriebnahme darstellen. Vielmehr muss das Ziel darin bestehen, diese zeit- und kostspieligen Probleme direkt an ihrer Quelle anzupacken und diese durch neue, innovative Planungsstrategien – insbesondere an der Schnittstelle zwischen der

Mechanikkonstruktion und der Elektro-/Steuerungsprojektierung – von vornherein zu vermeiden. Verbesserte Planungsprozesse legen nicht nur den Grundstein für die Durchführung beschleunigter Produktionsanläufe. Sie wirken sich außerdem langfristig positiv auf die produktionsbezogene Güte und somit auf die wirtschaftliche Gesamtrentabilität aus.

2.3.3 Wiederanläufe nach Integrationsprozessen

Allgemein müssen Produktionsanläufe hinsichtlich des Zeitpunktes ihrer Durchführungen unterschieden werden. So ist zwischen der Erstinbetriebnahme, deren Ausprägungen den Fokus des vorangegangenen Abschnitts bildeten, und der Wiederinbetriebnahme einer Produktionsanlage zu differenzieren. Im Gegensatz zur Erstinbetriebnahme kann eine Wiederinbetriebnahme nach [Webe02] als die „Überführung der Anlage aus dem Ruhezustand nach deren Abstellung (Stillstand) in den Dauerbetriebszustand“ verstanden werden. Dabei können Wiederinbetriebnahmen verschiedene Ursachen zugrunde liegen. Diese beziehen sich beispielsweise auf produktionsbegleitende Optimierungsmaßnahmen, auf regelmäßig durchzuführende Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten sowie auf Integrationsprozesse neuer Produkte und Fahrzeugkomponenten in die bereits bestehenden Fertigungssysteme. All diese Aktivitäten werden in der Praxis häufig unter dem Begriff der produktionsbezogenen Serienbetreuung zusammengefasst.

Voraussetzung für die Durchführung von Integrationsprozessen sind flexible, adaptive Anlagenkomponenten, die in so genannten „Retooling-Prozessen“ an die veränderten Randbedingungen angepasst werden [Scho06, Schä06]. Da die betroffenen Produktionssysteme hierzu aus dem laufenden Produktionsbetrieb herausgenommen werden müssen, steht den Anlagenbetreibern zur Bewerkstelligung dieser Umrüstarbeiten nur sehr wenig Zeit zur Verfügung. In dieser Zeit müssen die mechanischen, elektrischen und steuerungstechnischen Anlagenanpassungen vollzogen, ihr Zusammenspiel getestet, der unter Nennleistung stattfindende Dauerbetrieb sichergestellt sowie die durchgeführten Änderungen dokumentiert werden.

Untersuchungen zeigen jedoch immer wieder, dass die in der Praxis durchgeführten Wiederanläufe von dieser beschriebenen Vorgehensweise in aller Regel differieren. Beispiele hierfür sind die zumeist nur unvollständig bzw. nicht dokumentierten Anlagenänderungen sowie die nur sehr eingeschränkt getesteten modifizierten Steuerungsprogramme.

3 Lösungen und Defizite der Digitalen Fabrik

Um den im Vorfeld beschriebenen Herausforderungen in der Produktionsplanung und im Produktionsanlauf erfolgreich zu begegnen, wurden in den letzten Jahren zahlreiche Lösungen entwickelt, die unter dem Begriff der „Digitalen Fabrik“ zunehmenden Einzug in die industrielle Praxis genommen haben. In diesem Kapitel wird der derzeitige Umsetzungsstand dieser „Digitalen Fabrik“ in Form existierender Methoden und Softwarelösungen kritisch beleuchtet. Ausgehend davon werden die gegenwärtigen Defizite identifiziert und die daraus abgeleiteten Handlungsfelder zusammengetragen.

3.1 Begriffsdefinition und Anwendungsbereiche

Obwohl die Digitale Fabrik gerade in der Automobilindustrie als eines der „zentralen Innovationsthemen“ gesehen wird [HaRi02], existiert bis heute noch keine Einigkeit über ihre exakte Definition und ihre genauen Inhalte. Aus diesem Grund werden in einem ersten Schritt die im wissenschaftlichen und industriellen Umfeld vorzufindenden Auffassungen der Digitalen Fabrik einander gegenübergestellt und diskutiert. Basierend auf diesen größtenteils divergenten Begriffsauffassungen wird schließlich eine Definition abgeleitet, die dem Verständnis dieser Arbeit zugrunde liegt.

Westkämper et al. verstehen die Digitale Fabrik als „Abbild der realen Fabrik in einem digitalen Modell, welches die Strukturen und Fertigungsprozesse visualisiert, simuliert und somit erlebbar macht“ [WeBK03]. Eine ähnliche Begriffsauffassung haben neben Wiendahl et al., die die Digitale Fabrik als ein „visualisiertes und betreibbares Modell einer konkreten Fabrik mit sämtlichen Elementen und Prozessen“ verstehen [WiHH02], auch Dombrowski et al.. Sie definieren die Digitale Fabrik als die „rechnergestützte Abbildung aller Gestaltungsmerkmale und Prozesse der Fabrik und als virtuell zu betreibendes Modell unter Verwendung realer Daten oder Planungsdaten“ [DoTB01]. Diese Autoren sehen in der Digitalen Fabrik also in erster Linie ein digitales Fabrikmodell, welches mit Hilfe der Simulationstechnik die einzelnen Fabrikprozesse visualisiert und somit „erlebbar“ macht. Allgemein ist unter einem Modell eine „vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System“ zu verstehen [VDI3633a]. Simulation bedeutet nach [VDI3633a] das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die

Wirklichkeit übertragbar sind“. Analog zu diesen wissenschaftlichen Auffassungen wird der Digitalen Fabrik auch von einigen Industrievertretern in erster Linie ein Modellcharakter zugesprochen. So definiert Haller die Digitale Fabrik als „virtuelles Abbild der realen Fabrik auf Basis eines integrierten Datenmodells“ [Hall01]. Nach [Schi02] stellt die Digitale Fabrik das „Pendant zum Digitalen Fahrzeug dar. Genauso wie ein CAD-Modell das Fahrzeug in all seinen Bestandteilen digital darstellt, beschreibt die Digitale Fabrik die spätere Fabrik in all ihren Komponenten samt deren Zusammenspiel“.

Eine etwas andere Bedeutung hat die Digitale Fabrik hingegen für Linner et al.. Sie verstehen darunter eine „integrierte rechnerunterstützte Umgebung für Design, Simulation und Optimierung der Produktion und Logistik einer gesamten Fabrik“ [LiGW99]. Auch Bracht et al. sprechen der Digitalen Fabrik vor allem einen Werkzeugcharakter zu. Demnach „verknüpft sie die Produktdaten der Entwicklung mit den Planungsdaten und stellt Werkzeuge zur Modellierung und Planung von Fertigungskonzepten und Simulationsmethoden zur Verfügung“ [BrEM05]. Nach [BlFr01a] werden im Rahmen der Digitalen Fabrik „Simulationswerkzeuge in der Produktionsplanung über die verschiedenen Unternehmensebenen hinweg verknüpft [...], so dass durch gemeinsame Datennutzung Synergieeffekte zwischen den einzelnen Anwendungsbereichen entstehen“. Neben den IT-Werkzeugen sehen Gerhard et al. zudem die Organisation und die Mitarbeiter als Teil der Digitalen Fabrik [GeLa01]. Demnach kann die Digitale Fabrik als „Gesamtheit der Mitarbeiter, informationstechnischen Werkzeuge und Engineering-Prozesse, die zur Erstellung der virtuellen und realen Produktion notwendig sind“ verstanden werden.

Insgesamt lassen sich somit mindestens zwei unterschiedliche Auffassungen des Begriffs der Digitalen Fabrik feststellen, wobei diese in enger Wechselwirkung miteinander stehen. Während für die einen die Digitale Fabrik das fertige Modell mehr oder weniger großer Umfänge einer realen Fabrik darstellt, verstehen sie die anderen eher als IT-Werkzeug, um eben dieses Modell – unter Berücksichtigung organisatorischer Gegebenheiten – zu erzeugen.

Neben dem Modell-, Werkzeug- und Organisationscharakter beinhaltet die Digitale Fabrik jedoch noch zwei weitere Aspekte, die insbesondere in der VDI-Richtlinie 4499 zum Ausdruck kommen [VDI4499]. Demnach ist die Digitale Fabrik der „Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und der 3D-Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt“. Auf der einen Seite wird in dieser Definition der Begriff der Methode als ein wesentlicher Inhalt

der Digitalen Fabrik herausgearbeitet. Allgemein bezeichnet eine Methode ein „planmäßiges Vorgehen zum Erreichen eines bestimmten Ziels“ [VDI2223], das darauf abzielt, „ein gutes Verhältnis von Ergebnisqualität und Projektaufwand zu gewährleisten“ [VDI4499]. Auf der anderen Seite wird die Wichtigkeit eines durchgängigen Datenmanagements betont. Nach den Auffassungen von Bracht und Bär et al. bildet das Datenmanagement sogar den Kern der Digitalen Fabrik und spielt zur Realisierung einer durchgängigen digitalen Prozesskette eine entscheidende Rolle [Brac02, BKSB05]. Allgemein dienen Datenmanagementsysteme dazu, „Informationen über Produkte und deren Entstehungsprozesse bzw. Lebenszyklen zusammenzuführen, konsistent zu speichern, zu verwalten und für alle relevanten Bereiche eines Unternehmens transparent zu machen. Sie stellen damit eine Integrationsplattform für die verschiedenen CAx-Systeme und eine Verbindung zu anderen IT-Systemen dar“ [VDI2219]. Die zentrale Bedeutung von Methoden und organisatorischen Aspekten im Kontext der Digitalen Fabrik werden auch von Reinfelder et al. unterstrichen. Demnach werden „etwa 20 Prozent des Fortschritts durch neue Softwarelösungen erreicht, wohingegen etwa 80 Prozent durch veränderte Arbeitsabläufe und Denkweisen der Mitarbeiter bestimmt werden“ [ReKo02].

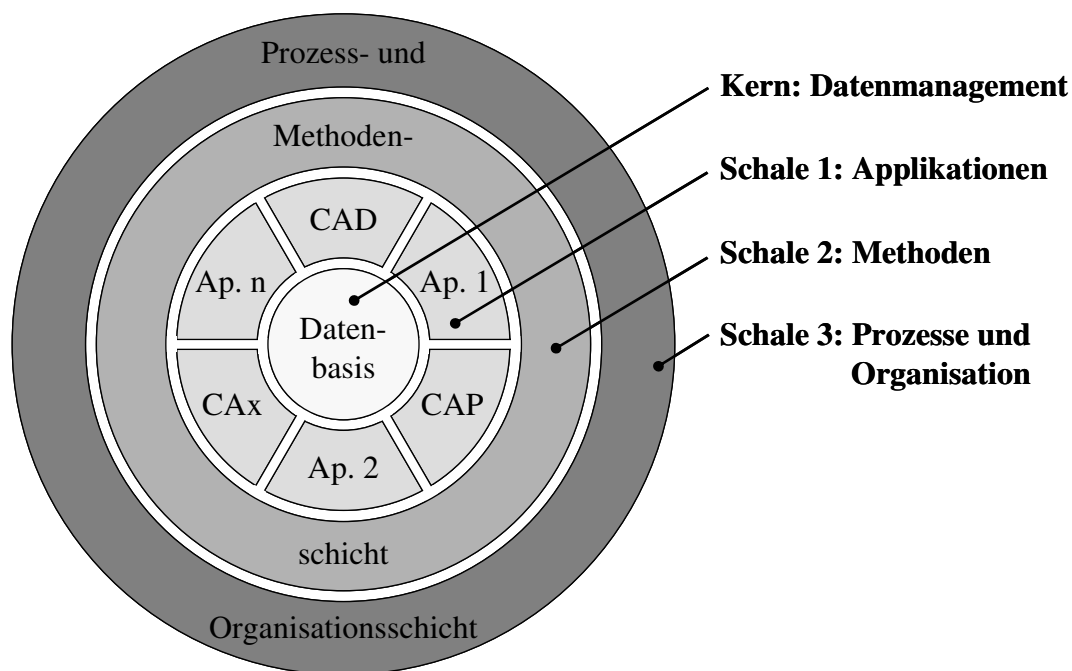


Abbildung 3-1: Die Digitale Fabrik als Schalenmodell

Die Diskussion über den Begriff der Digitalen Fabrik zeigt deutlich, dass diese weder als isoliert zu betrachtendes Modell, noch als reines Softwarewerkzeug, noch als ein Netzwerk von Methoden oder als ein rein organisatorisches Thema angesehen werden darf. Vielmehr stehen all diese unterschiedlichen Facetten in einem direkten Zusammenhang zueinander und müssen

daher auch ganzheitlich betrachtet werden. Denn nur durch ein optimal abgestimmtes Zusammenspiel dieser einzelnen Aspekte lassen sich nach [BKSB05] die mit der Einführung der Digitalen Fabrik zu realisierenden Nutzenpotentiale in ihrem vollen Umfang erschließen. Abbildung 3-1 verdeutlicht diesen Sachverhalt und stellt die unterschiedlichen Aspekte der Digitalen Fabrik zusammenfassend in Form eines Schalenmodells dar.

Weitestgehende Einigkeit herrscht jedoch über den Anwendungsbereich der Digitalen Fabrik. Nach [VDI4499] „stellt die Produktionsplanung mit all ihren Planungsphasen das Hauptanwendungsgebiet der Digitalen Fabrik dar“. In dieser Phase wird die Digitale Fabrik dazu eingesetzt, „[...] die Funktionsweise der Produktion zu erproben und zu verbessern, bevor Investitionsentscheidungen getroffen werden. Der Umfang reicht dabei von der Planung einer einzelnen Maschine über die Umplanung von Teilbereichen der Produktion bis zur Erstellung eines neuen Werks“ [VDI4499]. Nach [ReGR99] reichen die Anwendungen der Digitalen Fabrik „von der Fabrik- über die Linien-, Zellen- und Maschinenebene bis hin zum technologischen Prozess. Ein wesentliches Ziel der Digitalen Fabrik besteht dabei darin, diese einzelnen Betrachtungsebenen miteinander zu vernetzen und simulativ abzusichern“.

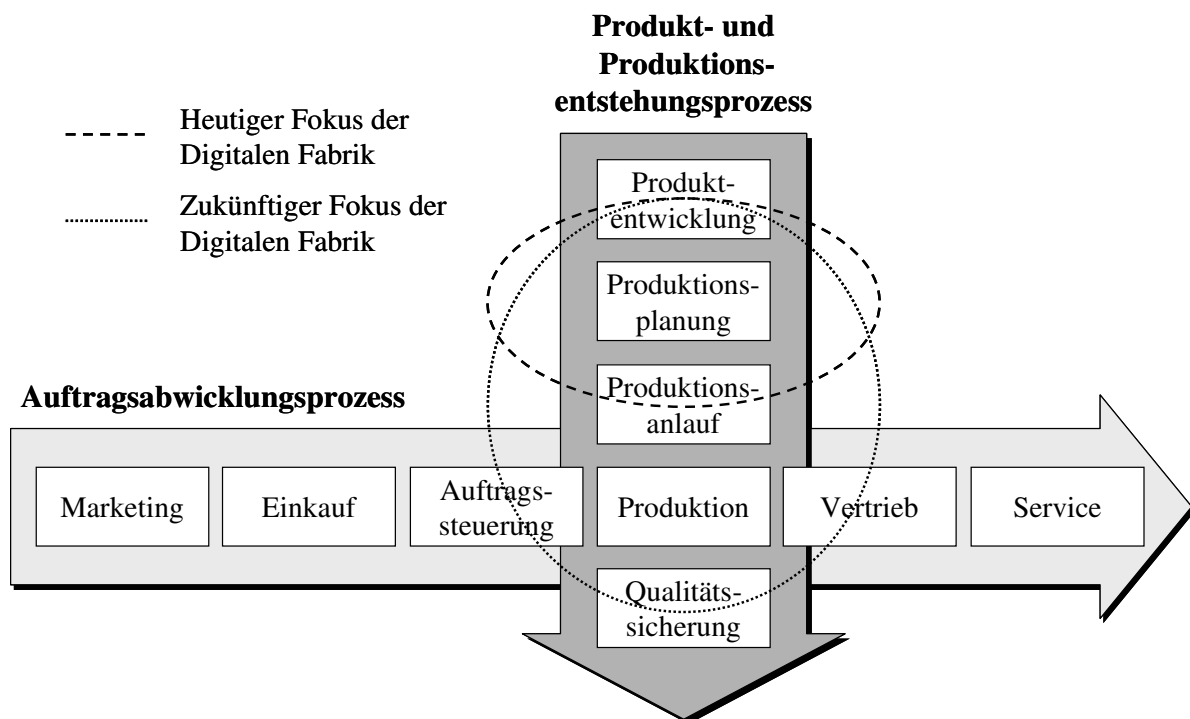


Abbildung 3-2: Fokus der Digitalen Fabrik nach [VDI4499]

Bezüglich ihres Anwendungsbereichs ist derzeit eine lebenszyklusbezogene Ausweitung der Digitalen Fabrik erkennbar. Wurde sie ursprünglich dazu entwickelt, die „Lücke“ bezogen auf die IT-Unterstützung zwischen Produktentwicklung (CAD) und Produktion (SPS/RC/NC) zu

schließen [LiGW99], werden ihre Anwendungen in zunehmenden Maße auch zur Unterstützung des Produktionsanlaufs bzw. zur produktionsbegleitenden Serienbetreuung herangezogen [ZVWM04, Saue05]. In diesem Zusammenhang halten die beiden Fachbereiche der Elektro- und Steuerungstechnik zunehmenden Einzug in die bis dato eher „mechanikorientierten“ Anwendungen der Digitalen Fabrik. Abbildung 3-2 verdeutlicht den derzeitigen Fokus der Digitalen Fabrik im Strahlenkreuz der Unternehmensprozesse und skizziert darüber hinaus ihre zukünftige Ausweitung zur Unterstützung des Produktionsanlaufs und der produktionsbegleitenden Serienbetreuung.

Auf Basis der in diesem Abschnitt diskutierten unterschiedlichen Auffassungen und Anwendungsbereiche der Digitalen Fabrik soll diese – in Anlehnung an die in [VDI4499] publizierte Begriffsdefinition – im Rahmen dieser Arbeit wie folgt verstanden werden:

Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden, Werkzeugen und Prozessen, die auf Basis eines integrierten Datenmanagements zur durchgängigen digitalen Planung, Simulation und Validierung von Produktionsprozessen und -systemen benötigt werden. Ihr Anwendungsbereich erstreckt sich dabei über alle Phasen des Produktionsentstehungsprozesses, wobei sämtliche Ebenen einer produzierenden Fabrik bzw. ihre individuellen Wechselwirkungen im Mittelpunkt der Betrachtung stehen.

3.2 Ziele und Nutzen der Digitalen Fabrik

Im Gegensatz zu dem differenziert zu betrachtenden Begriff der Digitalen Fabrik herrscht sowohl im wissenschaftlichen als auch im industriellen Umfeld große Einigkeit bzgl. der Ziele und der mit dem Einsatz der Digitalen Fabrik zu erschließenden Nutzenpotentiale. So verfolgt beispielsweise die Audi AG durch die Nutzung und Weiterentwicklung digitaler Planungsmethoden und -werkzeuge die Zielsetzung, „mehr Produkte in kürzerer Zeit zu geringeren Kosten und in einer höheren Qualität auf den Markt zu bringen“ [Chac04].

Die gleiche Absicht – jedoch mit einem stärkeren Fokus auf die Lebenszyklusphase der Produktionsplanung – haben auch andere Vertreter der Automobilindustrie. Neben der Reduzierung der Planungskosten werden hier vor allem die Reduzierung der Planungszeiten sowie die Steigerung der Planungsqualität als die wichtigsten mit der Einführung der Digitalen Fabrik einhergehenden Ziele benannt [BIFZ06]. Da die Digitale Fabrik jedoch als „Bindeglied und Integrator zwischen Produktentwicklung, Planung und Produktion“ fungiert [BrEM05], sind ihre weit reichenden Nutzenpotentiale nicht nur auf die Projektphase der Produktionsplanung

beschränkt. So lässt sich beispielsweise durch die Möglichkeiten der frühzeitigen Produktbeeinflussung die Produktqualität bei beschleunigten Entwicklungszeiten deutlich erhöhen bzw. die Phase des Produktionsanlaufs durch optimierte und abgesicherte Planungsprozesse signifikant beschleunigen. Der durch den Einsatz digitaler Planungsmethoden und -werkzeuge zu realisierende Zeitgewinn, der letzten Endes direkte Auswirkungen auf den Markteintritt (Time-to-Market) neuer Produkte hat, kann in qualitativer Form Abbildung 3-3 entnommen werden.

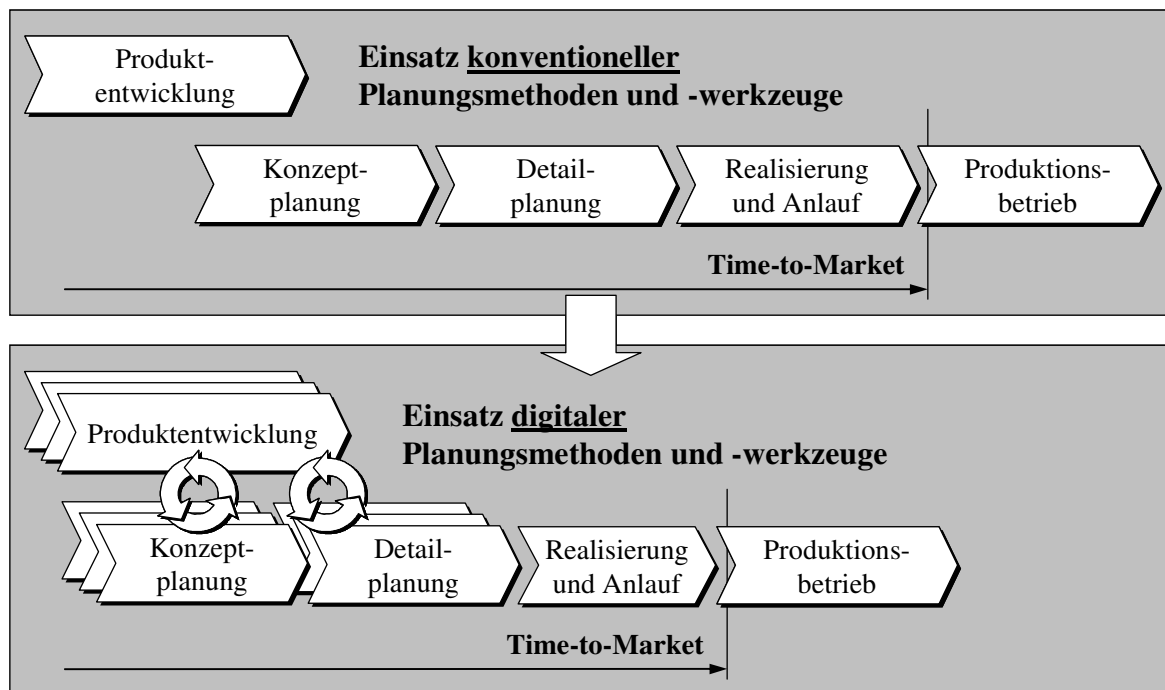


Abbildung 3-3: Ziel der Digitalen Fabrik: Beschleunigte Planungs- und Anlaufprozesse

Der qualitative Nutzen der Digitalen Fabrik ist nach einstimmiger Meinung unumstritten. Bezüglich ihrer Quantifizierbarkeit werden in den Medien eine Reihe unterschiedlicher Zahlen präsentiert, die jedoch alle aufgrund nicht-existenter Vergleichsmaßstäbe zwischen konventionell und digital geplanten Referenzprojekten mit Vorsicht zu betrachten sind. Diese Angaben basieren meist auf Schätzwerten und Pauschalaussagen, die im Rahmen von Befragungen ermittelt werden. Nach [HaRi02] wird durch den Einsatz der Digitalen Fabrik beispielsweise eine „Zeitersparnis von bis zu 30 Prozent, eine projektbezogene Kostensenkung von 15 Prozent und eine Erhöhung des Produkt- und Anlagenreifegrads von 5-10 Prozent“ prognostiziert. Die bezifferte Zeitersparnis bezieht sich dabei vor allem auf die Lebenszyklusphasen der Produktionsplanung und des Produktionsanlaufs. Der Automobilkonzern DaimlerChrysler geht sogar von einer Verringerung der „Produktionsplanungszeit um bis zu 40 Prozent bei einer gleichzeitigen Steigerung der Planungsqualität aus, [...] wobei kürzere Entwicklungs- und Produktionsplanungszeiten wiederum geringere Gesamtkosten zur Folge haben“ [Schi02].

Zur Erschließung dieser Nutzenpotentiale konnten im Rahmen der Digitalen Fabrik bereits einige methodische und softwaretechnische Lösungen entwickelt und in die Praxis transferiert werden. Diese lassen sich in den folgenden Themenkomplexen zusammenfassen:

Simultaneous Engineering von Produktentwicklung und Produktionsplanung

Wie in Abbildung 3-3 dargestellt, unterstützt die Digitale Fabrik ein paralleles und vernetztes Zusammenarbeiten von Produktentwicklung und Produktionsplanung im Sinne eines Simultaneous Engineering (SE). Nach [EvSc05] bezeichnet Simultaneous Engineering allgemein „die integrierte und zeitlich parallele Produkt- und Prozessgestaltung mit dem Ziel, Markteintritte zu verkürzen, die Entwicklungs- und Herstellkosten zu reduzieren und die Produktqualität im umfassenden Sinn zu verbessern“. Im Rahmen der Digitalen Fabrik wird die „integrierte Produkt- und Prozessgestaltung“ dahingehend ermöglicht, dass der Konstrukteur bzw. der Planer bereits während der Entwicklungsphase das Produkt mit Hilfe entsprechender IT-Werkzeuge auf Produktionsgerechtigkeit prüfen und optimieren kann. Im wissenschaftlichen Umfeld wird dieser produktionsorientierte Produktabsicherungsprozess häufig als „Design for Manufacturing“ (DFM) [Whit04] bzw. als „Produktionsgerechte Produktgestaltung“ (PPG) bezeichnet. Da Herstellkosten mit etwa 60 Prozent durch bestimmte Produkteigenschaften festgelegt werden [EvBL95], können mit Hilfe des „DFM-Ansatzes“ teure Änderungskosten minimiert und somit erhebliche Einsparpotentiale bezogen auf den Gesamtprozess erschlossen werden.

Des Weiteren können die Produktionsplaner durch die vernetzte Zusammenarbeit mit der Produktentwicklung bereits sehr viel früher als bisher mit der Planung und Entwicklung der Produktionseinrichtungen beginnen. Dieses Simultaneous Engineering stellt somit eine wichtige Basis zur Realisierung beschleunigter Markteintritte dar (Abbildung 3-3).

Durchgängiges Datenmanagement zur Datenintegration und -transparenz

Die Haupttätigkeit eines Planungsingenieurs besteht heute in der Beschaffung und Suche von Informationen, die er zur Durchführung seiner Arbeit benötigt. Die dafür benötigte Zeit wird sogar auf bis zu 70 Prozent seiner Gesamtarbeitszeit geschätzt [BIFZ06]. Durch den Einsatz von Datenmanagementsystemen können Planungsinformationen hingegen strukturiert und redundanzfrei abgelegt und verwaltet sowie anderen Fachbereichen zugunsten einer Effizienzsteigerung transparent und stets aktuell zur Verfügung gestellt werden.

Im aktuellen Entwicklungsstadium der Digitalen Fabrik muss beim Datenmanagement allerdings zwischen Geometrie- und Prozessdaten unterschieden werden. Während die im Rahmen

der Digitalen Fabrik eingesetzten Planungsdatenbanken Prozessdaten verwalten, werden Geometriedaten aus Produktdatenmanagement-Systemen (PDM-Systemen) exportiert und für den Online-Zugriff auf Fileservern bereitgestellt. Zudem ist ein verlustfreier Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Entwicklungs- und Planungswerkzeugen bis dato – wenn überhaupt – nur möglich, wenn diese CAx-Applikationen vom gleichen Systemlieferanten stammen. Dies entspricht im Regelfall jedoch nicht der realen Situation in Unternehmen.

Zur Lösung dieses Problems werden gegenwärtig eine Reihe unterschiedlicher Ideen verfolgt und vorangetrieben. Diese lassen sich jedoch auf zwei Hauptansätze reduzieren. Auf der einen Seite versuchen Vertreter aus Industrie und Wissenschaft, das Problem des Datenaustauschs zwischen heterogenen, nicht kompatiblen IT-Systemen mit der Entwicklung eines neutralen Schnittstellenformats – wie beispielsweise IDA-STEP – zu lösen [ZwBa05]. Auf der anderen Seite wird versucht, mit Hilfe einer Integrationsarchitektur bzw. einer „virtuellen Datenbank“ den Datenaustausch zwischen IT-Werkzeugen unterschiedlicher Hersteller zu realisieren. Beispiele hierfür stellen der basierend auf den Ergebnissen des BMBF-Projekts PROSERV (Projekt Information On-Line für den Service) entwickelte „KUKA InfoBus“ [Fedr04] sowie das im BMBF-Projekt MODALE (Modellbasiertes Anlagenengineering) entwickelte Konzept zur „ontologiebasierten Informationsintegration“ [ScKB05] dar.

Automatismen zur Unterstützung von Routinetätigkeiten

Nach der Auffassung von Sauer besteht ein wesentlicher Nutzen der Digitalen Fabrik darin, den „Planungsprozess zu beschleunigen, indem den Planern Routinetätigkeiten abgenommen werden“ [Saue04]. Menges geht sogar davon aus, dass bei einer konsequenten Umsetzung der Digitalen Fabrik bis zu 80 Prozent der Planungsumfänge automatisch erstellt werden können [Meng05]. Betrachtet man jedoch den heutigen Umsetzungsstand der Digitalen Fabrik bzw. die heutigen Softwarelösungen, so scheint die von Menges publizierte Zahl von 80 Prozent als deutlich zu hoch angesetzt. Dennoch wurden in den letzten Jahren viel versprechende Automatismen entwickelt, die den Planer bei seiner Arbeit unterstützen und somit einen wichtigen Beitrag zur Effizienzsteigerung in der Produktionsplanung leisten. So können beispielsweise auf Basis einer fertigungsorientierten Konstruktionsstückliste (MBOM) sowohl die Fügefolge als auch die zum Fügen der einzelnen Bauteile notwendigen Ressourcen automatisiert abgeleitet werden [EiBr05]. Zudem lassen sich auf Basis vorkonfigurierter Prozess- und Ressourcenelemente betriebswirtschaftliche Kalkulationen automatisiert durchführen bzw. können die in der Prozessplanung festgelegten statischen Prozessmodelle zur Erstellung von Simulations-

modellen herangezogen werden [BHZB02]. Als sehr viel versprechend ist in diesem Zusammenhang auch die „Feature-Technologie“ [VDI2218] bzw. die Verwendung von „Skelettmodellen“ [BlBo06] zu bewerten, deren Lösungen zunehmenden Einzug in die operative Praxis halten.

Höhere Planungseffektivität durch den Einsatz vordefinierter Standards

Eine wesentliche Effizienzsteigerung kann in der Produktionsplanung durch die Verwendung einheitlicher, projektübergreifender Standards erzielt werden. Die Digitale Fabrik unterstützt diese Standardisierungsbestrebungen in sämtlichen Planungsphasen bzw. in unterschiedlichen Zusammenhängen. Beispiele hierfür sind die Verwendung vorkonfigurierter Standardmodule zur schnellen und effektiven Generierung und Bewertung unterschiedlicher Planungsvarianten und Anlagenkonzepte sowie der Einsatz standardisierter Betriebsmittel zur detaillierten Produktionsgestaltung. Aufgrund des erkannten Einsparpotentials laufen derzeit in vielen Unternehmen – vor allem im Bereich des Anlagenbaus – eine Vielzahl unterschiedlicher Standardisierungsprojekte. In diesem Zusammenhang konnte beispielsweise beim Automobilkonzern DaimlerChrysler die Anzahl an Schweißzangenvarianten in den vergangenen Jahren um mehr als 50 Prozent verringert werden.

Neben diesen eher ressourcenorientierten Standardisierungsbestrebungen besteht ein weiteres Ziel vieler Unternehmen darin, die Planungsprozesse selbst zu standardisieren, um somit die Wiederverwendbarkeit von Planungsergebnissen zu erhöhen und den Wissenserhalt im Unternehmen sicherzustellen. Dazu werden so genannte „Best-Practice-Lösungen“ entwickelt, die als verbindlicher Standard den Planer bei der Durchführung seiner Tätigkeiten unterstützen. Neben dem eigentlichen Planungsablauf beinhalten diese bereichsbezogenen „Best-Practice-Lösungen“ meist die zur Durchführung der einzelnen Planungsschritte benötigten Methoden, Werkzeuge und Modelle. Diese werden den jeweiligen Planern in Form so genannter „Methodenhandbücher“, „Planungsworkflows“ oder „Modellierungsleitfäden“ zur Verfügung gestellt [Kief03, WeBK03, Blum06].

Neben den hier aufgezeigten Lösungen bzw. Lösungsansätzen der Digitalen Fabrik werden im folgenden Abschnitt die unterschiedlichen heute existierenden Visualisierungs- und Simulationmethoden vorgestellt und kritisch beleuchtet. Da diese Methoden in „horizontaler“ Ebene über alle produktionsbezogenen Lebenszyklusphasen bzw. in „vertikaler“ Ebene über alle Fabrikebenen hinweg Verwendung finden, ist eine Fokussierung ihrer weit reichenden Anwendungen unumgänglich. So wird im Rahmen dieser Arbeit der Fokus auf die im Rohbau einge-

setzten Simulationsverfahren auf Zellenebene gelegt, ohne jedoch ihre individuellen Wechselwirkungen zu den Simulationsanwendungen anderer Fabrikebenen völlig auszuklammern.

3.3 Bestehende Visualisierungs- und Simulationsmethoden

Wie aus den meisten im Kapitel 3.1 vorgestellten Begriffsdefinitionen zu entnehmen ist, stellt die Visualisierungs- und Simulationstechnik einen zentralen Bestandteil der Digitalen Fabrik dar. Ein Beispiel hierfür wird in [VDI4499] gegeben. Nach [Meng05] werden im Rahmen der Digitalen Fabrik „Fertigungsprozesse simuliert und perfektioniert, noch bevor der erste Euro in ein reales Produktionsmittel investiert wird“. Dadurch lassen sich insbesondere kostspielige Änderungsschleifen bezogen auf den Gesamtprozess minimieren. Neben dem Ziel der Absicherung und „Perfektionierung“ von Produktionsprozessen und -systemen finden Visualisierungs- und Simulationsverfahren darüber hinaus zur Verbesserung des Kommunikationsprozesses während der Produktionsplanung gewinnbringenden Einsatz.

Die folgenden Abschnitte widmen sich den zur digitalen Zellenplanung und -absicherung einsetzbaren Visualisierungs- und Simulationsmethoden im Bereich Karosserierohrbau. In diesem Zusammenhang wird ein besonderer Schwerpunkt auf die „maschinennahen Simulationstechniken“ gelegt.

3.3.1 Visualisierungs- und Simulationsmethoden auf Zellenebene

Wie bereits angesprochen, besteht ein vorrangiges Ziel der Digitalen Fabrik darin, die „Simulationstechnologien in der Produktionsplanung über die verschiedenen Unternehmensebenen hinweg einzusetzen und miteinander zu verknüpfen, so dass durch die gemeinsame Datennutzung Synergieeffekte zwischen den einzelnen Anwendungsbereichen entstehen“ [Fran03]. In Anlehnung an [BIFr01b, KiMB06, Wutt00] lassen sich die zur Produktionsplanung und -absicherung einsetzbaren Simulationsmethoden hinsichtlich der Abstraktionsebene, des Planungsinhalts, der Simulationsgebiete und der assoziierten Prozessdaten untergliedern.

Wie Tabelle 3-1 zu entnehmen ist, werden auf der Unternehmens- bzw. Fabrikebene schwerpunktmäßig Geschäftsprozesse simuliert und analysiert, auf deren Basis Rückschlüsse auf die unternehmensübergreifenden bzw. fabrikbezogenen Abläufe zu ziehen sind. Als Eingangsdaten werden hierfür beispielsweise Prozesskosten und Durchlaufzeiten benötigt, die wiederum auf Basis von Ablaufsimulationen auf Werke- bzw. Linienebene gewonnen werden. Die Ergebnisse dieser Ablaufsimulationen dienen – abhängig vom betrachteten Planungszeitpunkt – jedoch nicht nur als Eingangsdaten für Geschäftsprozesssimulationen. Insbesondere in frühen

Phasen werden ausgehend von ersten Materialflussuntersuchungen ebenso Eingangsparameter (z.B. maximale Taktzeiten) in Form von Soll-Vorgaben für die Zellenplanung abgeleitet.

Abstraktions- ebene	Planungsinhalt	Simulations- gebiet	Assoziierte Prozessdaten
Unternehmen / Fabrik	• Geschäftsprozesse • Informationsfluss • Aufträge (PPS)	Geschäftsprozess- simulation	• Durchlaufzeiten • Prozesskosten • Ressourcen
Gewerk / Linie	• Layout • Material-/Inform.fluss • Steuerungsstrategien • Arbeitsorganisation	Ablaufsimulation	• Arbeitspläne • Prozesszeiten • Verfügbarkeiten
Zelle	• Zellenlayout • Arbeitsvorgangsfolge • RC-/SPS-Programm. • Taktzeitoptimierung • Kollisionsvermeidung	3D-orientierte Kinematik- und Verhaltens- simulation	• Produktdaten • Ressourcendaten • Prozessparameter • Fügefolge
Komponente / Technolog. Prozess	• Operationen • Prozessparameter • Werkzeuge • Hilfsmittel	Mehrkörper- simulation / Finite-Elemente- Simulation	• Materialdaten • Produktfunktionen • Grobe Geometrie

Tabelle 3-1: Simulationsmethoden und ihre Anwendungsgebiete

Umgekehrt dienen die zellenbezogenen Kinematik- und Verhaltenssimulationen u. a. der Ermittlung genauer Taktzeiten, die dann wiederum in späteren Planungsphasen für detailliertere Linien- und Gewerkesimulationen herangezogen werden. An diesem Beispiel lässt sich deutlich erkennen, dass die einzelnen Simulationstechniken keinesfalls als isolierte Insellösungen betrachtet werden dürfen. Vielmehr stehen diese in ständiger Wechselwirkung zueinander. Im Rahmen der digitalen Planung werden daher die in den einzelnen Abstraktionsebenen genutzten Simulationsmodelle mehrfach iterativ verbessert und aufeinander abgestimmt. Auf der untersten Abstraktionsebene werden schließlich technologische Prozesse in enger Verzahnung mit den zellenorientierten 3D-Simulationen simuliert, auf deren Basis sich physikalische Vorgänge (z.B. Fügeprozesse) analysieren und optimieren lassen.

Da die Entwicklung einer neuen Planungslösung für automatisierte Rohbau-Fertigungszellen den Fokus dieser Arbeit darstellt, werden folgend die dort einsetzbaren Visualisierungs- und Simulationsmethoden vorgestellt und ihre wichtigsten Ausprägungen erläutert. Grundsätzlich liegt der Schwerpunkt zellenbezogener Simulationsverfahren in der Erstellung und Absicherung dreidimensionaler volumenorientierter Modelle, deren Freiheitsgrade über kinematische

Beziehungen festgelegt werden [Fran03]. Ein Überblick über die auf der Zellenebene einsetzbaren Visualisierungs- und Simulationsmethoden ist in Abbildung 3-4 gegeben.

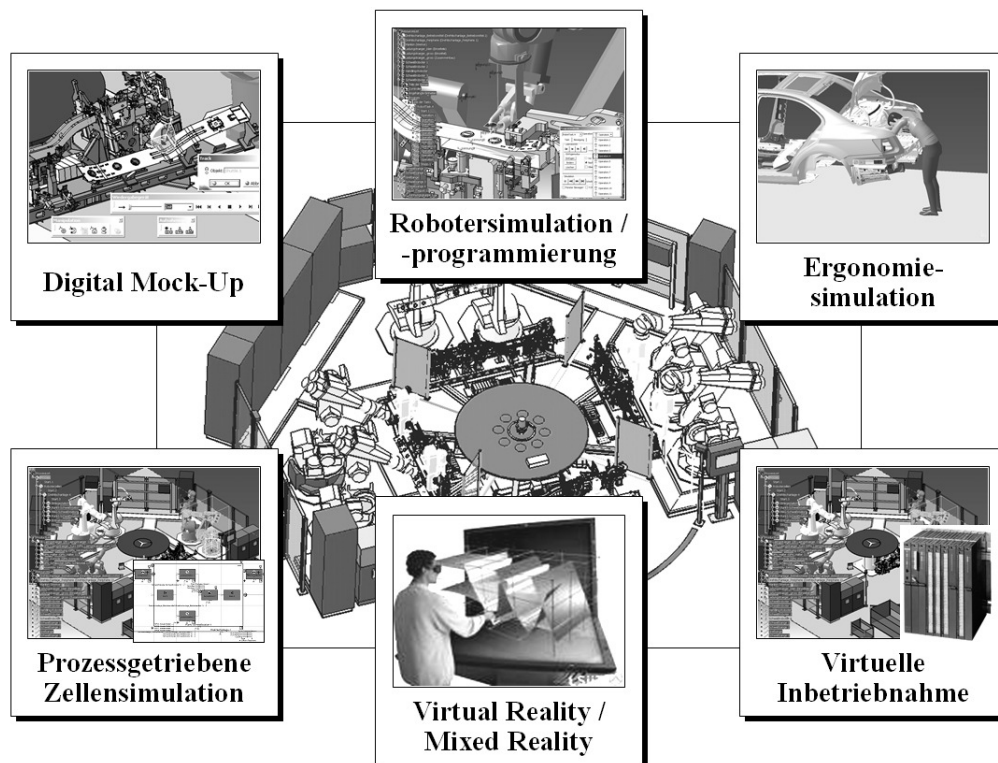


Abbildung 3-4: 3D-orientierte Visualisierungs- und Simulationsmethoden auf Zellenebene

Digital Mock-Up (DMU)

Allgemein bezeichnet Digital Mock-Up einen „virtuellen Zusammenbau von Baugruppen mit Hilfe eines CAD-Systems mit dem Ziel, diesen Zusammenbau zu Funktions- und Einbauuntersuchungen zu nutzen“ [DIN199]. Historisch begründet wird diese Simulationsmethode vorwiegend in der Produktentwicklung eingesetzt. Das vorrangige Ziel liegt dabei im frühzeitigen Erkennen und Vermeiden kostenintensiver Fehler bereits vor dem Bau realer Prototypen. Zwar können mit Hilfe digitaler Mock-Ups der Aufbau physischer Prototypen nicht gänzlich vermieden, ihre Anzahl kann jedoch beträchtlich verringert werden [EvSW02].

Trotz ihrer schwerpunktmäßigen Anwendung im Bereich der Produktentwicklung findet die Absicherungsmethode des Digital Mock-Up aufgrund ihres „Bindegliedcharakters“ zwischen Produkt- und Produktionsgestaltung auch zunehmend Einsatz in der Produktionsplanung. Einen typischen Anwendungsfall stellt die frühzeitige Absicherung der Produktionsgerechtigkeit von Bauteilen und Zusammenbauten unter Zuhilfenahme digitaler Betriebsmittel dar. So kann beispielsweise das Zusammenspiel zwischen den in der Mechanikkonstruktion entwickelten Spannvorrichtungen und den zu fertigenden Produkten mit Hilfe von DMU-Analysen abge-

sichert und gegebenenfalls optimiert werden. In der Praxis wird dieser 3D-orientierte Absicherungsprozess auch als „Digitale Vorrichtungsabnahme“ bezeichnet [LoSa06].

Robotersimulation und -programmierung (OLP)

Unabhängig vom konkreten Einsatzbereich dienen kinematikbasierte Robotersimulationen u. a. der frühzeitigen Absicherung und Optimierung von Roboterpositionen, -bewegungsbahnen, -verfahrwegen und realen Roboterprogrammen. Der Nutzungsschwerpunkt von Robotersimulationssystemen ist in aller Regel jedoch nicht ausschließlich auf die reine Simulation mit dem Ziel von Bewegungsanalysen, Taktzeitverbesserungen etc. beschränkt. Auf der Basis von Robotersimulationsmodellen lassen sich zudem Steuerungsprogramme für einen realen Roboter automatisiert generieren (OLP). Im Anschluss an die 3D-gestützte Erstellung der Roboterprogramme müssen diese lediglich in die realen Robotersteuerungen transferiert und an die Abweichungen zwischen Modell und Realität angepasst werden [Seel99].

Zur Verbesserung der Simulationsqualität – insbesondere hinsichtlich Taktzeitermittlung und absoluter Positioniergenauigkeit – wurden in den letzten Jahren auf Initiative mehrerer Automobilhersteller, Roboterhersteller und Systemanbieter zwei weitere roboterspezifische IT-Lösungen entwickelt. Hierbei handelt es sich um die beiden Zusatzmodule „Realistic Robot Simulation“ 1 und 2 (RRS). Diese ermöglichen u. a. die Anbindung der 3D-Robotermodelle an reale Robotersteuerungen, so dass die Simulation von realen Roboterprogrammen „getrieben“ wird. Die 3D-gestützte Robotersimulation und Offline-Programmierung stellt gerade in der Automobilindustrie aufgrund ihres hohen Reifegrads ein bewährtes Hilfsmittel dar und wird in der operativen Praxis fast flächendeckend eingesetzt.

Ergonomiesimulation

Allgemein dienen Ergonomiesimulationen der Optimierung von Arbeitsplätzen (z.B. von Einlege-, Montier- und Handlingbereichen) unter Beachtung ergonomischer Gesichtspunkte. Dabei werden dreidimensionale, realitätsgetreue Menschmodelle genutzt, die in Analogie zu den Modellen aus dem Bereich Robotik den menschlichen Körper mit seinen relevanten Freiheitsgraden und Restriktionen abbilden. Typische Anwendungsbeispiele 3D-gestützter Ergonomieuntersuchungen sind die frühzeitige Analyse und Optimierung von Greifräumen, Hebelasten, Gehwegen und Sichtfeldern. Auf diese Weise können falsche Belastungen, Bewegungen sowie mögliche Langzeitschäden minimiert bzw. gänzlich vermieden werden. Zudem erlauben die meisten IT-Tools eine detaillierte Bestimmung von Vorgabezeiten auf Basis bestimmter Zeitwirtschaftsverfahren (z.B. MTM). Während Ergonomiesimulationen in der Produktions-

planung in den USA aufgrund strenger gesetzlicher Arbeitsplatzvorgaben fast flächendeckend durchgeführt werden, finden sie in Deutschland langsam Einzug in die operative Praxis.

Prozessgetriebene Zellensimulation

Analog zu DMU-Untersuchungen basieren prozessgetriebene Zellensimulationen auf dreidimensionalen Anlagenkomponenten (z.B. Vorrichtungen, Roboter), deren Zusammenspiel mit Hilfe einer zellenspezifischen Prozessbeschreibung analysiert und verbessert wird. Der dieser Simulationsmethode zugrunde liegende Prozessablauf repräsentiert dabei die „Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder auch Informationen umgeformt, transportiert oder auch gespeichert wird“ [Schw01]. Grundlage für diesen 3D-Absicherungsprozess bildet die Verknüpfung von Produkten, Prozessen und Ressourcen. Mit Hilfe dieser „PPR-Verknüpfung“ wird in der Produktionsplanung eindeutig festgelegt, welches Produkt (was) mit welchem Prozess (wie) mit Hilfe welcher Ressourcen (womit) be- bzw. verarbeitet wird. Trotz ihrer großen Nutzenpotentiale findet die prozessgetriebene Zellensimulationsmethode – aufgrund ihres umfassenden Charakters und der aufwendigen Simulationsvorbereitung – in der operativen Praxis nur punktuellen Einsatz.

Virtual Reality (VR) / Mixed Reality (MR)

Nach [VDI4499] bezeichnet Virtual Reality die „Anwendung einer hochmodernen Mensch-Maschine-Schnittstelle, die mit dem Einsatz innovativer Endgeräte den Benutzer in eine dreidimensionale rechnerinterne Welt einbezieht“. VR stellt somit kein klassisches Simulationswerkzeug dar, hat sich aber in den letzten Jahren als ein wichtiges Visualisierungsinstrument in der Praxis durchgesetzt. Abhängig vom Grad der Immersion, d.h. vom Empfinden des Benutzers, sich selbst als Teil der virtuellen Welt zu fühlen, ist eine Unterscheidung zwischen „Augmented Reality“ (AR), „Augmented Virtuality“ (AV) und „Virtual Reality“ (VR) vorzunehmen. Nach [Oehm04] bezeichnet AR die „Anreicherung der realen Welt mit zusätzlichen virtuellen Informationen, die situationsgerecht im Kontext zur betrachteten Realität direkt in das Sichtfeld des Betrachters eingeblendet werden“. Die Abgrenzung oben benannter Begriffe wird anhand des in [MTUK94] publizierten „Reality-Virtuality-Kontinuum“ (Abbildung 3-5) veranschaulicht. Das Kontinuum verdeutlicht, dass es zwischen den beiden Extrema Realität und virtuelle Umgebung einen kontinuierlich verlaufenden Bereich gibt, der übergreifend als Mixed Reality (MR) bezeichnet werden kann.

Mit Hilfe der Visualisierungsmethoden der virtuellen und gemischten Realität lassen sich im Vergleich zu den klassischen CAD-orientierten Visualisierungsmöglichkeiten große Nutzen-

potentiale – insbesondere durch den neu hinzugewonnenen Aspekt der Tiefenwahrnehmung – erschließen. Die mit der Einführung von VR-Methoden einhergehenden Vorteile stellen allerdings nur eine Seite der Medaille dar. Auf der anderen Seite sind VR-Untersuchungen derzeit (noch) mit einem erheblichen Zusatzaufwand verbunden, der sich in erster Linie auf den aufwendigen Datenaufbereitungs- und -konvertierungsprozess bezieht. Dieses als sehr kritisch zu betrachtende Aufwand-Nutzen-Verhältnis führt letztlich dazu, dass die Anwendungen der virtuellen und gemischten Realität derzeit nur punktuell im Bereich der Produktionsplanung eingesetzt werden. Dort dienen sie hauptsächlich als interdisziplinäre Kommunikations- und Diskussionsplattform zur Besprechung von Produkt- und Produktionsständen [EiBr05].

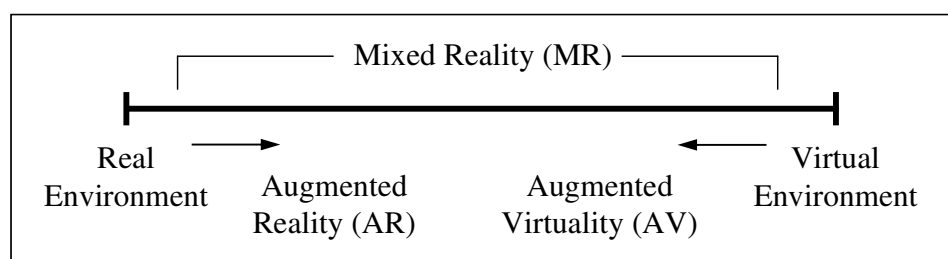


Abbildung 3-5: Reality-Virtuality-Kontinuum nach [MTUK94]

Bei der Betrachtung der in diesem Abschnitt vorgestellten Visualisierungs- und Simulationenmethoden ist zusammenfassend festzuhalten, dass diese als isolierte Einzelanwendungen mit den derzeit verfügbaren IT-Werkzeugen gewinnbringend eingesetzt werden können. Eine besondere Betonung ist in diesem Satz jedoch auf die beiden Begriffe „isolierte Einzelanwendung“ und „können“ zu legen. Die simulationsspezifischen IT-Lösungen können nur dann effektiv und bezogen auf den Gesamtprozess gewinnbringend eingesetzt werden, wenn entsprechende Methoden, abgestimmte Applikationen und das notwendige organisatorische Rückgrat zur Umsetzung dieser Methoden vorhanden sind. Dies ist in den meisten Fällen jedoch nicht gegeben. Einen weiteren wichtigen Aspekt stellt die Datendurchgängigkeit zwischen den einzelnen IT-Systemen dar. Dies gilt insbesondere für die applikationsübergreifende Mehrfachverwendung von Prozess- und Ressourcendaten. Nur durch ein abgestimmtes und über offene Systemschnittstellen realisierbares Zusammenspiel mehrerer IT-Systeme kann der zur Erstellung der Simulationsmodelle notwendige Aufwand reduziert und in Folge dessen eine höhere Gesamtwirtschaftlichkeit erzielt werden.

3.3.2 Virtuelle Inbetriebnahme als maschinennahe Simulationenmethode

Mit Ausnahme der steuerungsgetriebenen Robotersimulation fokussieren die im Kapitel 3.3.1 vorgestellten Simulationenmethoden die Optimierung und Absicherung rein mechanischer An-

lagenkomponenten. Jedoch bestehen automatisierte Produktionssysteme nicht nur aus mechanischen Anlagenkomponenten, sondern setzen sich zudem aus elektrischen sowie steuerungstechnischen Bestandteilen zusammen. Vor diesem Hintergrund wurden in der Vergangenheit Simulationsverfahren entwickelt, die auch eine Absicherung steuerungstechnischer Anlagenkomponenten bzw. eine Absicherung des Zusammenspiels von mechanischen und steuerungstechnischen Anlagenbestandteilen ermöglichen. Nach [VDI3633b] werden diese Simulationsmethoden allgemein als „Maschinennahe Simulationen“ bezeichnet.

Im Gegensatz zu den im Kapitel 3.3.1 beschriebenen Simulationsmethoden bestehen die der maschinennahen Simulation zugrunde liegenden Modelle nicht nur aus geometrischen, kinematisierten 3D-Komponenten, sondern werden um elektro- und steuerungstechnische Aspekte erweitert. Ein Anwendungsbeispiel der maschinennahen Simulation, das im Folgenden näher betrachtet wird, ist die Simulation zum Funktionstest von Steuerungen. Diese Simulationsmethode wird im wissenschaftlichen und industriellen Umfeld häufig als „Virtuelle Inbetriebnahme“ [ZäWü05, Fedr04, Scho06] bzw. als „Virtuelle Inbetriebsetzung“ [Horn05] bezeichnet. Im Bereich Rohbau umfasst das Anwendungsgebiet der virtuellen Inbetriebnahme sowohl den modellbasierten Funktionstest von Roboter- als auch von übergeordneten Steuerungsprogrammen [Fedr04]. Im Rahmen dieser Arbeit ist der Begriff „Virtuelle Inbetriebnahme“ wie folgt zu verstehen:

Die virtuelle Inbetriebnahme bezeichnet die im Rahmen der Produktionsplanung stattfindende digitale Absicherung realer Steuerungsprogramme und anderer produktionsnaher IT-Systeme ohne Vorhandensein der realen Fertigungssysteme. Sie dient der frühzeitigen Beurteilung und Optimierung des gesamten Anlagenverhaltens unter Verwendung digitaler Produkt- und Resource- sowie realer Prozessdaten (Steuerungsdaten).

Grundsätzlich setzt sich ein der Durchführung virtueller Inbetriebnahmen zugrunde liegendes Gesamtsystem, wie in Abbildung 3-6 dargestellt, aus insgesamt drei Teilsystemen zusammen [VDI3633b]:

- Dem mechanischen Aufbau inklusive Aktorik, Sensorik und einer systembezogenen Verhaltensbeschreibung (Funktionsmodell),
- der Maschinensteuerung inklusive ihrer Ein- und Ausgangssignale sowie
- den Signalverbindungen zwischen Aktoren/Sensoren und der Steuerung.

Für die Simulation werden das digitale Anlagenmodell und die realen Steuerungssysteme mit Hilfe der Hardware-in-the-Loop-Technologie (HIL) über definierte Schnittstellen miteinander

verbunden. Nach [VDI3633b] werden bei einer HIL-Simulation „Teile eines Systems durch mathematische Modelle ersetzt, während eine elektronische oder mechanische Komponente (z.B. ein Steuergerät) in einem geschlossenen Regelkreis mit einem Simulationsrechner verbunden wird“. Dabei reagiert das digitale Anlagenmodell auf die von der realen Steuerung kommenden Signale analog zum später eingesetzten realen Fertigungssystem und gibt Signalinformationen (z.B. Endlagenmeldungen) an das reale Automatisierungssystem zurück.

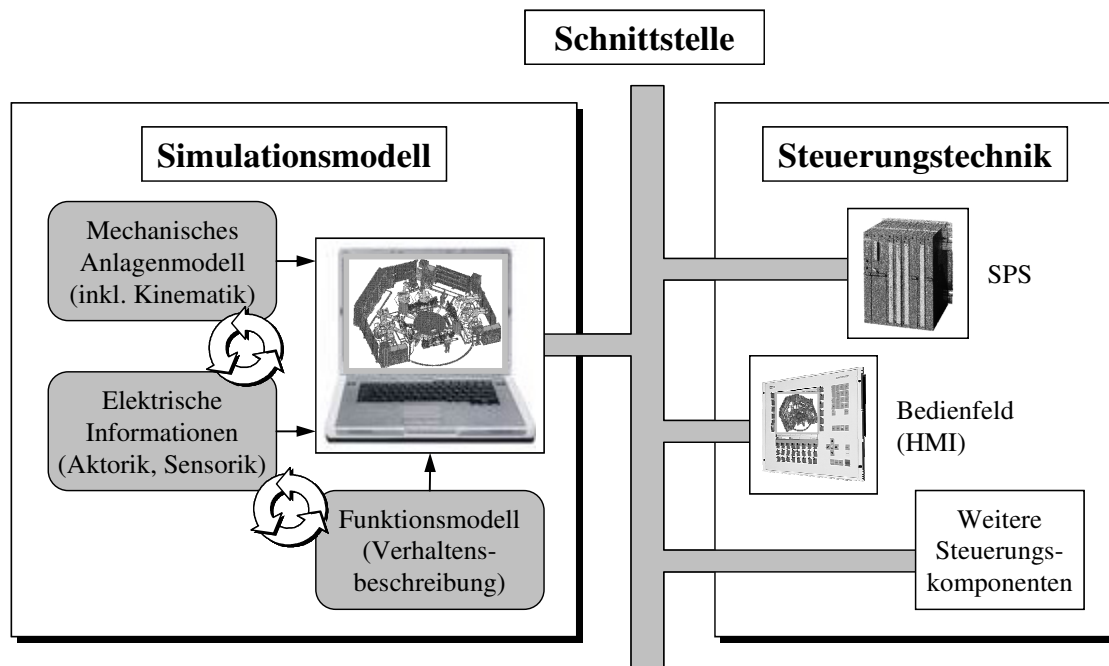


Abbildung 3-6: Teilsysteme zur Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme

Die mittels virtueller Inbetriebnahmen zu erschließenden Nutzenpotentiale sind unumstritten. Mit Hilfe dieser Simulationsmethode versprechen sich die Anwender u. a. eine Verbesserung interdisziplinärer Kommunikationsprozesse, beschleunigte und stabile Inbetriebnahmen sowie höhere soft- und hardwarebezogene Anlagenreifegrade zum Produktionsbeginn. Des Weiteren lassen sich durch die zeitliche „Vorverlagerung“ der Anlageninbetriebnahme sehr viel früher im Gesamtprozess wichtige Erkenntnisse erschließen, die als Erfahrungswerte in die laufende Mechanik-, Elektro- und Softwareentwicklung eingebracht werden können.

Trotz dieser Nutzenpotentiale wird die Simulationsmethode der virtuellen Inbetriebnahme im Karosserierohbau der Automobilindustrie derzeit noch nicht operativ eingesetzt. Zwar konnten ihre weit reichenden Potentiale bereits in Form einzelner Pilotprojekte erfolgreich nachgewiesen werden, jedoch ist der zusätzlich zu erbringende Aufwand zur Durchführung virtueller Inbetriebnahmen derzeit noch zu hoch. Untersuchungen zufolge kann dieser sogar – abhängig vom eingesetzten Softwaretool und der Anlagenkomplexität – einige Tage bis einige

Wochen betragen [Stet06]. Dieser hohe Aufwand lässt sich insbesondere darauf zurückführen, dass die Methode der virtuellen Inbetriebnahme bis dato eine reine Insellösung darstellt und nicht im Gesamtprozess integriert ist. Dies ist beispielsweise daran zu erkennen, dass die zur Durchführung virtueller Inbetriebnahmen benötigten Zusatzinformationen (z.B. Funktionsmodell der Anlage) erst am Ende der Planungsprozesskette entwickelt werden. Fehlende bzw. rudimentär ausgeprägte Systemschnittstellen erfordern zudem oftmals eine wiederholte Eingabe bereits vorhandener Informationen, was ein zusätzliches Fehlerpotential bei der Modellerstellung darstellt.

Neben der fehlenden methodischen und datentechnischen Integration stellt die meist zurückhaltende Anwenderakzeptanz aufgrund zu erbringender Zusatzaufwendungen ein zusätzliches Hemmnis bei der Einführung dieser neuen innovativen Absicherungsmethode dar. Aus diesen Gründen besteht das vorrangige Ziel darin, die virtuelle Inbetriebnahme – sowohl methodisch, softwaretechnisch als auch organisatorisch – in den ganzheitlich zu betrachtenden, bereichsübergreifenden Planungsprozess ohne Mehraufwendungen zu integrieren. Nur so kann ein optimales Aufwand-Nutzen-Verhältnis zugunsten einer positiven Wirtschaftlichkeit erzielt und die Methode der virtuellen Inbetriebnahme in die operative Praxis eingeführt werden.

3.4 Bestehende Softwarelösungen für virtuelle Zelleninbetriebnahmen

Während der Software-Einsatz innerhalb der Produktentwicklung auf eine überschaubare Anzahl an CAD-Systemen begrenzt ist, stellt sich bezüglich der IT-Unterstützung zur Prozess- und Produktionsgestaltung ein völlig anderes Bild dar. Neben den im Kapitel 3.3 beschriebenen rechnergestützten Visualisierungs- und Simulationsanwendungen existieren zur digitalen Produktionsplanung eine Vielzahl weiterer bereichsbezogener Planungssysteme. Für den Bereich Karosserierohbau sind dies beispielsweise Applikationen zur computerbasierten Layoutplanung, zur Prozessgestaltung sowie zur Festlegung und Absicherung von Verbindungselementen (z.B. Schweißpunkte) und Spann- und Fixierstellen (SFK).

Nach einem starken Konzentrationsprozess in den vergangenen Jahren existieren derzeit noch zwei große Softwareanbieter für Gesamtlösungen der Digitalen Fabrik, die den Weltmarkt unter sich aufteilen. Dies ist auf der einen Seite die Firma DELMIA, die im Jahr 2000 als 100% Tochter des französischen Konzerns Dassault Systèmes gegründet wurde. Neben der digitalen Planungslösung DELMIA vertreibt Dassault Systèmes zudem das 3D-CAD-System CATIA sowie das PDM-System ENOVIA, die allesamt auf der so genannten „V5-Architektur“ auf-

setzen. Auf der anderen Seite bietet die Firma Tecnomatix, die Anfang 2005 von der Unigraphics Solution GmbH (UGS) übernommen wurde, ebenfalls umfassende Softwarelösungen im Bereich der Digitalen Fabrik an. Dabei verfolgt UGS den Ansatz, die „Tecnomatix-Lösungssuite“ über den Open Manufacturing Backbone (OMB) mit anderen IT-Systemen durchgängig zu verbinden.

Da sowohl die DELMIA- als auch die Tecnomatix-Softwarelösungen durch den Zusammenschluss mehrerer kleiner Firmen entstanden sind bzw. sich beide im Besitz großer Softwarehersteller mit vergleichbaren Produkten befinden, haben beide mit denselben grundlegenden Problemen zu kämpfen. Nach [Fran03] beziehen sich diese Probleme hauptsächlich auf die jeweils fehlenden Basis-Konzepte, die Dominanz der Implementierungsprobleme und auf die fehlende bzw. unzureichende Standardisierung von Daten, Schnittstellen und Modellen. Neben diesen beiden kommerziell verfügbaren IT-Lösungen existieren zur digitalen Planung und Simulation eine Vielzahl weiterer Spezialanwendungen, die insbesondere in klein- und mittelständischen Unternehmen (KMU) zum Einsatz kommen [BIFZ06].

Allen Softwarelösungen gemeinsam ist jedoch ihr historisch begründeter ausgeprägter Fokus auf die Planung und simulative Absicherung mechanischer Anlagenkomponenten. Allerdings wurden gerade in den letzten Jahren eine Reihe unterschiedlicher Simulationswerkzeuge entwickelt, die eine modellbasierte Überprüfung und Optimierung steuerungstechnischer Aspekte ermöglichen. Das Spektrum dieser auf die Steuerungstechnik zugeschnittenen IT-Werkzeuge reicht von einfachen digitalen Nachbildungen traditioneller Tasterkästen über 2D-Systeme bis hin zu komplexen High-End-Anwendungen, die zur Simulation realitätsgetreue 3D-CAD-Daten verwenden. Der Großteil dieser Simulationswerkzeuge beschränkt sich jedoch auf die einfache Nachbildung der zu simulierenden Anlage in 2D bzw. in Form von Quaderelementen in 3D. Beispiele hierfür sind die Produkte SimPP der Firma fm control, E-Control von VES und TrySim der Firma Cephalos. Bei diesen eher einfach strukturierten IT-Lösungen handelt es sich meist um ausgeprägte Insellösungen, die aufgrund ihrer funktionalen Einschränkungen nur für relativ einfache Steuerungsaufgaben verwendet werden können.

Im Gegensatz dazu entwickelten die beiden großen Softwareanbieter DELMIA und Tecnomatix individuelle Lösungen, die u. a. eine integrierte Steuerungsplanung sowie einen 3D-basierten Funktionstest der Steuerungssoftware und -hardware ermöglichen. Bei diesen beiden Softwarelösungen handelt es sich zum einen um das Produkt „DELMIA Automation V5“ der Firma DELMIA und zum anderen um die Softwarelösung „Process Simulate Commissioning“ der Firma Tecnomatix. Ein weiteres Tool, welches ebenfalls einen modellbasierten Funktions-

test von SPS-Software ermöglicht, ist das IT-Werkzeug „WinMOD“, das vom Ingenieurbüro Mewes & Partner entwickelt und vertrieben wird. Diese drei IT-Tools werden im Rahmen einer Evaluierung näher untersucht, analysiert und anhand von Bewertungskriterien miteinander verglichen. Die wesentlichen Ergebnisse dieses Systemvergleichs werden im Folgenden vorgestellt und kurz erläutert.

3.4.1 Das Softwaretool DELMIA Automation V5 (DELMIA)

DELMIA Automation V5 ist das derzeit neueste Softwareprodukt der Firma DELMIA und seit Anfang 2005 als offizielle Version erhältlich. Das Ziel dieser Softwarelösung besteht allgemein darin, die „Steuerungstechnik in die Digitale Fabrik zu integrieren, um somit kurze Hochlaufzeiten sowie den wirtschaftlichen Einstieg in die Produktion sicherstellen zu können“ [MaHa05]. In Anlehnung an die in der IEC 61131-3 festgelegten SPS-Programmiersprachen (Kapitel 2.2.3) ermöglicht DELMIA Automation V5 u. a. die Erstellung systemneutraler Steuerungsprogramme. Diese lassen sich mit Hilfe vorhandener Postprozessoren in die SPS-Programmierungsumgebungen der Firmen Siemens (STEP 7), Schneider Electric (Unity) und Omron (NE Prog) mit dem Ergebnis AWL-codierter SPS-Programme importieren. Die Validierung und Optimierung dieser so generierten bzw. der manuell erzeugten SPS-Programme erfolgt, wie in Abbildung 3-7 dargestellt, anhand eines um steuerungstechnische Informationen erweiterten 3D-Simulationsmodells.

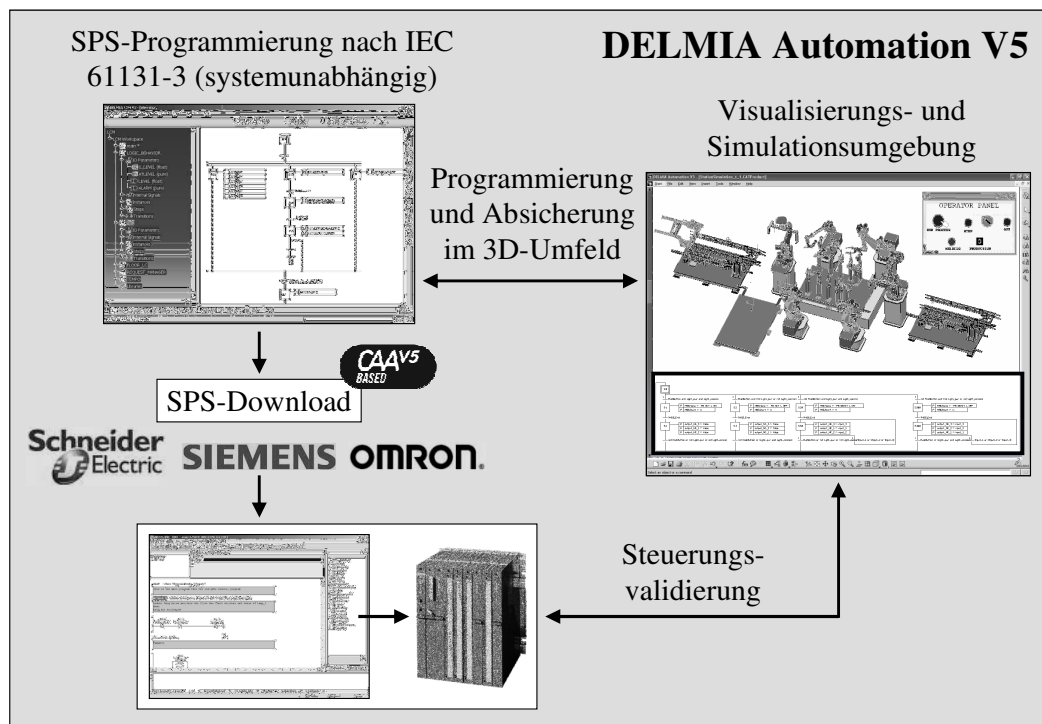


Abbildung 3-7: Einsatzmöglichkeiten von DELMIA Automation V5 nach [Schn06]

Aufgrund der Neuheit des Softwareproduktes DELMIA Automation V5 besteht bis dato noch keine durchgängige Datenintegration zu den übrigen „V5-Applikationen“ der Firma Dassault Systèmes. Dies sieht man insbesondere auch daran, dass es namentlich immer noch zwei „V5-Softwareprodukte“ der Firma DELMIA gibt: DELMIA PLM V5 für die mechanikorientierte Prozess- und Produktionsgestaltung und DELMIA Automation V5 für die Programmierung und digitale Absicherung von Steuerungsprogrammen [Schn06]. Eine Integration in firmenfremde Systemlandschaften ist derzeit aufgrund eingeschränkter Schnittstellen nahezu ausgeschlossen. Neben dieser fehlenden Datendurchgängigkeit liegt ein weiteres Manko in der aufwendigen Erstellung des Simulationsmodells. Dies bezieht sich u. a. auf die manuell durchzuführenden und dadurch zeitaufwendigen Zuweisungen zwischen Modell- und SPS-Signalen, was eine unabdingbare Voraussetzung zur Durchführung virtueller Inbetriebnahmen darstellt.

Weiterhin ist der „Downloadprozess“ der in DELMIA Automation V5 erstellten Steuerungsprogramme gegenwärtig noch mit größeren Problemen verbunden. Als Ergebnis dieses Prozesses können lediglich unstrukturierte AWL-Programme generiert werden, auf deren Basis keine systemspezifischen Programmdetaillierungen mehr möglich sind. Aufgrund dieser Defizite, die folglich zu einer zurückhaltenden Anwenderakzeptanz führen, wird DELMIA Automation V5 bis dato noch nicht operativ eingesetzt.

3.4.2 Das Softwaretool Process Simulate Commissioning (Tecnomatix)

Das IT-Werkzeug Process Simulate Commissioning ist das Ergebnis einer Gemeinschaftsentwicklung von Tecnomatix und Siemens A&D. Entwickelt wurde es analog zu DELMIA Automation V5 vor dem Hintergrund, die bereichsübergreifende Kommunikation in der Produktionsplanung zu verbessern bzw. einen nahtlosen Übergang von der Prozessentwicklung zur Produktionsautomatisierung zu realisieren. Auf Basis der in der Prozessplanung festgelegten digitalen Prozessbeschreibungen ermöglicht Process Simulate Commissioning eine automatisierte Erstellung von SPS-Programmen und Signallisten für die Siemens-Programmierungsumgebung STEP 7. Dieser so erzeugte SPS-Code lässt sich anhand des um Sensoren und Aktoren erweiterten mechanischen Zellenmodells auf etwaige Fehler überprüfen. Hierzu kann entweder eine reale oder eine Simulations-SPS verwendet werden.

Obwohl das Softwarepaket Process Simulate Commissioning bereits seit 2002 auf dem Markt offiziell erhältlich ist und bis dato in vielen Entwicklungszyklen optimiert wurde, existieren derzeit immer noch einige softwarebezogene Defizite. Diese Mängel beziehen sich in erster Linie auf die eingeschränkten Möglichkeiten der automatisierten SPS-Programmgenerierung

(Kapitel 4.6.1) sowie auf die datentechnische Integration in bestehende Systemlandschaften. Obwohl UGS das Vorhandensein offener Systemschnittstellen propagiert, ist eine Integration des IT-Tools Process Simulate Commissioning in systemfremde IT-Landschaften derzeit nahezu undenkbar. Neben der Verbesserung des systemübergreifenden Datenflusses werden in [Rauc04] bzw. im Rahmen praxisbezogener Untersuchungen weitere systembezogene Handlungsbedarfe identifiziert. Diese beziehen sich u. a. auf den hohen Erstellungs- und Anpassungsaufwand des Simulationsmodells und des abzusichernden SPS-Programms sowie auf die eingeschränkten Möglichkeiten zur realitätsgetreuen Nachbildung komplexer ressourcenspezifischer Funktionsmodelle (z.B. eines Frequenzumrichters).

Darüber hinaus bietet das IT-Werkzeug Process Simulate Commissioning – im Vergleich zu DELMIA Automation V5 – keine Möglichkeit, so genannte „Hardware-Taster“ als Teil des später eingesetzten Bedienfeldes nachzubilden und in die Simulation zu integrieren. Obwohl diese Softwarelösung bereits in mehreren Pilotprojekten eingesetzt und getestet wurde, findet sie aufgrund der beschriebenen Problempunkte in der operativen Praxis nur punktuellen Einsatz.

3.4.3 Das Softwaretool WinMOD (Mewes & Partner)

Im Gegensatz zu den beiden IT-Werkzeugen DELMIA Automation V5 und Process Simulate Commissioning stellt das Tool WinMOD keine integrierte Planungslösung dar, sondern wird ausschließlich für die echtzeitfähige Funktionsvalidierung von Steuerungsprogrammen eingesetzt. Allgemein ist diese Software in der Lage, das gesamte Signalabbild und Verhalten von einzelnen Feldgeräten bis hin zu ganzen Produktionssystemen zu simulieren. Das Funktionsmodell der Anlage läuft dabei auf einem PC und kann zu Visualisierungszwecken über eine vorhandene VRML-Schnittstelle an ein entsprechend aufbereitetes 3D-Simulationsmodell gekoppelt werden. Durch den Verzicht auf eine komplexe 3D-Simulation ist WinMOD – im Gegensatz zu DELMIA Automation V5 und Process Simulate Commissioning – in der Lage, bis zu einem bestimmten Komplexitätsgrad in Echtzeit zu simulieren. Nach [VDI3633b] bezeichnet die Echtzeitfähigkeit die „Eigenschaft eines Rechnersystems, innerhalb einer begrenzten, vorgegebenen Zeitspanne auf ein Ereignis reagieren zu können“. Eine Übersicht über die der IT-Lösung WinMOD zugrunde liegende Gesamtarchitektur ist in Abbildung 3-8 gegeben.

Die derzeitigen Einschränkungen beim Einsatz der Simulationssoftware WinMOD liegen in erster Linie in der fehlenden Integration an die in der Produktionsplanung eingesetzten CAD- und CAP-Systeme. Da WinMOD eine Insellösung zur echtzeitfähigen Simulation von Steue-

ungssoftware darstellt und daher nur über eingeschränkte Schnittstellen zu vorgelagerten IT-Systemen verfügt, ist die Erstellung des der Simulation zugrunde liegenden Funktionsmodells mit einem sehr hohen manuellen Zusatzaufwand verbunden. Des Weiteren ist das zur Visualisierung dienende 3D-Zellenmodell mit steuerungstechnischen Zusatzinformationen anzureichern, um eine Synchronisation mit dem Funktionsmodell gewährleisten zu können. Die Zuweisungen zwischen den einzelnen Funktionsbausteinen und den beweglichen Modellelementen erfolgen dabei manuell und stellen somit ebenfalls einen zusätzlich zu erbringenden und fehleranfälligen Aufwand dar.

Aufgrund der mit dem Einsatz von WinMOD zu erbringenden Mehraufwendungen spielt dieses IT-Werkzeug im Rohbau der Automobilindustrie bis dato keine bedeutende Rolle. Im Gegensatz dazu findet es zur Vorabinbetriebnahme von Pressenstraßen und Werkzeugmaschinen aufgrund der dort gegebenen funktionalen Ähnlichkeiten punktuellen Einsatz. Beispiele hierfür sind in [Bees04, Appe06, Lutz06] beschrieben.

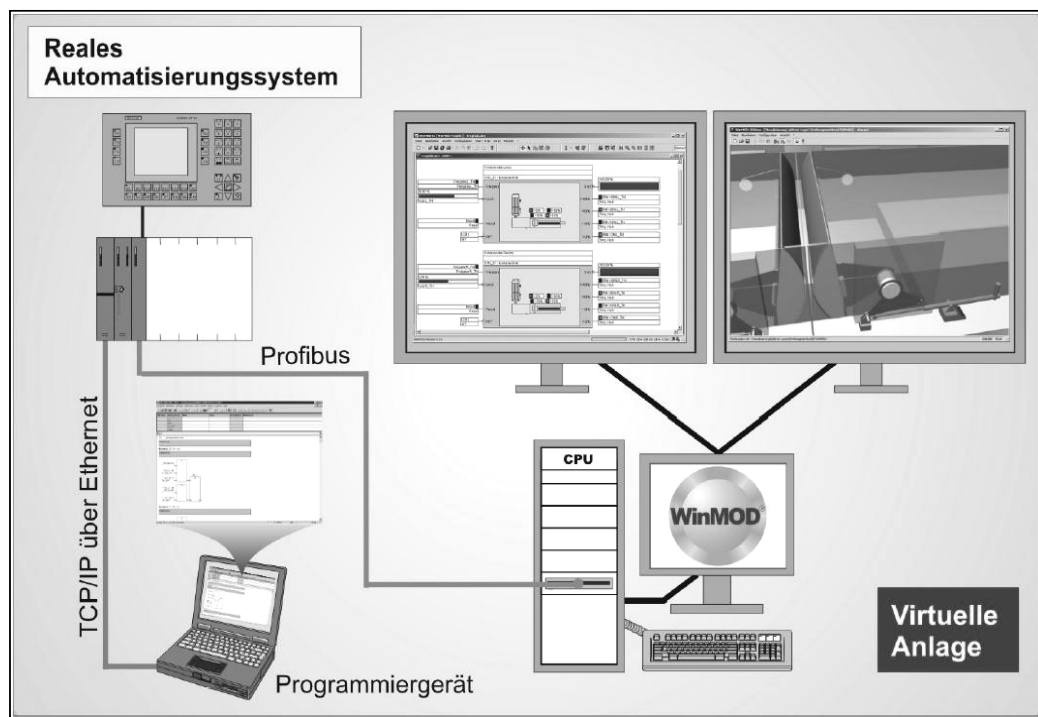


Abbildung 3-8: Virtuelle Zelleninbetriebnahme mit WinMOD nach [Mewe05]

3.4.4 Zusammenfassende Bewertung

Zwar wurden die drei IT-Tools DELMIA Automation V5, Process Simulate Commissioning und WinMOD zur frühzeitigen Validierung von Steuerungsprogrammen entwickelt, jedoch liegen diesen Werkzeugen unterschiedliche Ausrichtungen und Schwerpunkte zugrunde. Um

diese IT-Werkzeuge dennoch objektiv miteinander vergleichen zu können, werden ihre individuellen Stärken und Schwächen anhand vorgegebener Bewertungskriterien untersucht. Das Ergebnis dieser Bewertung ist in Tabelle 3-2 dargestellt.

Bewertungskriterium	DELMIA Automation V5	Process Simulate Commissioning	WinMOD
Erstellungsaufwand Simulationsmodell	Hoch	Gering (vorkonfigurierte Elemente)	Hoch
Flexibilität bei der Funktionsmodellierung	Hoch (frei programmierbar)	Gering (nur Standards)	Hoch (frei programmierbar)
Realitätsnähe Funktionsmodell	Hoch	Mittel (nur Standards)	Hoch
Schnittstellen zu SPS-Systemen (für VIBN)	COM (ActiveX), OPC	COM (ActiveX), OPC	Profi-/Inter-/Modbus, TCP/IP, OPC
Schnittstellen zu 3D-CAD-Systemen	CATIA V5 - Grafikformate	Unigraphics- Grafikformate	VRML
Schnittstellen zu weiteren IT-Systemen	XML, (CSV)	XML, CSV	CSV
Hardware-Taster integriert	Ja	Nein	Ja
3D-Visualisierung integriert	Ja	Ja	Nein (Anbindung über VRML)
Multi-User-Fähigkeit (datenbankbasiert)	Nein	Nein	Nein
Echtzeitfähigkeit	Nein	Nein	Ja

Tabelle 3-2: Vergleich von Softwarelösungen zur Durchführung virtueller Zelleninbetriebnahmen

Neben den in diesem Kapitel vorgestellten IT-Lösungen existieren auf dem Markt eine Reihe weiterer Systeme, die zur Unterstützung des Engineering-Prozesses in der Automatisierungstechnik entwickelt wurden. Hierzu zählen beispielsweise der von Siemens A&D entwickelte „Simatic Automation Designer“ [Schl05] sowie die beiden Softwarelösungen „EPLAN Engineering Center“ (EPLAN) [Pesc05] und „Comos“ (innotec). Allerdings fokussieren diese IT-Werkzeuge weniger den Planungs- und Projektierungsprozess von Fertigungszellen, sondern werden vor allem für übergeordnete elektro- und steuerungstechnische Projektierungstätigkeiten eingesetzt. Da dies jedoch nicht den Fokus dieser Arbeit darstellt, werden diese Softwarelösungen nicht näher betrachtet.

3.5 Aktuelle Probleme und Handlungsfelder

In aktuellen Beratungs- und Forschungsprojekten wurde festgestellt, dass bei der Umsetzung der Digitalen Fabrik insgesamt noch großer Handlungsbedarf besteht. Dieser bezieht sich ins-

besondere auf die Tatsache, dass sich „die Digitale Fabrik in den Unternehmen zum großen Anteil noch immer aus Insellösungen – sowohl aus prozessualer als auch aus technologischer Sicht – zusammensetzt“ [KKSL06a]. Die durch die unzureichende Vernetzung resultierenden Brüche in der Prozesskette treten dabei vor allem an der Schnittstelle zwischen Produktionsplanung und Produktionsabsicherung sowie beim Übergang von der Digitalen in die reale Fabrik zum Vorschein. Diese Handlungsfelder wurden im Rahmen einer von der TU München und der Firma Nexolab durchgeführten Studie zum Thema „Vernetzungsstrukturen in der Digitalen Fabrik“ identifiziert [KKSL06b].

Zu einem ähnlichen Resultat kam eine weitere Unternehmensbefragung, deren Ergebnisse in [BIFZ06] veröffentlicht sind. Dort werden als wesentliche Handlungsbedarfe die Integration von Planungswerkzeugen zur durchgängigen Nutzung von Planungsdaten, die Systematisierung und Standardisierung von Planungsmethoden und Werkzeugen sowie das Fehlen offener Schnittstellen bzw. das Vorhandensein uneinheitlicher Datenformate zwischen Planungs- und Simulationswerkzeugen benannt. Um dennoch Daten zwischen verschiedenen Insellösungen austauschen zu können, werden derzeit in der Praxis eine Vielzahl von Spezialprogrammen in Form von Makros und Skripten entwickelt und eingesetzt. Die Existenz dieser systembezogenen Speziallösungen, deren Entwicklung und Pflege hohe Kosten verursacht, liefert den besten Beweis dafür, dass die Softwarehersteller derzeit über kein strategisches Langfristkonzept verfügen.

Verschärft wird diese Situation der unzureichenden Datenintegration durch die Einbeziehung der beiden Domänen Elektrik und Steuerungstechnik in die bis dato eher mechanikorientierte Welt der Digitalen Fabrik. Zwar existieren zur Steuerungsplanung und -absicherung bereits einige Softwarelösungen (Kapitel 3.4), jedoch konnten diese bis dato weder methodisch noch softwaretechnisch in die vorhandenen Systemlandschaften integriert werden. Vielmehr stellen diese IT-Werkzeuge, wie in Abbildung 3-9 dargestellt, weitere Inseln in einem immer größer werdenden Verbund an immer komplexer werdenden Insellösungen dar. Die unzureichenden Systemschnittstellen bzw. das Fehlen eines durchgängigen domänenübergreifenden Datenmanagements erfordert oftmals eine wiederholte, zeitaufwendige Eingabe bereits vorhandener Informationen sowie einen hohen manuellen Modellierungsaufwand zur Erstellung der steuerungsbezogenen Simulationsmodelle. Aus diesem Grund besteht in Anlehnung an [Fedr04] ein vorrangiges Ziel darin, die an der virtuellen Inbetriebnahme beteiligten Systeme und Datenflüsse in einem ganzheitlich zu betrachtenden Planungsprozess zu integrieren sowie eine einheitliche und redundanzfreie Kommunikationsschnittstelle zu schaffen.

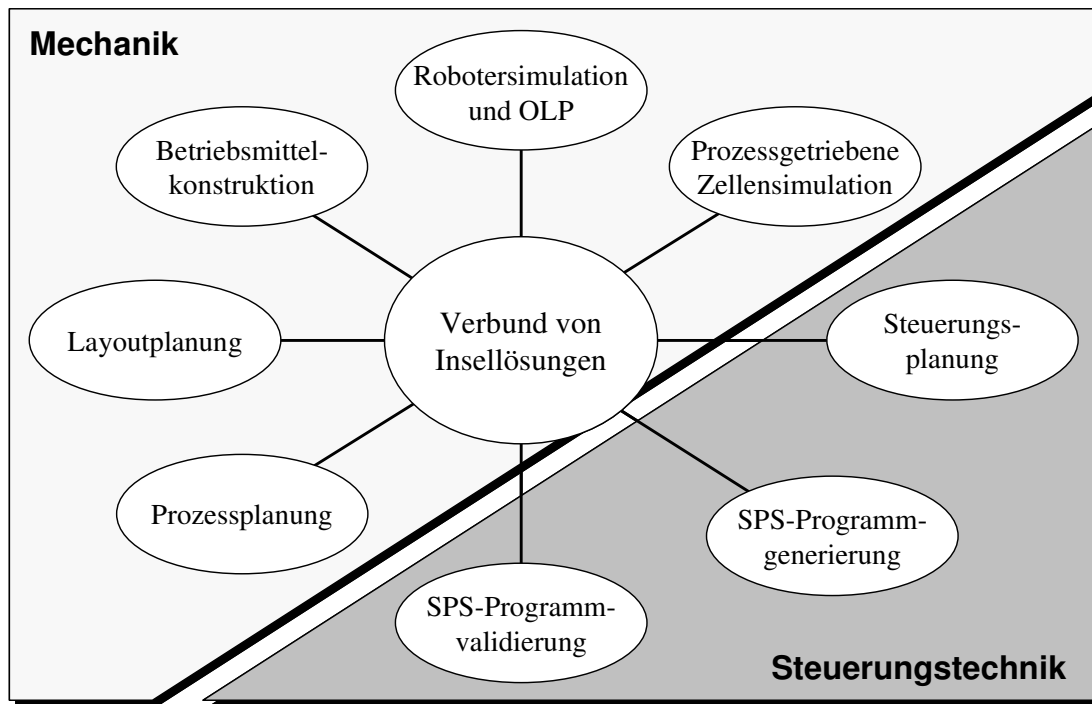


Abbildung 3-9: Unzureichende Integration zwischen den Planungsdomänen Mechanik und Steuerungstechnik

Neben der Problematik der unzureichenden Vernetzung zwischen den einzelnen Planungsapplikationen scheitern viele Einführungsversuche der Digitalen Fabrik auch an der fehlenden Berücksichtigung organisatorischer und menschlicher Aspekte. Nach Aussagen der an der TU München durchgeführten Studie „konzentrieren sich viele Unternehmen zu sehr auf die technologische Umsetzung der Digitalen Fabrik. Die organisatorischen und menschlichen Aspekte werden dabei häufig in den Hintergrund gestellt“ [KKSL06a]. Jedoch sind gerade diese beiden Faktoren von essentieller Wichtigkeit, da diese in erster Linie über den nachhaltigen Erfolg bzw. Misserfolg neuer Methoden, Prozesse und Softwarelösungen entscheiden. Aus diesem Grund müssen organisatorische Gegebenheiten sowie der Faktor Mensch von vornherein bei der Entwicklung neuer Methoden miteinbezogen werden [KiBB06b].

Neben der frühzeitigen Berücksichtigung der späteren Endanwender bei der Entwicklung neuer Methoden müssen insbesondere auch die Ausprägungen der zur Konzeptumsetzung benötigten IT-Werkzeuge bestimmten Anforderungen genügen. Diese beziehen sich insbesondere auf die Aspekte Stabilität, Funktionalität, Benutzerfreundlichkeit sowie eine mit dem jeweiligen Tool einhergehende Arbeitserleichterung (z.B. durchgängige Nutzung von Planungs- und Simulationsdaten). Die Erfüllung dieser systembezogenen Anforderungen stellt die Grundvoraussetzung für die spätere Anwenderakzeptanz dar. Jedoch weisen gerade die im Kapitel 3.4 aufgezeigten IT-Lösungen zur Steuerungsprojektierung und -absicherung in diesen Bereichen noch erhebliche Defizite auf.

4 Der Rohbau-Planungsprozess eines Nutzfahrzeugherstellers

Nachdem in den Kapiteln 2 und 3 sowohl die Grundlagen des Produktionsentstehungsprozesses als auch der aktuelle Stand der Technik bezüglich der Digitalen Fabrik vorgestellt wurden, wird in diesem Kapitel der derzeitige Rohbau-Planungsprozess eines Nutzfahrzeugherstellers kritisch beleuchtet. Dieser wird aus verschiedenen Blickwinkeln (aus Methoden-, IT-, Organisations- und Prozesssicht) anhand von Richtlinien und Gesprächen mit Vertretern der betroffenen Fachbereiche analysiert und bewertet. Ausgehend von den Ergebnissen dieser Ist-Analyse werden die gegenwärtigen Handlungsbedarfe identifiziert und die Anforderungen an eine rechnergestützte Rohbau-Planungsprozesskette abgeleitet. Die Evaluierung und anschließende Bewertung bestehender Lösungsansätze zur Verbesserung des Planungs- und Inbetriebnahmeprozesses bilden den Abschluss dieses Kapitels.

4.1 Unternehmensbereich und Rahmenbedingungen

Der hier betrachtete Unternehmensbereich, in dem Lastkraftwagen (LKW) in insgesamt drei verschiedenen Grundmodellen mit einer Vielzahl weiterer Untervarianten hergestellt werden, beschäftigt etwa 10.000 Mitarbeiter. Die Produktpalette reicht dabei von kleineren LKW mit einem Gesamtgewicht von 6,5 Tonnen bis hin zu großen, robusten Fahrzeugen, die vor allem im Fernverkehr, im schweren Verteilerverkehr sowie im Bauverkehr eingesetzt werden. Die Tagesproduktion liegt zwischen 390 und 400 Fahrzeugen, wobei etwa alle drei Minuten ein fertig montierter LKW die Endmontage verlässt.

Insgesamt zeichnet sich die Produktion durch eine hohe Eigenfertigungstiefe aus. Neben der Endmontage werden im betrachteten Werk sämtliche LKW-Fahrerhäuser im Gewerk Rohbau zusammengeschweißt, lackiert und mit den jeweiligen Interieurkomponenten (Cockpit, Sitze, Windschutzscheibe etc.) im Bereich „Montage Innenausbau“ komplett ausgestaltet. Parallel zum Innenausbau wird das Rückgrat eines jeden LKW, der Rahmen, gefertigt und mit den in anderen Werken hergestellten Komponenten des Antriebsstrangs (Achsen, Motor, Getriebe) vormontiert. Nach der „Hochzeit“, bei der das fertige Fahrerhaus auf den montierten Rahmen aufgesetzt wird, wird das Fahrzeug mit Betriebsstoffen gefüllt und für die Funktionsprüfung zum Rollenprüfstand befördert. Im letzten Produktionsschritt werden die LKW im so genannten „Finish“ mit etwaigem Sonderzubehör ausgestattet, bevor sie schließlich zur Auslieferung

dem Vertrieb übergeben werden. Eine schematische Übersicht über den werksbezogenen Produktionsablauf ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

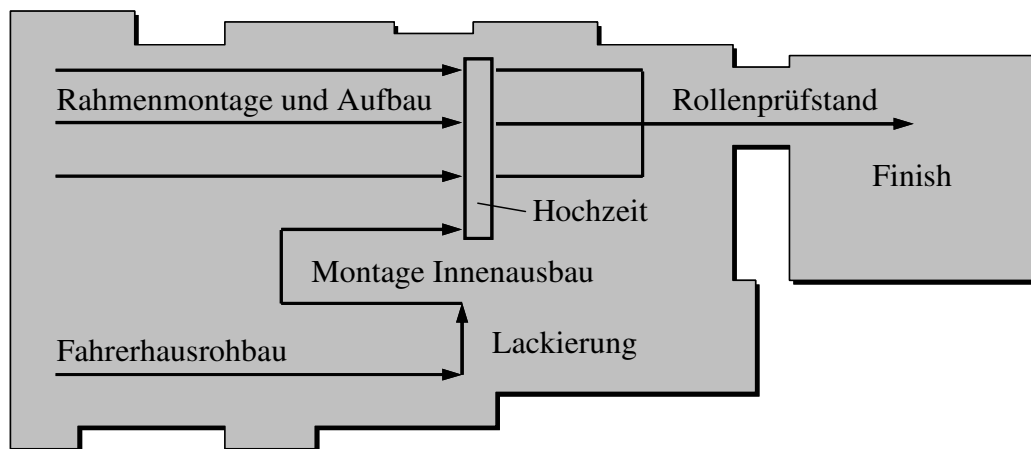


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des werksbezogenen Produktionsablaufs

Die produzierten LKW zeichnen sich durch eine immense Variantenvielfalt aus, da die Fahrzeuge fast ausschließlich individuell auf Kundenwunsch gefertigt werden. Von über 80.000 Fahrzeugen, die im betrachteten Werk jährlich hergestellt werden, sind statistisch gesehen nur etwa 1,8 Fahrzeuge identisch. Diese ausgesprochen hohe Produktvarianz hat direkte Auswirkungen auf die Produktionsgestaltung bzw. auf die Planung und Ausgestaltung der dort eingesetzten Produktionssysteme. Dies zeigt sich insbesondere im Fahrerhausrohbau. Nachdem die aus dem Presswerk stammenden Erzeugnisse im Bereich „Vorfertigung“ zu Baugruppen und Unterbaugruppen gefügt wurden, werden diese anschließend entlang der Fertigungsbereiche „Dach“, „Seitenwand“, „Rückwand“, „Vorbau“ und „Unterbau“ auf einer hochflexiblen, vollautomatisierten Produktionslinie zum LKW-Fahrerhaus zusammengeschweißt.

Die produktionsbezogenen Herausforderungen beziehen sich jedoch nicht nur auf die Neuplanung dieser hochkomplexen Fertigungssysteme. Aufgrund der langen produktbezogenen Lebenszyklen von etwa 15 Jahren und der großen Anzahl der in die laufende Produktion zu integrierenden Produktvarianten kommt vor allem der Änderungsplanung bzw. der produktionsbezogenen Serienbetreuung eine herausragende Bedeutung zu. Eine zentrale Herausforderung liegt hierbei in der schnellen und sicheren Integration neuer Fahrzeugvarianten und Produktkomponenten in die bereits existierenden Fertigungssysteme.

Im Gegensatz zur Produktionsplanung im PKW-Bereich, in der die detaillierte Ausgestaltung der Produktionssysteme in aller Regel an externe Anlagenbauer „fremdvergeben“ wird, differiert die Situation im betrachteten Unternehmensbereich. In Abhängigkeit von den zur Verfü-

gung stehenden Kapazitäten werden hier Teile der gesamten Anlagenprojektierung – sowohl Neu-, insbesondere aber Änderungsprojekte – intern abgewickelt. Nur bei größeren Gesamtprojekten werden externe Firmen beauftragt. Besonders hoch ist der Eigenleistungsanteil zellenbezogener Planungs- und Inbetriebnahmetätigkeiten im Fertigungsbereich „Vorfertigung“ des Fahrerhausrohbaus.

4.2 Vorgaben für den Produktentstehungsprozess

Ein allgemeiner Überblick über den werksbezogenen Produktentstehungsprozess ist in Form eines standardisierten bereichsübergreifenden Prozessleitfadens gegeben. Die hier dokumentierten Soll-Vorgaben zeigen die im Gesamtprozess involvierten Zuständigkeits- und Verantwortungsbereiche und stellen diesen die produkt- und produktionsbezogenen Prozessabläufe gegenüber. Zur Sicherstellung bzw. Verbesserung der Projekttransparenz sowie des Produkt- und Prozessreifegrades ist der Gesamtprozess in mehrere „Etappenziele“ untergliedert. Diese werden im industriellen Umfeld meist als „Meilensteine“, „Kontrollpunkte“ oder als „Quality Gates“ bezeichnet. An diesen vorgegebenen Prozesszeitpunkten wird der jeweilige Projektstatus durch den Vergleich zwischen Soll-Vorgaben und realisiertem Ist-Umfang anhand vordefinierter Messgrößen ermittelt und bewertet. Abhängig vom Ergebnis dieses „Reviews“ wird über das weitere Projektvorgehen entschieden. Historisch begründet liegt der Fokus dieses für alle Gewerke verbindlichen Prozessleitfadens, dessen wichtigste Phasen und Meilensteine in vereinfachter Form Abbildung 4-2 zu entnehmen sind, auf der Illustration des produktbezogenen Gesamtprozesses.

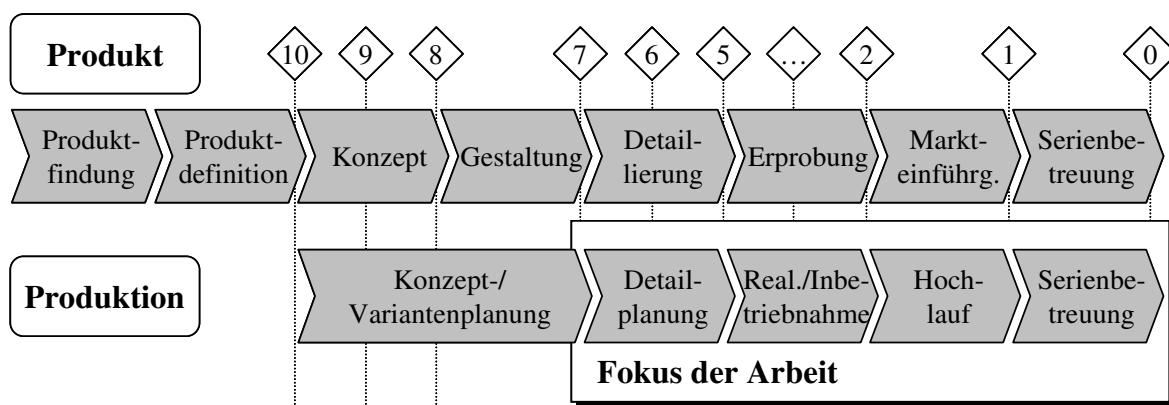


Abbildung 4-2: Vereinfachte Darstellung der Vorgaben für den Produktentstehungsprozess

Der werksbezogene Prozessleitfaden gewährt zwar einen Überblick über die an Planungsprojekten beteiligten Organisationseinheiten; die einzelnen Planungsaufgaben, ihre zeitliche Ein-

gliederung sowie ihre Ein- und Ausgangsgrößen sind dort jedoch für eine angemessene Ist-Analyse zu grob beschrieben. Aus diesem Grund müssen zur detaillierteren Informationsgewinnung weiterführende Datenerhebungsmethoden herangezogen werden. Neben der Analyse bereichsbezogener Verfahrensanweisungen und Handlungsrichtlinien wird der planungsbezogene Ist-Prozess vor allem mit Hilfe der beiden Erhebungsmethoden „Prozessbeobachtung“ und „Mitarbeiterinterviews“ ermittelt. Nach den in [Lucz98] publizierten Methoden der Arbeitsanalyse wird die Prozessbeobachtung als „offene, nicht-teilnehmende und systematische Fremdbeobachtung natürlicher Arbeitssituationen“ durchgeführt. Die Interviews erfolgen mit Hilfe der beiden Befragungstechniken „standardisierte Frage - nicht-standardisierte Antwort“ bzw. „nicht-standardisierte Frage - nicht-standardisierte Antwort“. Das Ergebnis dieser detaillierten planungsbezogenen Prozessanalyse wird im nachfolgenden Abschnitt näher erläutert.

4.3 Fachbereiche und Abläufe im Rohbau-Planungsprozess

Insgesamt erstreckt sich der zeitliche Rahmen für Neuplanungen der in dieser Arbeit betrachteten Rohbau-Fertigungszellen in Abhängigkeit vom Anlagenumfang, ihrer Komplexität und ihres Neuheitsgrades zwischen sechs Monaten und einem Jahr. Für zellenbezogene Umlanungen stehen den beteiligten Fachbereichen häufig nur wenige Wochen zur Verfügung. Der eigentliche Umrüst- und Wiederinbetriebnahmeprozess muss aufgrund des großen Zeitdrucks in aller Regel sogar innerhalb weniger Stunden bewerkstelligt werden. Für die Durchführung dieser geschilderten Tätigkeiten sind im betrachteten Unternehmensbereich mehrere Organisationseinheiten verantwortlich. So wird zur Planung und Inbetriebnahme einer Fertigungszelle ein Projektteam zusammengestellt, das sich aus Vertretern der Fachbereiche Fertigungsplanung, Betriebsmittelkonstruktion, Robotik/Simulation und Elektro-/Steuerungstechnik zusammensetzt. Die Anfertigung der einzelnen Anlagenkomponenten wird teilweise intern, teilweise von externen Dienstleistern durchgeführt. Produktionsbegleitende Änderungsplanungen erfolgen in aller Regel durch das intern vorhandene Fachpersonal.

Im Folgenden werden die gegenwärtigen fachbereichsbezogenen Prozessabläufe vorgestellt und ihre wichtigsten Ausprägungen erläutert. Dabei wird grundsätzlich zwischen dem eigentlichen Planungsprozess an sich und den zur Bewerkstelligung der einzelnen Aufgaben eingesetzten Hilfsmitteln unterschieden. Die unterstützenden Hilfsmittel werden wiederum in Methoden und Werkzeuge untergliedert. Während eine Methode nach [VDI2223] ein „planmäßiges Vorgehen zum Erreichen eines bestimmten Ziels“ beschreibt, stellen Werkzeuge IT-Systeme dar, die die Mitarbeiter bei der Durchführung ihrer individuellen Aufgaben unterstützen.

Aus Übersichtlichkeitsgründen erfolgen die Darstellungen der bereichsbezogenen Prozessabläufe sowie der sich daraus ergebende Gesamtprozess in einer zum Verständnis dieser Arbeit angemessenen Abstraktionsebene.

4.3.1 Fertigungsplanung

Neben der Erarbeitung des groben Anlagenkonzepts besteht das vorrangige Tätigkeitsfeld der Fertigungsplanung in den späteren Projektphasen (Detailplanung, Produktionsanlauf, Serienbetreuung) in der Projektkoordination und -steuerung. Im Rahmen der Konzeptplanung trägt der verantwortliche Fertigungsplaner zunächst die in der Produktentwicklung sowie die vom Vertrieb vorgegebenen Planungsprämissen zusammen, arbeitet diese aus und gibt sie als verbindliche Rahmenbedingungen an die in der Detailplanung involvierten Fachbereiche weiter. Beispiele für typische Planungsprämissen sind Budget- und Terminvorgaben, Mengengerüste sowie prozessrelevante Fertigungsdaten. Nach der Stücklistenverarbeitung bzw. der daraus resultierenden Entwicklung der prozessorientierten Fügefolge beginnt die Variantenplanung des jeweiligen Produktionssystems. Anhand verschiedener Bewertungskriterien (z.B. Kosten, Zeiten, Flächenbedarfe, Prozess- und Terminrisiken) werden die einzelnen Planungsalternativen miteinander verglichen und ausgehend davon das zu realisierende Anlagenkonzept festgelegt.

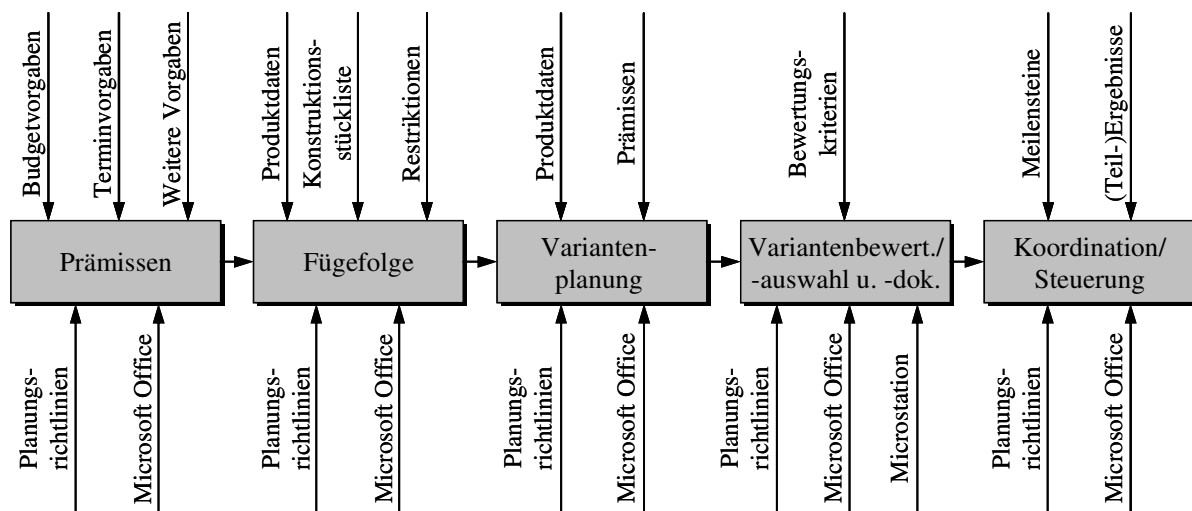


Abbildung 4-3: Aufgaben und Abläufe in der Fertigungsplanung

Die grundlegende Vorgehensweise zur Bewerkestellung der einzelnen Planungsschritte wird in mehreren bereichsbezogenen Planungsrichtlinien dokumentiert. Ein Teil dieser Richtlinien umfasst dabei allgemeine Grundlagen zur Produktionsplanung (z.B. Lean Konzepte), die übrigen Dokumentationen geben dem Fertigungsplaner Hilfestellungen zur inhaltlichen Abarbeitung der einzelnen Planungstätigkeiten. Als unterstützende IT-Werkzeuge werden entlang des

geschilderten Prozessablaufs vor allem die Büroanwendungen MS Excel, MS PowerPoint und MS Word verwendet. Die Dokumentation des fabrik- bzw. bereichsbezogenen Gesamtlayouts erfolgt mit Hilfe des in der Industrie gängigen IT-Systems Microstation. Abbildung 4-3 zeigt zusammengefasst die einzelnen Arbeitsschritte innerhalb der Fertigungsplanung und stellt zudem die zur Durchführung dieser Aktivitäten benötigten Eingangsgrößen (oben) sowie die dabei eingesetzten Hilfsmittel (unten) dar.

4.3.2 Betriebsmittelkonstruktion

Im Anschluss an die Festlegung des groben Anlagenkonzepts wird dieses im Rahmen der Betriebsmittelkonstruktion in Form eines CAD-basierten 3D-Zellenlayouts nachgebildet. Dieses manuell erstellte CAD-Layout dient als Eingangsdatensatz sowohl für die detaillierte Vorrichtungskonstruktion als auch für die parallel verlaufenden Roboteranalysen. Basierend auf den in der Planung festgelegten Prämissen (z.B. Kosten, Zeiten, Automatisierungsgrad), den Produktdaten (z.B. Geometrie, Schweißpunkte) und des gemeinsam mit der Produktentwicklung festgelegten Spann- und Fixierkonzeptes (SFK) trifft der Betriebsmittelkonstrukteur in einem weiteren Schritt eine Auswahl der mechanischen Zellenkomponenten. Anschließend fällt der zeitintensivste Teil der mechanischen Konstruktionstätigkeiten an: die Vorrichtungskonstruktion. Nach der Festlegung des grundlegenden Vorrichtungskonzepts wird die Gesamtvorrichtung in einem klassischen Bottom-Up-Verfahren sukzessive aufgebaut. Während dieses Konstruktionsprozesses legt der Betriebsmittelkonstrukteur neben den mechanischen Komponenten auch die der Teileerkennung dienenden elektrischen Betriebsmittel sowie die der Betriebsmittelansteuerung dienende Aktorik (z.B. Motoren, Zylinder) fest. Darüber hinaus trifft er die Entscheidung, welche Spanner zu welcher Zeit von welchem Ventil angesteuert bzw. wie viele Ventile insgesamt benötigt werden.

Unter Verwendung des entwickelten 3D-Vorrichtungsmodells und der zu diesem Zeitpunkt festgelegten Zellenkomponenten (z.B. Schutzzäune, Schaltschränke, Roboter) erstellt der Betriebsmittelkonstrukteur in einem weiteren Schritt ein detailliertes, jedoch rein mechanisches 3D-Zellenlayout. Auf dessen Basis werden die zur Komponentenfertigung bzw. die zur Elektro- und Steuerungsprojektierung notwendigen Arbeitsunterlagen erstellt. Hierzu zählen u. a. Vorrichtungs- und Zellenabläufe, Mechanikstücklisten, Pneumatikpläne und Fertigungszeichnungen. Diese werden im heutigen Prozess – in Abhängigkeit vom jeweiligen Konstrukteur – auf Basis unterschiedlicher Dokumentationsvorlagen in einem größtenteils sehr zeitaufwendigen Verfahren manuell angefertigt.

Während die grundlegende Vorgehensweise zur Vorrichtungskonstruktion in Form von Konstruktionsrichtlinien beschrieben ist, existieren zur Durchführung der übrigen Arbeitsschritte lediglich allgemeine Vorgaben. Die Ergebnisdokumentation, die insbesondere für die Elektro- und Steuerungsprojektierung einen wichtigen Eingangsdatensatz darstellt, obliegt den individuellen Präferenzen des jeweiligen Konstrukteurs. Dies bezieht sich zum einen auf die Form und die genauen Inhalte der einzelnen Dokumente und zum anderen auf die dafür eingesetzten IT-Werkzeuge. Während die Konstruktionsumfänge mit Hilfe des CAD-Systems CATIA V5 erfolgen, werden zur Ergebnisdokumentation vor allem gängige Büroanwendungen (z.B. MS Excel, MS PowerPoint, MS Word) verwendet. Eine Übersicht über die in der Betriebsmittelkonstruktion durchgeführten Haupttätigkeiten sowie die zur Unterstützung eingesetzten Hilfsmittel ist in Abbildung 4-4 gegeben.

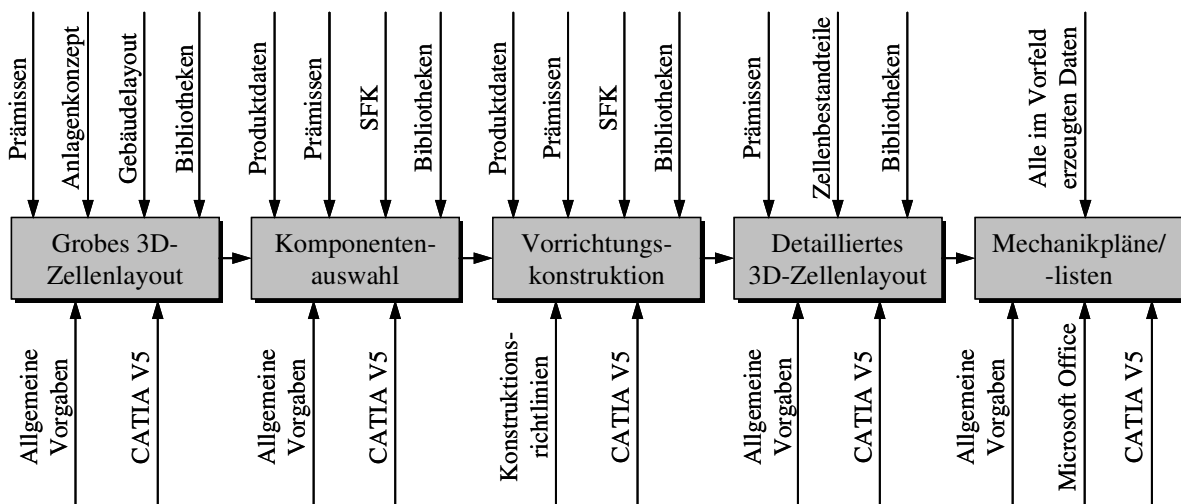


Abbildung 4-4: Aufgaben und Abläufe in der Betriebsmittelkonstruktion

4.3.3 Robotik/Simulation

Parallel zur detaillierten Vorrichtungsentwicklung findet im Fachbereich Robotik/Simulation die 3D-gestützte Roboterprogrammierung statt. In einem ersten Schritt werden dazu die später eingesetzten Roboter und die zur Verrichtung der jeweiligen Aufgaben benötigten Werkzeuge (z.B. Schweißzangen, Greifwerkzeuge) aus vorliegenden Bibliotheken ausgewählt. Nachdem die steuerungsbezogenen Aufgabenumfänge zwischen den Robotern und der Zellen-SPS – in Absprache mit Vertretern des Fachbereichs Elektro-/Steuerungstechnik – festgelegt wurden, wird mit der Roboterprogrammierung begonnen. Dabei handelt es sich um ein stark iteratives Vorgehen. Zum einen muss gewährleistet sein, dass der Roboter mit seinen jeweiligen Werkzeugen die vorgegebenen Arbeitspunkte kollisionsfrei anfahren kann; zum anderen ist ein kollisionsfreies Zusammenspiel mit den in der Betriebsmittelkonstruktion entwickelten Vorrich-

tungs- und Zellenkomponenten sicherzustellen. Diese Zugänglichkeitsanalysen werden in der Regel in mehreren aufeinander aufbauenden Schritten durchgeführt. Das Anwendungsgebiet dieser 3D-gestützten Simulationsuntersuchungen erstreckt sich dabei von einfachen Punkt-zu-Punkt-Bewegungen bis hin zur Analyse vollständiger Verfahrwege. Nachdem die Zugänglichkeit sichergestellt wurde, erfolgt die Festlegung der jeweils detaillierten Roboterprofile (z.B. Beschleunigungen). Anschließend erfolgt die modellbasierte Offline-Programmierung (OLP). Diese so erzeugten Roboterprogramme werden parallel zum Aufbau der jeweiligen Anlagenkomponenten in die Robotersteuerungen geladen und müssen anschließend lediglich an die realen Gegebenheiten angepasst werden.

Zur Bewerkstelligung der komplexen Planungsaufgaben werden im hier betrachteten Fachbereich 3D-gestützte Simulationsmethoden (z.B. DMU, Robotersimulationen) eingesetzt. Zum einen dienen diese der Kollisionsüberprüfung bei Zugänglichkeitsuntersuchungen und zur Ermittlung genauer Taktzeiten. Zum anderen werden sie als Basis zur interaktiven Roboterprogrammierung verwendet. Das prinzipielle Vorgehen zur Durchführung der einzelnen Arbeitsschritte ist in allgemeinen Richtlinien und Vorgaben beschrieben. Als zentrales IT-Werkzeug wird im Fachbereich Robotik/Simulation, wie in Abbildung 4-5 dargestellt, das 3D-basierte Robotersimulations- und -programmiersystem IGRIP D5 bzw. das roboterspezifische Zusatzmodul RRS 1 verwendet.

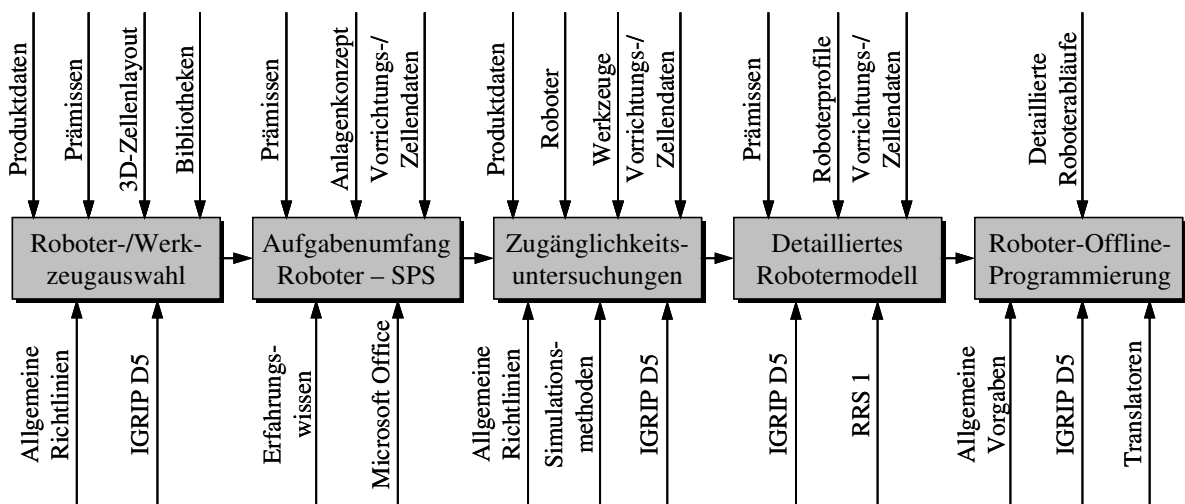


Abbildung 4-5: Aufgaben und Abläufe im Fachbereich Robotik/Simulation

4.3.4 Elektro-/Steuerungstechnik

Im heute größtenteils sequentiell verlaufenden Planungsprozess beginnt die elektrische bzw. steuerungstechnische Zellenprojektierung erst dann, wenn die zeitlich vorgelagerten Fachbe-

reiche ihre Tätigkeiten abgeschlossen haben. Basierend auf den in der Betriebsmittelkonstruktion und im Fachbereich Robotik generierten Daten findet zunächst die zellenbezogene Elektrokonstruktion statt. Hierbei werden in einem größtenteils manuellen, zeitaufwendigen Prozess Elektropläne (Stromlaufpläne, Schaltschranklayouts etc.) und -stücklisten sowie die zur SPS-Projektierung erforderliche Signalliste erstellt. Im Rahmen der Steuerungsprojektierung werden in einem ersten Schritt die steuerungsbezogenen Hardwarekomponenten konfiguriert, bevor mit dem zeitintensivsten Teil, der SPS-Programmierung, begonnen wird. Als Eingangsdaten benötigt der Steuerungstechniker hierfür den in der Betriebsmittelkonstruktion definierten Zellenablauf, die dort erstellten Vorrichtungspläne (Pneumatik-, Verriegelungsplan) sowie die im Vorfeld erzeugte Signalliste. Die ressourcenspezifischen SPS-Programmbausteine werden als standardisierte Bibliothekselemente bereitgestellt. Basierend auf dem fertig gestellten SPS-Projekt wird in einem nächsten Schritt die Projektierung des zellenbezogenen Bedienfeldes (HMI) durchgeführt. Hierzu kann der größte Teil aus dem vorhandenen SPS-Projekt automatisiert abgeleitet werden. Kleinere Umfänge (z.B. Oberflächenlayout) sind hingegen manuell zu erstellen. Das Testen und Verbessern der SPS- und HMI-Software findet ebenso wie die Schulung des später eingesetzten Bedienpersonals erst während der Inbetriebnahme an der realen Fertigungszelle statt.

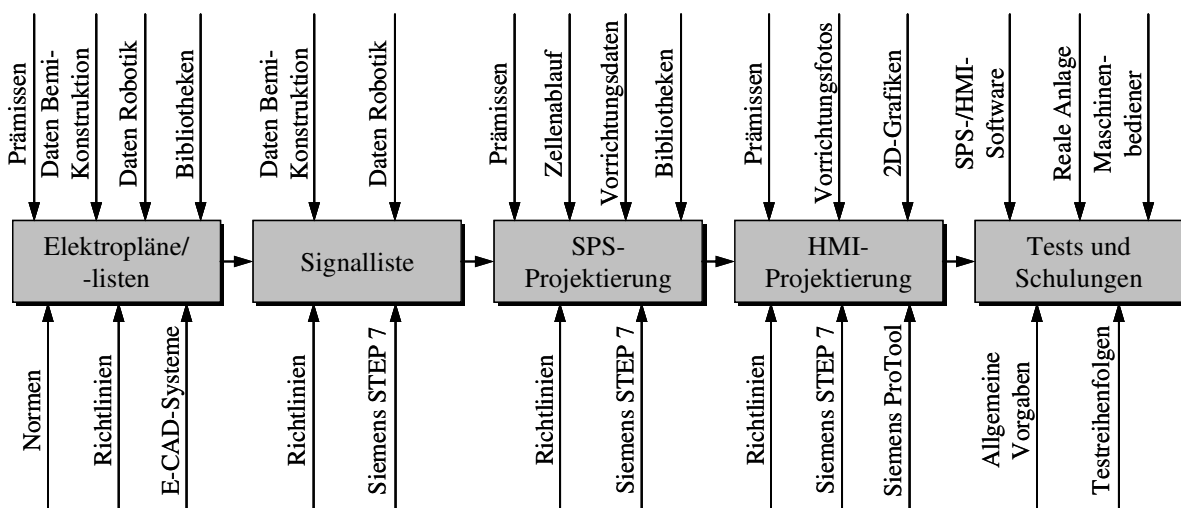


Abbildung 4-6: Aufgaben und Abläufe in der Elektro-/Steuerungstechnik

Aktuell laufen im betrachteten Unternehmensbereich eine Reihe elektro- und steuerungstechnischer Standardisierungsbestrebungen. Bis dato existierten zur Durchführung und Dokumentation der in Abbildung 4-6 dargestellten Arbeitsschritte lediglich allgemeingültige werksspezifische Richtlinien und gesetzlich vorgeschriebene Normen. Diese beziehen sich u. a. auf den Bereich Elektrokonstruktion, auf die SPS-Programmstruktur und auf die zur Steuerungspro-

grammierung verwendeten SPS-Programmiersprachen. Die Ergebnisdokumentation obliegt in weiten Teilen den individuellen Präferenzen des projektbetreuenden Mitarbeiters. Während für die Elektrokonstruktion und -dokumentation verschiedene E-CAD-Systeme bzw. die Büroanwendung MS Excel verwendet werden, finden für alle steuerungsbezogenen Tätigkeiten die Siemens-Produkte STEP 7 (für die SPS-Programmierung) und ProTool (für die HMI-Projektierung) flächendeckenden Einsatz.

Die angesprochenen Standardisierungsbestrebungen verfolgen das Ziel, sowohl die Abläufe als auch die in der Elektro- und Steuerungsprojektierung verwendeten Komponenten und Beschreibungsformen projektübergreifend zu vereinheitlichen. Diese Standardisierungen betreffen nicht nur die Ergebnisdokumentationsformen, sie beziehen sich ebenso auf die für die Dokumentationserstellung eingesetzten Softwarewerkzeuge.

4.3.5 Gesamtprozess

Eine zusammenfassende Übersicht über den planungsbezogenen Gesamtprozess ist, fokussiert auf die Abläufe innerhalb der detaillierten Zellenplanung, in Abbildung 4-7 gegeben. Auf Basis der in der Konzeptplanung zusammengetragenen Planungsprämissen und dem dort festgelegten Anlagenkonzept beginnen die verschiedenen Fachbereiche mit ihren Arbeiten zu unterschiedlichen Prozesszeitpunkten. Während die für die Mechanikkonstruktion und Roboterprogrammierung verantwortlichen Fachbereiche bereits relativ früh im Zellenplanungsprozess integriert sind, wird der Fachbereich Elektro-/Steuerungstechnik hingegen erst sehr spät in den Gesamtprozess miteinbezogen.

Zur Sicherstellung bzw. Erhöhung der Projekttransparenz und -qualität werden an den in der Abbildung 4-7 dargestellten Meilensteinen die aktuellen Projektstände anhand vorgegebener Messkriterien ermittelt. Die durch Zahlen repräsentierten Haupt-Meilensteine sind durch den vorgegebenen Werksprozess (Kapitel 4.2) verbindlich festgelegt. Weitere projektspezifische Meilensteine werden von der Fertigungsplanung vorgegeben. Der Informationsaustausch zwischen den einzelnen Fachbereichen erfolgt meist bilateral über den direkten Weg. Da die Erstellung des detaillierten Zellenlayouts in enger Zusammenarbeit zwischen den beiden Fachbereichen Betriebsmittelkonstruktion und Robotik/Simulation erfolgt, herrscht hier ein angemessen reger Informationsaustausch. Ein eher eingeschränkter Austausch findet hingegen an der organisatorischen Schnittstelle zwischen der Mechanikkonstruktion und der Elektro-/Steuerungsprojektierung statt. Historisch begründet ist dieser ist in der Regel auf das Austauschen von Papierdokumenten sowie auf einige wenige Abstimmungsgespräche beschränkt.

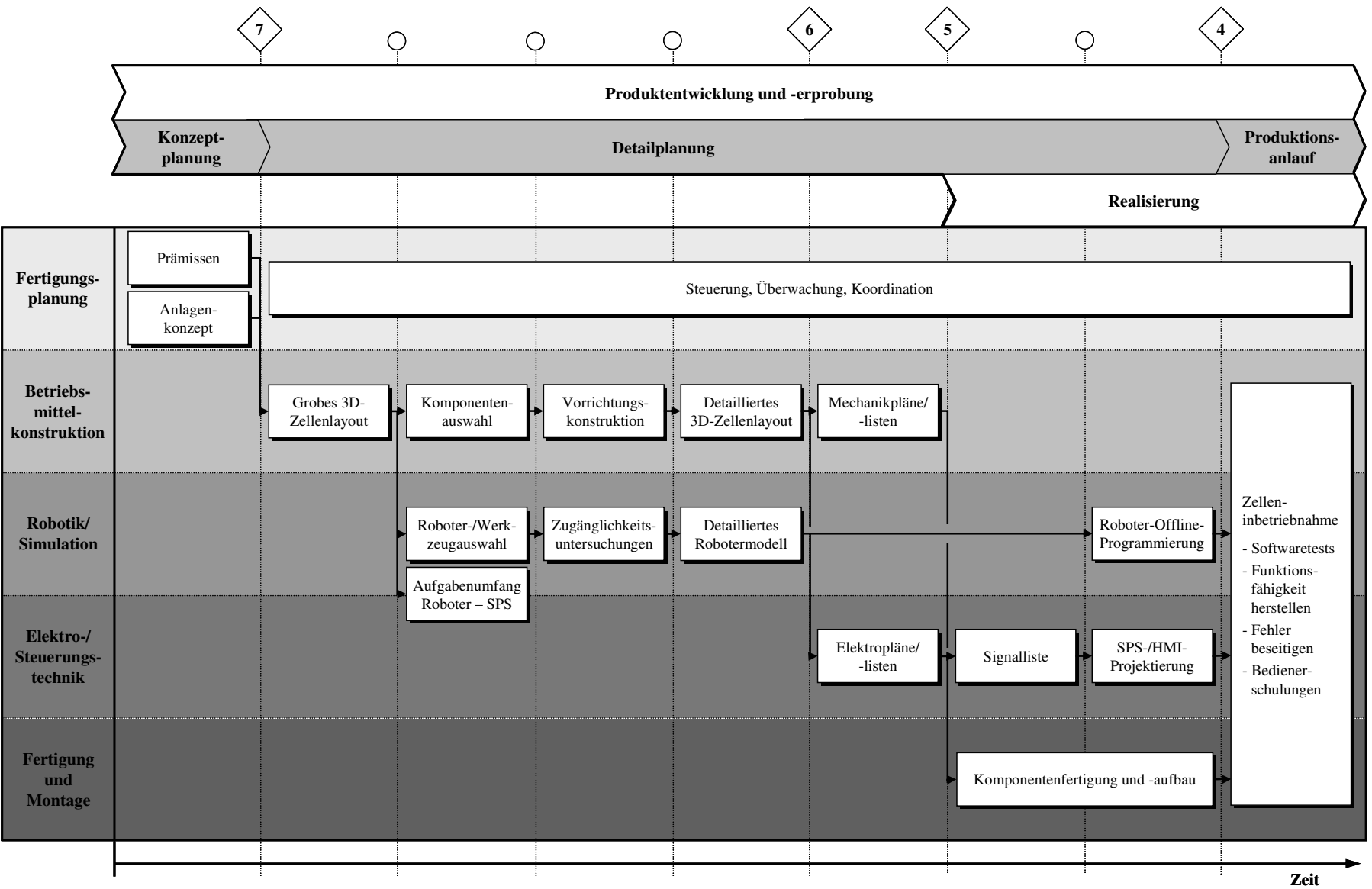


Abbildung 4-7: Vereinfachte Darstellung des Planungsprozesses von Rohbau-Fertigungszellen

Auf Grundlage der in der Betriebsmittelkonstruktion erstellten Ergebnisdokumentationen findet parallel zur SPS-Projektierung die anlagenbezogene Komponentenfertigung statt. Im Anschluss daran werden die mechanischen, elektrischen und steuerungstechnischen Anlagenbestandteile in der Produktionshalle sukzessive aufgebaut. Im Rahmen der Zelleninbetriebnahme werden, wie in Kapitel 2.3 erläutert, die einzelnen Anlagenkomponenten schließlich miteinander vernetzt und ausgehend davon die komponenten- bzw. zellenbezogene Funktionsfähigkeit hergestellt. Das Testen, Anpassen und Optimieren der SPS-Programme, die im Regelfall erst während der Inbetriebnahme fertig gestellt werden, erfolgt dabei unter Verwendung von Testreihenfolgen und standardisierten Checklisten anhand der realen Fertigungszelle. Die durchschnittliche Zeitdauer einer Zelleninbetriebnahme beträgt zwischen drei und sechs Monaten. Ein Großteil dieser Zeit entfällt auf die Beseitigung von Fehlern, deren Ursachen meist aus der elektro- und steuerungstechnischen Produktionsplanung sowie aus bereichsübergreifenden Kommunikationsproblemen resultieren.

Dass sich diese Erkenntnisse nicht nur auf den hier betrachteten Unternehmensbereich beziehen, sondern als repräsentativ für diese Branche anzusehen sind, belegt eine im Rahmen des BMBF-Projektes „Ramp-Up/2“ durchgeführte Studie [DeAm06]. Demnach sind sogar bis zu 40 Prozent aller Anlaufprobleme auf Missverständnisse, unzureichende Absprachen sowie auf bereichsübergreifende Kommunikationsprobleme zurückzuführen. Im Anschluss an die Behebung der während der Inbetriebnahme aufgetretenen Fehler wird das Produktionssystem sukzessive bis zur Kammlinie (maximale Produktionskapazität) hochgefahren und anschließend für die Serienproduktion verwendet.

4.4 Defizite in der heutigen Planungsprozesskette

Basierend auf den im Rahmen der Prozessanalyse gewonnenen Erkenntnissen lassen sich im Wesentlichen sechs Handlungsfelder identifizieren, die aufgrund der vorgenommenen Ergebnisabstraktion jedoch nicht ausschließlich für den analysierten Unternehmensbereich gelten. Vielmehr sind diese Erkenntnisse auch auf andere Unternehmen der Branche übertragbar.

Sequentielle Arbeitsweise mit einer Vielzahl redundanter Arbeitsunterlagen

Wie in Abbildung 4-7 dargestellt, ist der heutige Rohbau-Planungsprozess durch eine weitestgehend sequentielle Abarbeitung der Planungsaufgaben gekennzeichnet. Aufgrund der späten Integration der Elektro-/Steuerungstechnik in den Gesamtprozess steht den dort involvierten Mitarbeitern zur Bewerkstellung der Aufgabenumfänge nur sehr wenig Zeit zur Verfügung.

Verschärft wird diese Situation durch stetig kürzer werdende Planungszyklen und zunehmend komplexere Produktionssysteme. Eine Informationsrückführung aus der Elektro-/Steuerungstechnik in die zeitlich vorgelagerte Mechanikkonstruktion findet heute zumeist nicht statt. Die unzureichende Integration des für die Elektro- und Steuerungstechnik verantwortlichen Fachbereichs in die früheren Planungsphasen ist jedoch nur ein Aspekt, der einem beschleunigten Gesamtprozess entgegenwirkt. Ein weiterer ist die größtenteils äußerst zeitintensive, manuelle Erstellung von Dokumentationsunterlagen. Da im zellenbezogenen Rohbau-Planungsprozess bis dato nur wenige bereichsinterne bzw. keine bereichsübergreifenden Standards existieren, werden heute eine Vielzahl unterschiedlicher Dokumente mit oftmals redundanten Inhalten in mehreren IT-Systemen erzeugt und verwaltet. Änderungen, deren Organisation eine zentrale Herausforderung in heutigen Planungsprozessen darstellt, werden in aller Regel nicht in alle relevanten Arbeitsunterlagen gleichermaßen rückdokumentiert. Ein asynchrones Arbeiten auf Basis unterschiedlicher Datenstände ist die Folge.

Heterogene, bereichsspezifische Planungsmethoden

Zur Durchführung der einzelnen Planungsaktivitäten stehen den im Rohbau-Planungsprozess involvierten Fachbereichen neben einer Vielzahl unterschiedlicher IT-Werkzeuge auch einige bereichsspezifische „Methodenhandbücher“ zur Verfügung. Diese recht allgemein gehaltenen technischen Methodenbeschreibungen beziehen sich dabei sowohl auf Neu- als auch auf Änderungsplanungen und liegen in Form von Verfahrensanweisungen und Handlungsrichtlinien vor. Einige Planungsaufgaben werden demnach „vom Groben ins Feine“ abgearbeitet (Zellenkonzept, Roboterprogrammierung etc.), anderen liegt hingegen ein klassischer Bottom-Up-Ansatz zugrunde. Als Beispiele hierfür sind die Vorgehensweise innerhalb der Vorrichtungskonstruktion sowie das Erstellen und Testen von Steuerungsprogrammen zu nennen. Darüber hinaus existieren zwar einige weiterführende Aufgabenbeschreibungen; jedoch sind diese zum einen stets bereichsbezogen und lassen dem Anwender zum anderen aufgrund ihrer allgemeinen Inhalte einen großen Handlungsspielraum offen. Ein standardisiertes, durchgängiges und bereichsübergreifendes Planungsvorgehen existiert bis heute nicht. Wichtige Synergieeffekte können aufgrund dieser Tatsache nicht erschlossen werden. Zeitaufwendige Rücksprachen sowie kostspielige Missverständnisse sind die Folge.

Keine system- bzw. bereichsübergreifende Datendurchgängigkeit

Eines der größten Probleme im heutigen Rohbau-Planungsprozess stellt die Inkompatibilität der dort eingesetzten IT-Werkzeuge dar. Diese basieren zumeist auf unterschiedlichen Daten-

modellen, was einem reibungslosen systemübergreifenden Datenaustausch entgegenwirkt. Ein durchgängiges Datenmanagement bzw. eine einheitliche bereichsübergreifende Kommunikationsplattform existiert bis dato nicht. Vielmehr werden Planungsdaten papierbasiert bzw. in sehr aufwendigen „Downloadprozessen“ zwischen den einzelnen Fachbereichen ausgetauscht. Wie Abbildung 4-8 zu entnehmen ist, geht jedoch an jedem Übergang zwischen inkompatiblen IT-Systemen ein Teil der im Vorfeld erzeugten Informationen und somit auch ein Teil des zuvor generierten Wissens verloren. Dieses muss in der Regel in manuellen, zeitaufwendigen Prozessen wiederhergestellt werden.

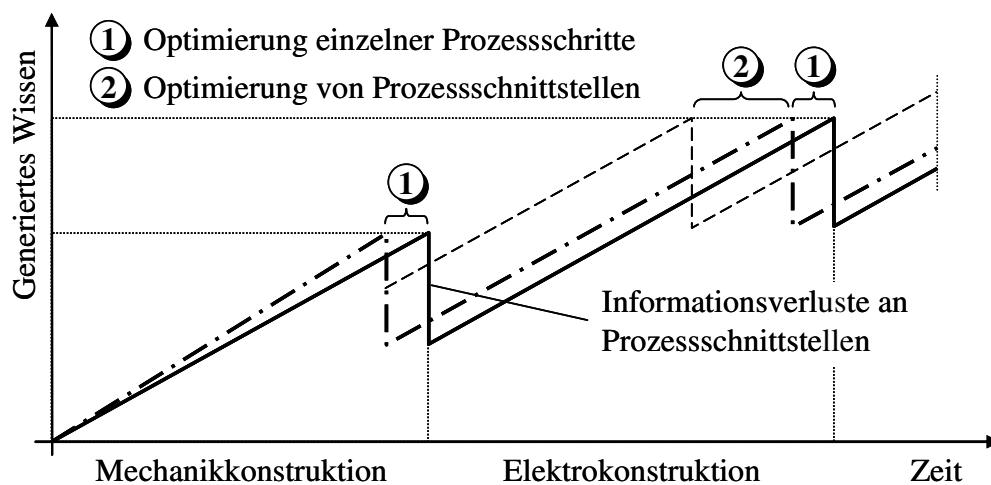


Abbildung 4-8: Informationsverluste an Prozessschnittstellen nach [BVDW04]

Zeitaufwendige, unstrukturierte SPS-Programmerstellung

Aufgrund des heute größtenteils sequentiell verlaufenden Planungsprozesses und der ständig kürzer werdenden Planungsintervalle findet die SPS-Projektierung unter einem enormen Zeitdruck statt. Bei der SPS-Programmerstellung handelt es sich heute um einen manuellen, zeitintensiven Prozess, dessen Eingangsdaten zumeist in Form redundanter und inkonsistenter Papierdokumentationen vorliegen. Viele Rückfragen, Fehlinterpretationen und fehlerhafte SPS-Programme, die nach [ZäWü05, DeAm06] eine zentrale Ursache für zeitverzögerte Inbetriebnahmen darstellen, sind die logische Folge. Erschwerend kommt hinzu, dass die für die SPS-Programmierung benötigten Dokumente in aller Regel nicht dem aktuellen Planungsstand entsprechen. Aus diesem Grund werden die meisten SPS-Programme, deren Aufbau von den individuellen Präferenzen des jeweiligen Sachbearbeiters abhängen, erst während der Inbetriebnahme anhand des realen Produktionssystems komplettiert. Die SPS-Programmierung und die anschließende Inbetriebnahme zählen nicht nur zu den zeitaufwendigsten Aktivitäten, sondern stellen zudem den Haupt-Kostentreiber in der Steuerungstechnik dar (Abbildung 4-9).

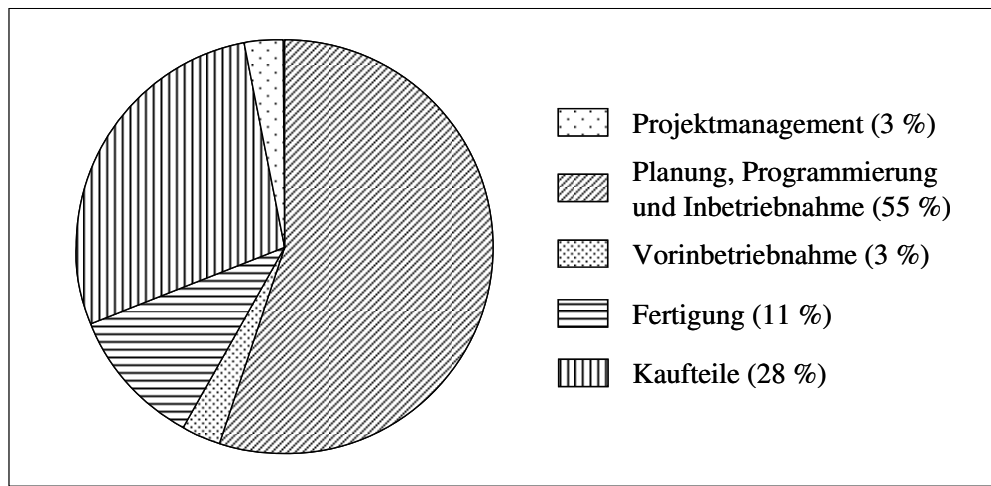


Abbildung 4-9: Kostenstruktur in der Steuerungstechnik nach [Hirz07]

Verzögerte Inbetriebnahmeprozesse mit mangelhafter Softwarequalität

Im Anschluss an die Komponentenfertigung und deren Aufbau findet parallel zur SPS-/HMI-Projektierung die Anlageninbetriebnahme statt. Hier werden die SPS-Programme komplettiert und getestet sowie die dabei auftretenden Fehler im Zusammenspiel mit den realen Anlagenkomponenten – auf Kosten verzögerter Inbetriebnahmeprozesse – beseitigt. Aufgrund vorgegebener strikter Terminpläne steht dem Inbetriebnahmepersonal für Softwaretests und -optimierungen jedoch nur wenig Zeit zur Verfügung. In dieser Zeit müssen weiterhin die SPS-bezogenen Sicherheitskonzepte überprüft und gegebenenfalls optimiert sowie das später eingesetzte Bedienpersonal an der realen Anlage eingewiesen werden. Das Ergebnis dieser äußerst hektischen „Baustellenarbeiten“ spiegelt sich zumeist in suboptimalen Lösungen mit unzureichender Softwarequalität und unvollständigen Softwaredokumentationen wider.

Lange Stillstandszeiten bei Um- bzw. Erweiterungsplanungen

Wie in Kapitel 4.1 erläutert, kommt in der betrachteten Branche der produktionsbezogenen Serienbetreuung eine herausragende Bedeutung zu. Das zentrale Ziel besteht dabei in der Realisierung schneller und stabiler Produktintegrationen in die bestehenden Produktionssysteme. Zwischen Anspruch und Wirklichkeit klafft jedoch eine große Lücke. Heutige Integrationsprozesse stellen in der Regel sehr zeitintensive und aufgrund des großen Zeitdrucks sehr hektisch verlaufende und dadurch fehleranfällige Aktivitäten dar. Die Ursachen hierfür sind meist in den zuvor durchgeführten Änderungsplanungen zu finden. Diese basieren häufig auf veralteten, unvollständigen sowie unstrukturierten Datenbeständen, da produktionsbezogene Änderungen oftmals nicht bzw. nur unzureichend rückdokumentiert werden. Hieraus resultierende Fehler werden erst während des Umrüst- und Wiederanlaufprozesses an der realen Anlage er-

kannt und müssen unter erschwerten Bedingungen beseitigt werden. Lange, kostspielige Stillstandszeiten bzw. zeitlich verzögerte Wiederanläufe sind die Folge.

4.5 Anforderungen an eine rechnergestützte Rohbau-Planungsprozesskette

Ausgehend von den im vorigen Abschnitt beschriebenen Defiziten heutiger Planungsprojekte ergeben sich eine Reihe von Anforderungen, die an eine zukünftige Rohbau-Planungsprozesskette zu stellen sind. Das übergeordnete Ziel liegt dabei in der Realisierung beschleunigter Planungs- und Anlaufprozesse mit dem Ergebnis höherer Anlagenreifegrade (Soft-, Hardware) zum Produktionsbeginn bzw. während des Produktionsbetriebs. Hierzu werden auf der einen Seite neue bereichsübergreifende Planungsmethoden benötigt, die unter Beachtung der in Tabelle 4-1 aufgeführten methodischen Anforderungen zu entwickeln sind. Die softwaretechnische Umsetzung dieser Methoden impliziert auf der anderen Seite das Vorhandensein geeigneter IT-Werkzeuge, die an die gegebenen methodischen Anforderungen anzupassen sind. Die praxisbezogenen Anforderungen an solche IT-Systeme sind – untergliedert in anwender- und unternehmensbezogene Anforderungen – ebenfalls Tabelle 4-1 zu entnehmen.

Methoden	IT
• Unterstützung/Förderung des Simultaneous Engineering (frühzeitige Integration der Elektro-/Steuerungstechnik in den Gesamtprozess) • Verbesserung der interdisziplinären Zusammenarbeit (insbes. zwischen Mechanikkonstruktion und Elektro-/SPS-Projektierung) • Effektivitätssteigerung durch die Verwendung bereichsübergreifender Standards • Einheitliches und durchgängiges Dokumentations- und Änderungsmanagement • Unterstützung bei der SPS-Programmerstellung • Softwaretests und -optimierungen im Vorfeld der Anlageninbetriebnahme • Wissensspeicherung von Planungs-/Produktionserfahrungen für Folgeprojekte • Berücksichtigung vorhandener IT-Werkzeuge sowie prozessualer/organisatorischer Gegebenheiten	<u>Anforderungen von Anwenderseite:</u> • Einfache/intuitive Bedienbarkeit („Usability“), Stabilität, Performance • Automatismen zur Arbeitserleichterung (z.B. für SPS-Programmierung) • Datendurchgängigkeit zu vor-/nachgelagerten IT-Systemen • Transparente Informationsstrukturierung
	<u>Anforderungen von Unternehmensseite:</u> • Integration in bestehende Systemlandschaften (offene Systemschnittstellen) • Anpassbarkeit an zukünftige Entwicklungen, Modularität • Positive Wirtschaftlichkeit (positives Aufwand-Nutzen-Verhältnis)

Tabelle 4-1: Methodische und informationstechnische Anforderungen

Der nachhaltige Erfolg neuer Planungsstrategien hängt jedoch nicht nur von der Erfüllung methodischer und softwaretechnischer Anforderungen ab. Bei der Entwicklung neuer innovativer Planungslösungen müssen zudem die in der betrachteten Branche bzw. die im betrachteten Unternehmensbereich geltenden prozessualen und organisatorischen Randbedingungen berücksichtigt werden. Diese spielen insbesondere bei der Einführung einer neu entwickelten Planungsmethode eine entscheidende Rolle. Aufgrund des zunehmenden Zeit- und Kostendrucks liegt daher eine weitere Anforderung in der Erarbeitung einer adäquaten Strategie, die eine möglichst aufwandsarme Methodeneinführung unterstützt.

4.6 Bestehende Lösungsansätze

Im Hinblick auf die im Kapitel 4.5 aufgelisteten Anforderungen werden im Folgenden existierende Lösungsansätze vorgestellt und hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit bewertet. Da bis dato noch keine umfassende Gesamtlösung entwickelt werden konnte, die allen gestellten Anforderungen genügt, fokussieren diese Ansätze lediglich einzelne Teilaspekte der zu betrachtenden Gesamtprozesskette. So konnten beispielsweise im Rahmen der Digitalen Fabrik eine Reihe punktueller Lösungen entwickelt werden, die jedoch alle die im Kapitel 3.5 beschriebenen Defizite aufzeigen. Dies gilt insbesondere für die existierenden Softwareprodukte, die eine modellbasierte Validierung zellenspezifischer SPS-Programme ermöglichen. Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, kranken die hierzu entwickelten IT-Werkzeuge nicht nur an konzeptionellen Defiziten. Weitere Problemfelder liegen darüber hinaus in der fehlenden bereichsübergreifenden Datenintegration sowie im hohen manuellen Erstellungsaufwand der für die virtuelle Inbetriebnahme notwendigen Simulationsmodelle. Neben der Analyse heute existierender Softwarelösungen zum Funktionstest von SPS-Programmen werden in dieser Arbeit weiterhin bestehende Ansätze zur Unterstützung bei der SPS-Programmerstellung evaluiert. Die wichtigsten Ergebnisse aus diesen Untersuchungen werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt und hinsichtlich ihrer individuellen Vor- und Nachteile zusammenfassend bewertet.

4.6.1 Ansätze zur automatisierten SPS-Programmgenerierung

Zu den wichtigsten repräsentativen Ansätzen, die eine automatisierte Generierung von SPS-Programmen ermöglichen, zählen unter anderem:

„UML-Methode“ (DFG-Projekt DisPA: Distributed Process Automation)

Im Rahmen des Forschungsprojektes DisPA wird eine objektorientierte Methodik entwickelt, die auf Basis eines abstrakten, systemneutralen Modells eine automatisierte Generierung eines

ablauffähigen SPS-Programmcodes ermöglicht [WiVo04]. Die Erstellung dieses Basismodells geschieht hierbei unter Verwendung der formalen Beschreibungssprache UML (Unified Modeling Language) bzw. mittels einer an die speziellen Bedürfnisse der Steuerungstechnik angepassten UML-Erweiterung (UML-PA). Durch den Einsatz von UML ist ein modularer und strukturierter Modellaufbau gegeben. Ebenso können standardisierte und wieder verwendbare Softwarekomponenten zugunsten beschleunigter und transparenter Engineeringprozesse verwendet werden. Umgesetzt wird das Konzept dieser UML-basierten SPS-Programmgenerierung anhand eines einfachen Laboraufbaus einer Sortieranlage. Mit Hilfe eines proprietär entwickelten Software-Translators wird das UML-Modell in IEC 61131-3 konformen SPS-Code übersetzt, der anschließend in Form eines strukturierten Textes (ST) in die Programmierumgebung CoDeSys der Firma 3S eingelesen wird [WiVo04].

Trotz vieler Vorteile, die eine durch die UML gegebene objektorientierte Modellerstellung bietet, dürfen die mit diesem Ansatz einhergehenden Nachteile nicht unberücksichtigt bleiben. So müssen beispielsweise – im Gegensatz zur herkömmlichen SPS-Programmerstellung – einige zusätzliche zeitintensive Prozessschritte durchgeführt werden. Diese beziehen sich insbesondere auf die Erstellung des UML-Modells sowie auf die Programmierung des für die automatisierte Code-Generierung benötigten Software-Translators. Als eine weitere Schwäche dieses Projektierungsansatzes wird sowohl in [FiVo02] als auch in [WiVo04] auf die fehlende bzw. stark eingeschränkte Transparenz der erzeugten SPS-Programme und auf den fehlenden „Rückweg“ modifizierter SPS-Programme in das UML-Modell hingewiesen. Hinzu kommt, dass die hier entwickelte „UML-Methode“ bis dato erst anhand kleinerer Beispielprojekte erprobt wurde. Eine Anwendung dieser Methode auf größere Referenzprojekte steht noch aus.

BMBF-Projekt MODALE (Modellbasiertes Anlagenengineering)

Fokus des BMBF-Projekts MODALE bildet der unternehmensübergreifende Datenaustausch zwischen den am Planungsprozess einer automatisierten Produktionsanlage beteiligten Fachbereichen [MODA05]. Hierzu wird ein „ontologiebasiertes Referenzmodell“ entwickelt, das – eingebettet in eine technische Infrastruktur – als zentrale Datendrehscheibe fungiert. Auf Basis dieses technischen Rahmenwerks werden Daten aus den im Planungsprozess eingesetzten IT-Werkzeugen exportiert und über „semantische Brücken“ an das ontologiebasierte Referenzmodell übergeben. Dort findet eine Datentransformation statt, bevor dieser so generierte Datensatz wieder in die jeweilige Ziel-Applikation importiert wird [ADEH05]. So ist es möglich, digitale Planungsinformationen zwischen verschiedenen IT-Werkzeugen auszutauschen, ohne dass dabei wichtige Informationen verloren gehen.

Die prototypische Umsetzung dieser IT-Infrastruktur bzw. der Nachweis ihrer prinzipiellen Funktionsfähigkeit erfolgt anhand einfacher Praxisbeispiele. Ein Anwendungsfall widmet sich dabei der automatisierten Erstellung einer IEC 61131-3 konformen SPS-Schrittkette. Als Ausgangsmodell fungiert hierbei ein in der Fertigungsplanung festgelegter digitaler Prozessplan, der um SPS-bezogene Zusatzinformationen in Form von Transitionsbedingungen angereichert wird [DFJK05]. Dieses Modell wird anschließend über eine eigens entwickelte RDF-Schnittstelle exportiert, mit Hilfe des Referenzmodells transformiert und schließlich in das SPS-Zielsystem in Form einer SPS-Schrittkette importiert (Abbildung 4-10). Die Erstellung des digitalen Prozessplans erfolgt dabei mit Hilfe des digitalen Prozessplanungstools DELMIA Process Engineer (DPE) der Firma DELMIA. Beim eingesetzten SPS-Programmierungswerkzeug handelt es sich um das von der Firma infoteam entwickelte und vertriebene IT-Werkzeug OpenPCS.

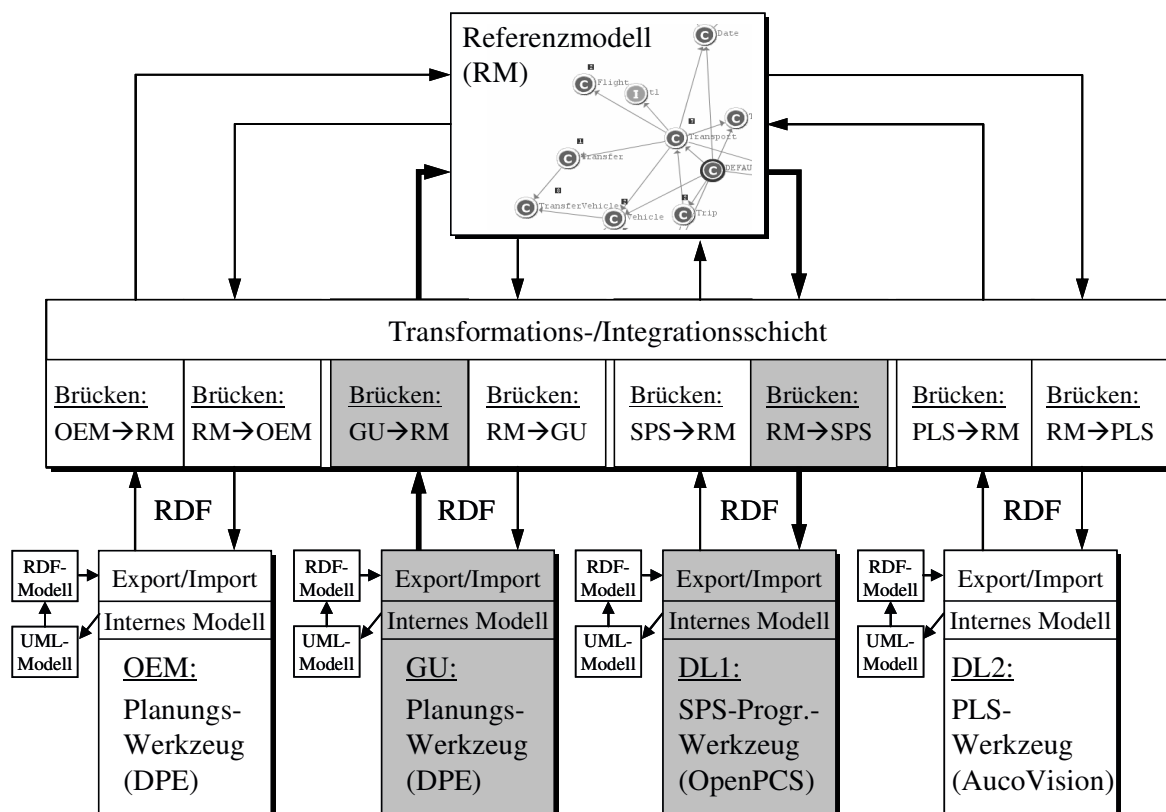


Abbildung 4-10: IT-Infrastruktur zum unternehmensübergreifenden Datenaustausch

Insbesondere vor dem Hintergrund der Praxistauglichkeit ist die im Projekt MODALE entwickelte Methodik zur automatisierten SPS-Programmgenerierung als sehr potentialreich zu bewerten. Die Generierung einer IEC 61131-3 konformen, strukturierten SPS-Schrittkette erfolgt auf Basis der in der Fertigungsplanung festgelegten Prozessdaten und kommt somit ohne die Erzeugung zusätzlicher Modelle aus. Jedoch weist der hier entwickelte Ansatz einen stark prototypischen Charakter auf. Aufgrund eingeschränkter Systemschnittstellen ist die Erzeu-

gung der SPS-Schritt看ette noch mit einem hohen Nachbearbeitungsaufwand verbunden. Hinzu kommt, dass die im Projekt MODALE verwendeten RDF-Formate nicht standardisiert sind und der Großteil der am Markt erhältlichen Softwarelösungen dieses Austauschformat nicht unterstützt. Darüber hinaus können aufgrund fehlender SPS-Informationen im Prozessmodell (z.B. keine Beachtung von Alternativverzweigungen) nur sehr einfache, stark eingeschränkte SPS-Schrittketten erzeugt werden. Eine Anwendung der in MODALE entwickelten Methodik zur automatisierten SPS-Programmerstellung auf größere Beispielumfänge findet nicht statt.

VR-basierte SPS-Programmgenerierung nach Osmers

Im Vordergrund der Dissertation von Osmers [Osme98] steht die Verbesserung der SPS-Projektierung mit Hilfe der Technologien aus der Virtuellen Realität (VR). Dabei wird dem Anwender eine Rechnerumgebung zur Verfügung gestellt, in der er die zu planende Anlage im virtuellen Raum konfiguriert und anschließend am gleichen Modell die Programmierung der SPS vornimmt. Dies geschieht auf grafisch interaktive Weise. Basis für die automatisierte Erzeugung der Steuerungsprogramme bilden elektrische Betriebsmittel (Aktoren, Sensoren), die der Anwender als repräsentative 3D-Grafikobjekte ins Gesamtmodell einbringt. In einem weiteren Schritt werden diese Objekte in entsprechende Beziehungen zueinander gebracht. Die logische Verknüpfung erfolgt dabei unter Verwendung boole'scher Operatoren über vorkonfigurierte Benutzerdialoge (visuelle Programmierung). Mit Hilfe eines eigens entwickelten proprietären AWL-Compilers werden diese Informationen schließlich aus dem verwendeten VR-Werkzeug in eine maschinenlesbare Form umgewandelt, bevor dieser so generierte SPS-Code in die jeweilige SPS-Programmierungsumgebung eingelesen wird. Die softwaretechnische Umsetzung des von Osmers entwickelten Konzeptes erfolgt unter Verwendung des VR-Werkzeugs VRT der Firma Superscape LTD, als SPS-Werkzeug wird STEP 7 (Siemens) verwendet.

Als vorteilhaft dieser VR-basierten SPS-Programmgenerierung sind die Integration der SPS-Projektierung in den Planungsprozess sowie die hier gegebene interaktive, objektorientierte Erstellung der Steuerungsprogramme anzusehen. Diesen Vorteilen stehen jedoch einige gravierende Nachteile gegenüber. Zum einen unterstützt dieser Ansatz nur die Generierung von unstrukturiertem und dadurch nicht mehr wartbarem AWL-Code, der nur einen geringen Prozentsatz eines finalen SPS-Programms darstellt. Zum anderen werden spezielle VR-Entwicklungsumgebungen und zusätzlich zu erstellende Softwareprogramme benötigt, die im Regelfall keinen Gegenstand in heutigen Planungsprojekten darstellen. Änderungen, die in der SPS-Programmierungsumgebung vollzogen werden, lassen sich zudem nicht mehr in die virtuelle Entwicklungsumgebung zurückführen. Inkonsistente Datenstände sind die Folge.

Automatisierte SPS-Programmgenerierung auf Basis von Petrinetzen

In [FrSc00] bzw. [FrMJ01] wird ein Konzept vorgestellt, das unter Verwendung steuerungstechnisch interpretierter Petrinetze (SIPN) eine automatisierte Generierung ablauffähiger SPS-Programme ermöglicht. Von der Grundidee ist dieses Konzept mit dem im Forschungsprojekt DisPA entwickelten UML-Ansatz vergleichbar. In Analogie zur formalen Beschreibungssprache UML ermöglichen SIPN eine transparente, grafische Darstellung ablaufforientierter Steuerungsalgorithmen, die sich unter Verwendung von Software-Translatoren in einen ablauffähigen AWL-Code übersetzen lassen. Hierzu wird ein Demonstrator entwickelt, der auf Basis des Programms Mathematica aus der Beschreibung eines SIPN einen AWL-Code nach Vorgaben des „PLCopen-Standards“ erzeugt. Dadurch stellen SIPN nicht nur Spezifikationswerkzeuge im Rahmen des Software-Engineerings dar, sondern können außerdem als vollwertige SPS-Programmiersprache verwendet werden [FrSc00]. Ein wesentlicher Vorteil, den die „Ablaufsprache“ SIPN gegenüber den in der IEC 61131-3 definierten Programmiersprachen bietet, sind SIPN-spezifische Algorithmen, die sowohl die Transparenz als auch die Korrektheit der SIPN automatisch analysieren [FrMJ01].

Aufgrund seiner konzeptionellen Ähnlichkeit zu dem im DFG-Projekt DisPA entwickelten „UML-Ansatz“ hat die Verwendung der SIPN hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit mit vergleichbaren Problemen zu kämpfen. Diese beziehen sich in erster Linie auf die zusätzliche Erstellung eines SIPN, auf die fehlende Bidirektionalität zum modifizierten SPS-Programm sowie auf die eingeschränkte SPS-Code-Generierung (nur AWL erzeugbar). Eine Unterstützung der SPS-Programmerstellung auf Basis vorhandener Planungsinformationen ist nicht gegeben.

Modellbasierte SPS-Programmgenerierung mit Process Simulate Commissioning

Im Gegensatz zu den in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Ansätzen stellt das IT-Werkzeug Process Simulate Commissioning eine kommerziell verfügbare Softwarelösung dar, die im Jahr 2002 in Kooperation zwischen den beiden Firmen Tecnomatix und Siemens entwickelt wurde (Kapitel 3.4.2). Grundlage für die automatisierte Generierung von SPS-Programmen bildet hier das digitale 3D-Modell der zu planenden Anlage bzw. der der Anlage zugrunde liegende Prozessablauf. Analog zu dem in MODALE entwickelten Ansatz wird dieser digital vorliegende Prozessablauf um steuerungstechnische Informationen (z.B. um Ein-/Ausgangssignale) erweitert. Dies geschieht entweder durch manuelles Hinzufügen der benötigten Steuerungsparameter oder durch Zuweisung der eingesetzten Ressourcen (Roboter, Spanner, Ventile etc.) zu den jeweiligen Operationen des digitalen Prozessmodells [NoGl03]. Auf Ba-

sis dieses Prozessmodells lässt sich mit Hilfe eines von der Firma Siemens entwickelten Software-Translators ein ablauffähiges SPS-Programm für die Siemens-Umgebung STEP 7 automatisiert ableiten. Dieses beinhaltet sowohl alle relevanten Ein- und Ausgangssignale in Form einer Signalliste sowie die den Prozessablauf repräsentierende SPS-Schrittkette in S7 Graph.

Von der Grundidee her ist das IT-Werkzeug Process Simulate Commissioning als sehr potentialreich zu bewerten. Es greift bereits vorhandene Planungsinformationen, die in der digitalen Produktionsplanung erstellt werden, auf, erweitert diese um steuerungsrelevante Zusatzinformationen und generiert daraus ohne großen Zusatzaufwand ein ablauffähiges SPS-Programm in STEP 7. Dennoch wird diese innovative Softwarelösung zur automatisierten Erstellung von SPS-Programmen in der Praxis bis dato nicht eingesetzt. Die Hauptgründe hierfür liegen vor allem in den eingeschränkten Möglichkeiten der Softwaregenerierung bzw. im noch erforderlichen hohen Anpassungsaufwand der erzeugten SPS-Programme an die realen Gegebenheiten. Darüber hinaus können Änderungen, die in STEP 7 am SPS-Programm oder an den Signalnamen vorgenommen werden, nicht mehr in die digitale Planungsumgebung zurückgeführt werden. Inkonsistente Datenstände zwischen Fertigungs- und Steuerungsplanung sind die Folge. Ein weiterer Nachteil des IT-Werkzeugs Process Simulate Commissioning liegt im Fehlen offener Systemschnittstellen. So lassen sich auf der einen Seite nur die in der „Tecnomatix-Systemwelt“ festgelegten Prozess- und Ressourceninformationen verwenden, auf der anderen Seite können nur SPS-Programme für STEP 7 generiert werden.

4.6.2 Zusammenfassende Bewertung und Fazit

Den in den vorigen Abschnitten beschriebenen Ansätzen zur automatisierten SPS-Programmerstellung liegen jeweils unterschiedliche Annahmen, Methoden und IT-Werkzeuge zugrunde. Bezüglich eines potentiellen Einsatzes im Rohbau-Planungsprozess weisen all diese Ansätze demzufolge auch individuelle Stärken und Schwächen auf. Diese sind in einer zusammenfassenden Übersicht in Tabelle 4-2 aufgeführt und einander gegenübergestellt.

Beim Vergleich der einzelnen Konzepte fällt auf, dass insbesondere die wissenschaftlichen Ansätze durch die Verwendung formaler Beschreibungssprachen (UML, SIPN) zwar über ein gut strukturiertes, flexibles Basiskonzept verfügen, für den praktischen Einsatz aufgrund der aufgezeigten Defizite jedoch am wenigsten geeignet sind. Ein umgekehrtes Bild zeigt sich bei den eher praxisbezogenen Lösungskonzepten. Diese basieren zwar auf kommerziellen IT-Planungswerkzeugen, haben aber mit dem Nachteil der toolspezifischen Unflexibilitäten sowie mit dem Fehlen offener Programmierschnittstellen zu kämpfen. Die Ergebnisse spiegeln sich

daher in vereinfachten und funktional eingeschränkten SPS-Programmen bzw. im damit einhergehenden hohen manuellen Nacharbeitungsaufwand dieser Softwareprogramme wider. Eine praktikable und wirtschaftliche Gesamtlösung existiert bis dato nicht.

Konzept	Vorteile des Ansatzes	Nachteile des Ansatzes
UML-Methode (DisPA)	- Objektorientierte Modellerstellung durch UML gegeben - Generierung von ST- und AS-Softwarecode	- Keine Integration in Planungsprozess - Zusätzliche Erstellung des UML-Modells sowie eines Software-Translators erforderlich - Kein bidirektionaler Datenaustausch möglich
MODALE	- Integration in Planungsprozess (Nutzung bestehender digitaler Planungsinformationen) - Basiert auf kommerzieller Softwarelösung (DPE) - Generierung von AS-Code	- Erstellung vereinfachter, eingeschränkter SPS-Schrittketten - Basiert auf nicht-standardisiertem Austauschformat (RDF) - Großer manueller Nacharbeitungsaufwand erforderlich
Visuelle Programmierung (Osmers)	- Integration in Planungsprozess - Grafik-orientierte (Visuelle) SPS-Programmierung	- Zusätzliches IT-Werkzeug sowie systemspezifischer Software-Translator erforderlich - Erzeugung v. unstrukturiertem, nicht wartbarem AWL-Code - Kein bidirektionaler Datenaustausch möglich
SIPN-Methode	- Formale und flexible Beschreibungssprache - Automatismen zur Verifizierung des „SPS-Modells“ - Unterstützung des SPS-Austauschformats nach PLCopen	- Keine Integration in Planungsprozess - Zusätzliche Erstellung der SIPN - Eingeschränkte SPS-Programmgenerierung - Erzeugung von AWL-Code
Process Simulate Commissioning	- Integration in Planungsprozess (Nutzung bestehender digitaler Planungsinformationen) - Basiert auf kommerzieller Softwarelösung - Generierung von AS-Code	- Erstellung vereinfachter, eingeschränkter SPS-Schrittketten - Keine offenen System-schnittstellen, nur Anbindung an STEP 7 (Siemens) möglich - Kein bidirektionaler Datenaustausch möglich

Tabelle 4-2: Vergleich der Ansätze zur automatisierten SPS-Programmgenerierung

Die in Tabelle 4-2 dargestellten ansatzspezifischen Vor- und Nachteile können durchaus als repräsentativ für alle zur Verbesserung des Planungsprozesses entwickelten Lösungen angesehen werden.

hen werden. Während die meisten wissenschaftlichen Konzepte an der fehlenden Berücksichtigung praxisbezogener Rahmenbedingungen scheitern, können die kommerziell verfügbaren Softwarelösungen aufgrund der fehlenden „Offenheit“ nur im Verbund mit anderen IT-Werkzeugen desselben Softwareherstellers effektiv genutzt werden. Eine systemübergreifende Datendurchgängigkeit ist jedoch auch bei dieser Konstellation nicht zwangsläufig gegeben. Vielmehr stellen die zur Verbesserung des Planungsprozesses entwickelten IT-Werkzeuge punktuelle Insellösungen zur Realisierung lokaler Optima dar (Abbildung 3-9). Beispielhaft ist die automatisierte Generierung bzw. die 3D-gestützte Validierung von SPS-Programmen zu nennen. Hinzu kommt, dass aufgrund der fehlenden Datendurchgängigkeit punktuelle Mehraufwendungen (insbesondere in frühen Planungsphasen) durchzuführen sind, die einem positiven Aufwand-Nutzen-Verhältnis bzw. einer positiven Anwenderakzeptanz von vornherein entgegenwirken. Dieser fundamentale Kritikpunkt, der im Regelfall mit einem Scheitern der neuen Planungslösung gleichzusetzen ist, trifft insbesondere auf die im wissenschaftlichen Umfeld entwickelten Ansätze zu.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher eine neuartige Methode zur Planung und Inbetriebnahme automatisierter Rohbau-Fertigungszellen entwickelt, die zum einen den in Tabelle 4-1 aufgeführten methodischen Anforderungen genügt und zum anderen die im Vorfeld beschriebenen Kritikpunkte bestehender Lösungen berücksichtigt. Ein besonderer Fokus liegt hierbei in der Entwicklung einer durchgängigen bereichsübergreifenden Planungslösung bzw. in der Realisierung eines effizienten Übergangs von der „Digitalen in die reale Fabrik“. Grundlage dieser neuen Planungslösung bildet weniger die Realisierung eines lokalen, bereichsbezogenen Optimums im Rahmen der Produktionsplanung. Vielmehr wird in dieser Arbeit ein umfassender bereichsübergreifender Gesamtansatz entwickelt, der sich auf den gesamten Lebenszyklus automatisierter Fertigungszellen auswirkt und demnach die Realisierung eines globalen, lebenszyklusbezogenen Gesamtoptimums zur Folge hat.

5 Konzept zur mechatronikorientierten Zellenplanung

Vor dem Hintergrund der in den beiden Kapiteln 3.5 und 4.6 aufgezeigten Defizite bestehender Lösungsansätze sowie der in Kapitel 4.5 beschriebenen Anforderungen an eine rechnergestützte Rohbau-Planungsprozesskette wird in diesem Kapitel eine neuartige interdisziplinäre Planungsmethodik vorgestellt. Diese basiert auf der frühzeitigen und integrierten Betrachtung mechanischer, elektrischer, pneumatischer, hydraulischer und steuerungstechnischer Ressourcendaten im Sinne eines mechatronischen Entwicklungsvorgehens und wirkt sich auf den gesamten Lebenszyklus automatisierter Produktionssysteme aus. Die einzelnen Aspekte und Zusammenhänge dieses „mechatronikorientierten“ Planungsansatzes sind in einer Übersichtsdarstellung Abbildung 5-1 zu entnehmen.

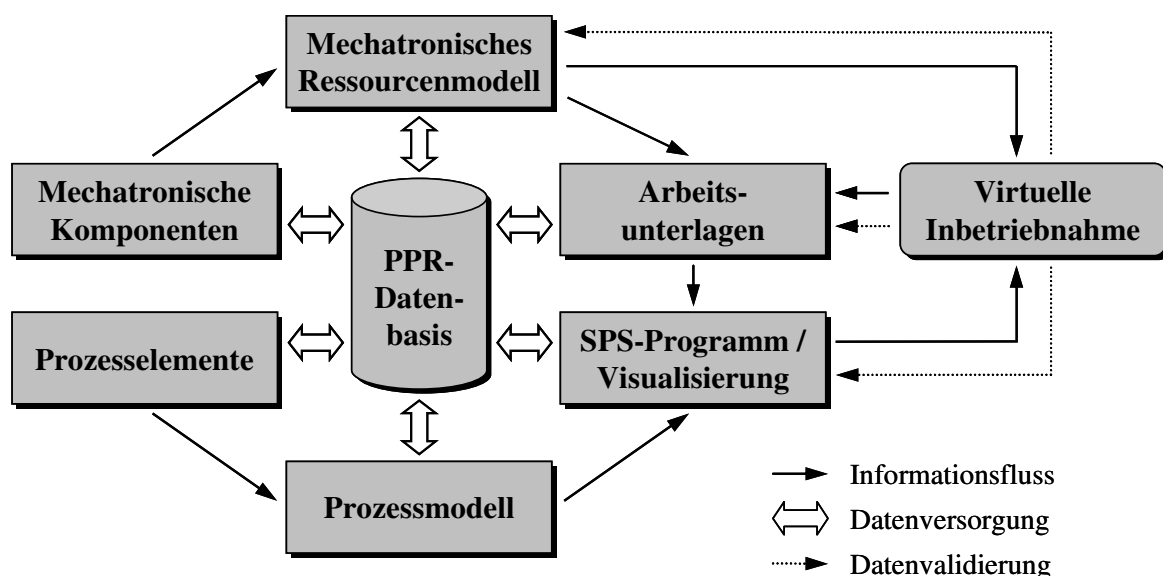


Abbildung 5-1: Mechatronikorientiertes Planungsvorgehen

Aufgrund ihrer zentralen Bedeutung werden in einem ersten Schritt die wichtigsten Grundlagen der Mechatronik vorgestellt, eine Begriffseingrenzung auf den Rahmen dieser Arbeit vorgenommen sowie bestehende mechatronische Entwicklungsvorgehen kritisch beleuchtet. Anschließend erfolgt die Illustration der einzelnen Schritte, Teilschritte und Wechselwirkungen des in Abbildung 5-1 skizzierten „mechatronikorientierten“ Planungsvorgehens. Zentrale Aspekte bilden hierbei die parallele domänenübergreifende Entwicklung eines mechatronischen Ressourcen- und eines den Prozessablauf beschreibenden digitalen Prozessmodells. Im Rahmen des zellenspezifischen Planungsprozesses kommt diesen beiden Modelltypen in vielerlei

Hinsicht eine herausragende Bedeutung zu. Zum einen dienen diese als zentrale interdisziplinäre Datenintegrations- und Kommunikationsplattformen. Zum anderen können auf Basis dieser beiden Planungsmodelle aber auch bereichsübergreifende Arbeitsunterlagen (z.B. Signalisten, Pneumatikpläne) sowie standardisierte Roboter- und zellenspezifische SPS-Programme automatisiert abgeleitet werden.

Durch den Einsatz eines mechatronischen Ressourcenmodells können jedoch nicht nur bedeutende Einsparpotenziale im Rahmen des zellenspezifischen Planungsprozesses erwirtschaftet werden. Zugunsten beschleunigter und stabiler Inbetriebnahmeprozesse bildet dieses interdisziplinäre Datenmodell zudem die Basis zur frühzeitigen Validierung und Optimierung realer Steuerungskomponenten. Dabei lassen sich nicht nur Softwarefehler identifizieren und beseitigen. Vielmehr kann das ordnungsgemäße Zusammenwirken von mechanischen, elektrischen und steuerungstechnischen Anlagenkomponenten ohne Vorhandensein der realen Fertigungszelle überprüft und verbessert sowie die hierbei gewonnenen Erkenntnisse in einem iterativen Verbesserungsprozess in die laufende Systemdetaillierung rückgeführt werden. Ihr volles Potential entfaltet die neu entwickelte Planungslösung jedoch erst bei Integrationsprozessen und Zellenmodifikationen während des laufenden Produktionsbetriebs. In diesem Zusammenhang dient das mechatronische Ressourcenmodell als Entscheidungs- und Dokumentationsmedium, auf dessen Basis sich nachhaltige Produktivitätssteigerungen erzielen lassen.

5.1 Mechatronik

Nach Ansicht des MIT Technology Reviews zählt die Mechatronik zu einer der zehn bedeutendsten Zukunftstechnologien, die einen umfassenden Wandel in der gesamten Lebens- und Arbeitswelt des Menschen bedingen. Insbesondere im Anlagenbau der Automobilindustrie erfährt das Thema „Mechatronik“ – aufgrund der mit dem steigenden Einsatz und der zunehmenden Vernetzung elektrischer und steuerungstechnischer Anlagenkomponenten einhergehenden Potentiale und Risiken – zunehmende Wichtigkeit [Brus05, ZäGW05].

5.1.1 Begriffsdefinition

Trotz der großen Bedeutung von Mechatronik existiert bis heute keine allgemein akzeptierte, einheitliche Begriffsdefinition. Im Jahr 1969 prägte der Japaner Ko Kikuchi den Begriff „Mechatronics“ als Kombination der beiden Wörter „Mechanism“ und „Electronics“ und verstand darunter die elektronische Funktionserweiterung mechanischer Komponenten [HaTF96]. Mit dem Aufkommen der Mikroelektronik sowie der Mikroprozessortechnik wurde der bis zum

Jahr 1982 geschützte Begriff der Mechatronik um einen weiteren Teilaspekt, um die Informationstechnik, erweitert. In diesem Zusammenhang definiert Schweitzer: „Mechatronik ist ein interdisziplinäres Gebiet der Ingenieurwissenschaften, das auf den klassischen Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik aufbaut. Ein typisches mechatronisches System nimmt Signale auf, verarbeitet sie und gibt Signale aus, die es z.B. in Kräfte und Bewegungen umsetzt“ [Schw89].

Die gezielte Ausnutzung synergetischer Effekte verschiedener Technologien bildet den Kern der in [Iser99] publizierten Begriffsdefinition. Demnach ist die Mechatronik ein „interdisziplinäres Gebiet, bei dem folgende Disziplinen zusammenwirken: mechanische und mit ihnen gekoppelte Systeme, elektronische Systeme, Informationstechnik. Dabei ist das mechanische System im Hinblick auf die Funktionen dominierend. Es werden synergetische Effekte angestrebt, die mehr beinhalten als die einzelne Addition der Disziplinen“. Entscheidend ist hiernach also nicht die Betrachtung isolierter Einzeltechnologien, sondern das funktionale Zusammenwirken der Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik mit dem Ziel, ein systembezogenes Gesamtoptimum zu erreichen (Abbildung 5-2).

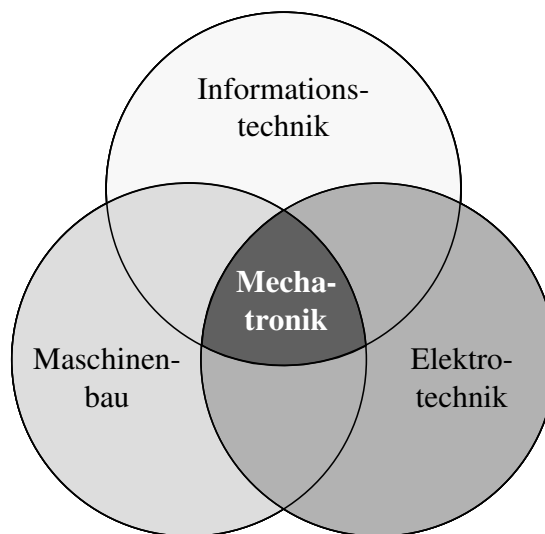


Abbildung 5-2: Mechatronik – Funktionales Zusammenwirken verschiedener Disziplinen

Einen etwas anderen Fokus bei der Betrachtung von Mechatronik haben hingegen Harashima, Tomizuka und Fukuda. Sie definieren in [HaTF96] Mechatronik als „the synergetic integration of mechanical engineering with electronic and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes“. Mechatronik bezieht sich demnach nicht nur auf die funktionale Integration verschiedener Technologien, sondern auch auf den integrierten Entwurf und die Fertigung mechatronischer Erzeugnisse.

Zur Gewährleistung eines eindeutigen Begriffsverständnisses soll der Begriff Mechatronik im Rahmen dieser Arbeit – insbesondere vor dem Hintergrund der im Karosserierohbau vorherrschenden Wirkprinzipien – wie folgt verstanden werden:

Ein mechatronisches System besteht aus Teilsystemen der ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen Mechanik, Elektrik, Pneumatik, Hydraulik und Informations-/Steuerungstechnik, die durch eine räumliche und/oder funktionale Integration der verschiedenen Wirkprinzipien mit dem Zweck der Bildung von Synergieeffekten zusammenwirken.

5.1.2 Eigenschaften mechatronischer Systeme

Mechatronische Systeme weisen ein sehr breites Einsatzspektrum von medizinischen Implantaten bis hin zu großen Investitionsgütern auf. Allen Systemen gemeinsam ist jedoch ihr allgemeiner Aufbau. Nach [GaLü00] besteht ein mechatronisches System aus einem (zumeist mechanischen) Grundsystem, Sensoren, Aktoren und einer informationsverarbeitenden Einheit. Die Zustandsgrößen des Grundsystems werden über die Sensoren erfasst und an die Informationsverarbeitung weitergeleitet. Allgemein sind Zustandsgrößen eines technischen Systems als physikalische Größen zu verstehen, durch deren Wert zu einem beliebigen Zeitpunkt t_0 der Ablauf des Systems für $t > t_0$ eindeutig bestimmt ist, sofern die Eingangsgrößen des Systems für $t > t_0$ gegeben sind [Föll94]. Die Informationsverarbeitung ist heute in den meisten Fällen durch Digitaltechnik mittels Mikroprozessoren realisiert, auf denen bestimmte Programme abgearbeitet werden. Hier wird auf Basis der von den Sensoren erfassten Systemzustände die erforderliche Beeinflussung des Grundsystems ermittelt, wobei die Umsetzung dieser Einwirkungen schließlich mit Hilfe von Aktoren am Grundsystem erfolgt.

Die Verknüpfungen und Beziehungen zwischen den einzelnen Bestandteilen mechatronischer Systeme lassen sich allgemein mit Hilfe von Flüssen beschreiben. Nach [PBFG06] sind hierbei grundsätzlich drei Arten von Flüssen zu unterscheiden: Stoffflüsse, Energieflüsse und Informationsflüsse. Diesen Flussarten liegen folgende Eigenschaften zugrunde:

- **Stoffflüsse:** Beispiele für Stoffe, die zwischen Einheiten mechatronischer Systeme fließen, sind feste Körper (Rohprodukte, Bauteile, Prüflinge etc.), Gase oder Flüssigkeiten.
- **Energieflüsse:** Unter Energie ist in diesem Zusammenhang jede Energieform zu verstehen wie z.B. mechanische, thermische oder elektrische Energie.
- **Informationsflüsse:** Informationen, die zwischen den Einheiten mechatronischer Systeme ausgetauscht werden, sind beispielsweise Messgrößen, Stellgrößen oder Daten.

Eine zusammenfassende Übersicht über den prinzipiellen Aufbau und die Hauptkomponenten mechatronischer Systeme sowie über die zwischen den einzelnen Systemeinheiten „fließenden“ Stoffe, Energien und Informationen ist in Abbildung 5-3 gegeben. Weiterhin wird in Abbildung 5-3 die Möglichkeit aufgezeigt, weitere Informationsverarbeitungseinheiten über entsprechende Kommunikationssysteme sowie den Systemanwender über spezielle Mensch-Maschine-Schnittstellen (HMI) mit der zentralen Informationsverarbeitung zu verbinden.

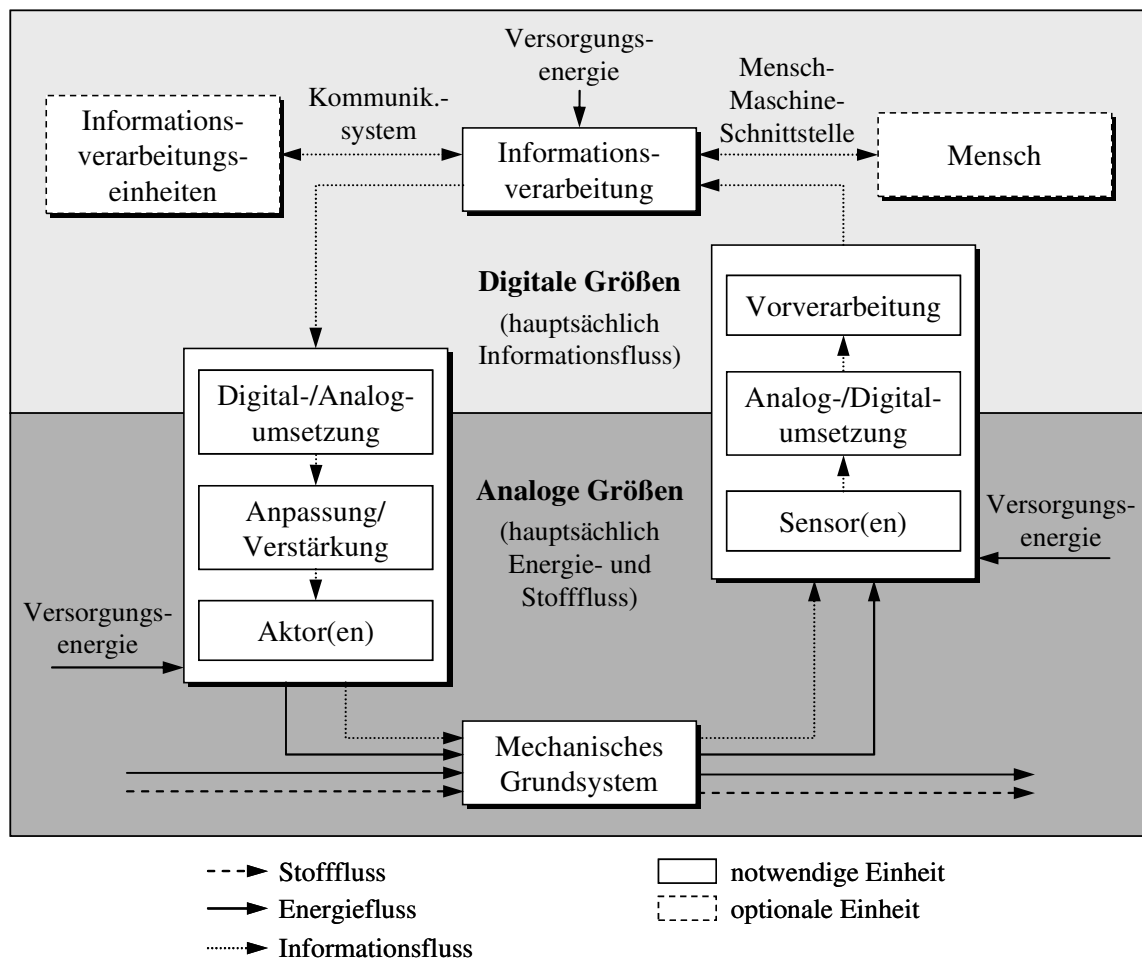


Abbildung 5-3: Aufbau mechatronischer Systeme nach [GaEK01]

Vor dem Hintergrund der in diesem Abschnitt erläuterten Eigenschaften stellen nicht nur die im Rohbau eingesetzten Fertigungszellen an sich, sondern auch einzelne Zellenkomponenten (z.B. Schweißroboter) typische Anwendungsbeispiele mechatronischer Systeme dar. Als zentrale informationsverarbeitende Einheit fungiert hierbei eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), die auf der einen Seite die von Sensoren erfassten Systemzustände auf Grundlage des jeweiligen SPS-Programms verarbeitet. Auf der anderen Seite werden die Ergebnisse dieser Informationsverarbeitung als Stellsignale an die jeweiligen Aktoren ausgegeben, die entsprechenden Einfluss auf das zellenbezogene Grundsystem nehmen. Die einzelnen Systemzu-

stände werden in der Regel über standardisierte Kommunikationsschnittstellen an ein übergeordnetes Produktionsleitsystem (PLS) weitergegeben. Mensch-Maschine-Schnittstellen (HMI) ermöglichen es dem Anlagenbediener sowohl aktiv in den Zellenprozess einzugreifen als sich auch „passiv“ die jeweiligen Systemzustände anzeigen zu lassen.

5.1.3 Mechatronische Entwicklungsvorgehen

Auf der einen Seite bietet die Mechatronik zwar viele Erfolgspotenziale [Brus96], auf der anderen Seite stellt sie aber auch besondere Anforderungen an den Entwicklungsprozess: Verglichen mit rein mechanischen Systemen sind mechatronische Systeme aufgrund des vernetzten Zusammenwirkens verschiedener Wissensdomänen durch eine sehr viel höhere Gesamtkomplexität gekennzeichnet. Für die mechatronische Produktentwicklung sind daher systematische und methodengestützte Vorgehensweisen eine unabdingbare Voraussetzung. Auf Basis der in der VDI-Richtlinie 2422 aufgezeigten Entwicklungsmethodik [VDI2422] und der in [GaLü00] beschriebenen Vorgehensweise wurde im Jahr 2004 die VDI-Richtlinie 2206 mit dem Ziel fertig gestellt, den Anwendern einen „durchgängigen domänenübergreifenden Leitfaden für die Entwicklung mechatronischer Systeme“ zur Verfügung zu stellen. Die in dieser Richtlinie publizierten Methoden werden im Folgenden näher beleuchtet.

Allgemein beschreibt die VDI-Richtlinie 2206, die als Ergänzung zu den beiden VDI-Richtlinien 2221 [VDI2221] und 2422 [VDI2422] betrachtet werden muss, eine flexible Vorgehensweise zur Entwicklung mechatronischer Systeme. Diese stützt sich im Wesentlichen auf drei Kernelemente: Dem V-Modell auf der Makroebene, dem allgemeinen Problemlösungszyklus auf der Mikroebene sowie vordefinierten Prozessbausteinen zur Bearbeitung wiederkehrender Arbeitsschritte [VDI2206].

Für das grundsätzliche Vorgehen wurde das für die Softwareentwicklung kreierte „V-Modell“ übernommen und an die Anforderungen der Mechatronik angepasst. Wie in Abbildung 5-4 illustriert, beschreibt dieses Vorgehensmodell die Abfolge der wesentlichen Schritte, die für die Entwicklung mechatronischer Systeme erforderlich sind. Ausgehend von systemspezifischen Anforderungen werden im Rahmen des Systementwurfs die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des Gesamtsystems in Form eines interdisziplinären Lösungskonzepts festgelegt. Dabei wird die systembezogene Gesamtfunktion in Teilfunktionen zerlegt, die dann in einem weiteren Schritt während des domänenspezifischen Entwurfs von den drei Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektro- und Informationstechnik weiter detailliert werden. Anschließend erfolgt die Integration der in den einzelnen Bereichen generierten Ergebnisse zu

einem übergeordneten Gesamtsystem. Während dieser Systemintegration findet eine permanente Überprüfung der Systemeigenschaften anhand der gestellten Anforderungen und des entwickelten Lösungskonzepts unter Verwendung geeigneter Simulationsmodelle statt. Das Ergebnis dieses beschriebenen Makrozyklus bildet das Produkt bzw. das entwickelte Gesamtsystem, wobei dieses nach Durchlauf eines Zyklus nicht zwingend einen fertigen Zustand erreichen muss. In den meisten Fällen sind sogar mehrere Durchläufe erforderlich, in denen ein Produkt zunehmend konkretisiert und ausgearbeitet wird.

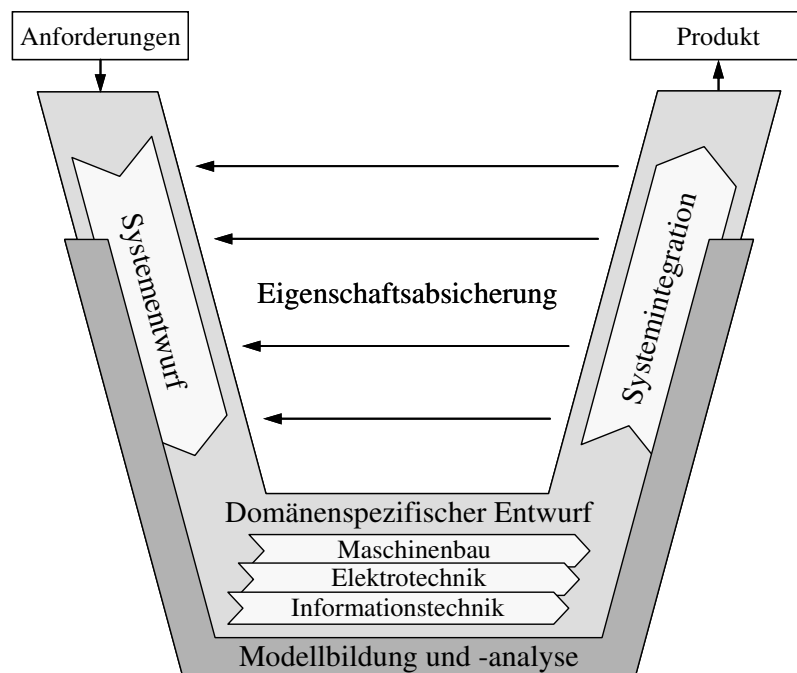


Abbildung 5-4: V-Modell als Makrozyklus nach [VDI2206]

Für häufig vorkommende Teilschritte bei der Entwicklung mechatronischer Systeme definiert die VDI-Richtlinie 2206 zusätzliche Prozessbausteine. Diese basieren auf bewährten Entwicklungsmethoden (z.B. auf der VDI-Richtlinie 2221) und liefern eine detaillierte Beschreibung der im V-Modell dargestellten Arbeitsschritte Systementwurf, domänenspezifischer Entwurf, Modellbildung und -analyse sowie Systemintegration und Eigenschaftensicherung.

5.1.4 Zusammenfassung und Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass aufgrund steigender Anlagenkomplexitäten bzw. durch den vermehrten Einsatz mechatronischer Komponenten systematische und methodengestützte Entwicklungsvorgehen notwendig sind. Die heute existierenden mechatronischen Vorgehensmodelle – wie z.B. das in der VDI-Richtlinie 2206 publizierte V-Modell – geben zwar einen Überblick über die prinzipielle Vorgehensweise; aufgrund zu hoher Abstraktionsgrade

können diese Entwicklungsmethoden jedoch nur in den seltensten Fällen auf spezielle branchenbezogene Bedürfnisse angewandt werden. Dies trifft im besonderen Maße auf den detaillierten Planungsprozess automatisierter Fertigungszellen im Karosserierohbau zu.

Vor diesem Hintergrund wird in den nächsten Abschnitten eine neuartige domänenübergreifende Rohbau-Planungsmethodik vorgestellt, die sich die durch die Mechatronik gegebenen Potentiale zu Nutze macht, um somit den im Kapitel 4.5 aufgezeigten Anforderungen gerecht zu werden. Da dieses Planungsvorgehen keinen Anspruch auf eine 100%ige Gewährleistung aller mechatronischen Grundprinzipien erhebt, wird zur näheren Charakterisierung der neuen Planungsstrategie die Bezeichnung „mechatronikorientiert“ anstelle von „mechatronisch“ verwendet.

5.2 Mechatronikorientierte Ressourcenplanung

Im Gegensatz zu heutigen Detailplanungen, in denen für die 3D-gestützte Zellenkonstruktion rein mechanische Bauteile und -gruppen verwendet werden, basiert die mechatronikorientierte Ressourcenplanung auf mechatronischen Komponenten. Unter Einhaltung gewisser Vorgaben werden diese standardisierten Ressourcenkomponenten zu einem ganzheitlichen, zellenspezifischen Ressourcenmodell zusammengesetzt. Dieses 3D-Modell dient im späteren Planungsverlauf nicht nur als bereichsübergreifende Planungs- und Kommunikationsplattform, sondern stellt zudem die Basis zur Durchführung virtueller Inbetriebnahmen dar.

5.2.1 Inhalte und Bereitstellung mechatronischer Ressourcenkomponenten

Es ist bereits heute Stand der Technik, dass Ressourcenkomponenten (z.B. Roboter, Spanner) neben organisatorischen, betriebswirtschaftlichen und technischen Daten durch eine 3D-Geometrie (inklusive Bewegungsmechanismen) repräsentiert werden. Dadurch lassen sich bereits während des Konstruktionsprozesses mit Hilfe von DMU-Analysen etwaige Kollisionen zwischen den einzelnen Zellenkomponenten erkennen bzw. können mittels Zugänglichkeitsuntersuchungen optimale Roboterpositionen und -verfahrwege bestimmt werden (Kapitel 3.3.1).

Neben dieser eher „geometrieorientierten“ Arbeitsweise haben Elektro- und Steuerungsingenieure eine etwas differenzierte Sicht auf dieselben Ressourcenkomponenten: Ihre Denk- und Arbeitsweise ist durch eine starke „Funktionsorientierung“ gekennzeichnet [GaLü00]. In diesen Bereichen werden Ressourcen beispielsweise durch ihre elektrischen, pneumatischen oder hydraulischen Anschlüsse, ihre Ein- und Ausgangssignale (E/As) bzw. in Form steuerungsbe-

zogener SPS-Programmbausteine beschrieben. Eine einheitliche bereichsübergreifende Ressourcenbeschreibungsform existiert bis dato nicht.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Arbeit ein neues Konzept entwickelt, das alle wesentlichen mechanischen, elektrischen und steuerungstechnischen Ressourcendaten zentral bündelt und zu standardisierten interdisziplinären Komponenten zusammenfasst. Diese Komponenten werden im Folgenden als mechatronische Ressourcenkomponenten bezeichnet. Eine Übersicht über die Daten, die zugunsten einer durchgängigen digitalen Planungsprozesskette in diesen mechatronischen Ressourcenkomponenten enthalten sind, ist in Abbildung 5-5 gegeben. Dabei ist zu beachten, dass die mechatronischen Komponenten nicht zwangsläufig aus allen in Abbildung 5-5 illustrierten Daten bestehen müssen. Vielmehr findet für jede Komponentenklasse – wie beispielsweise für Spanner, Ventile und Roboter – eine klassenspezifische Konfiguration statt, die sich aus Untermengen der in Abbildung 5-5 aufgezeigten Ressourcendaten zusammensetzt.

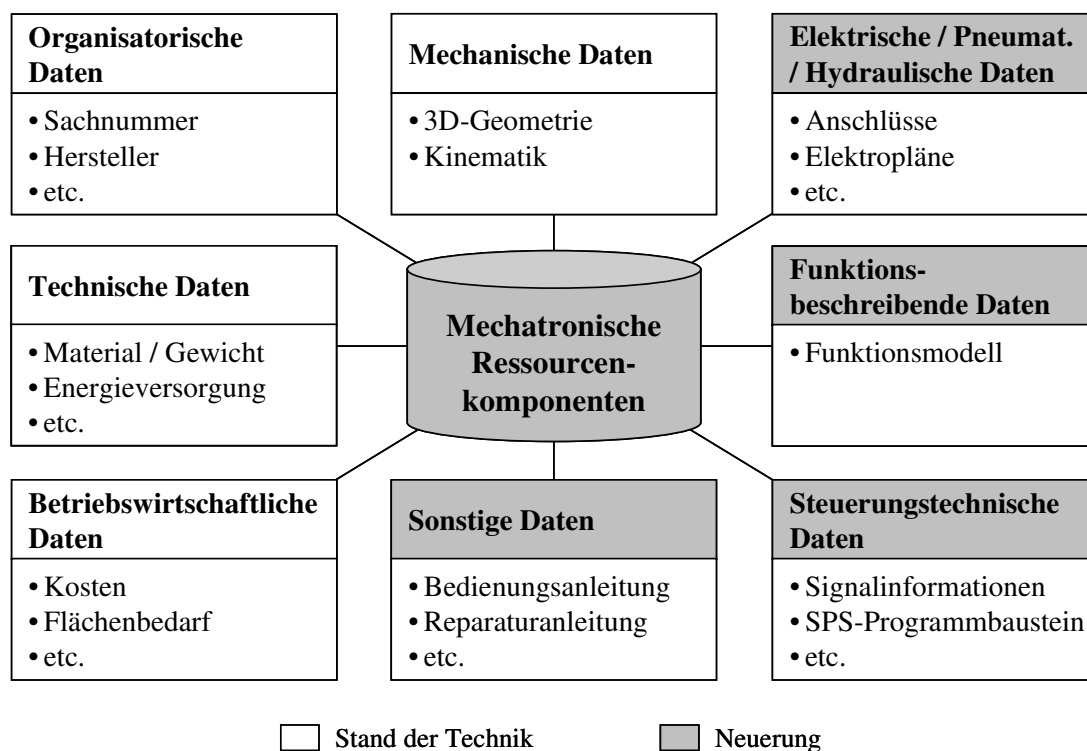


Abbildung 5-5: Inhalte mechatronischer Ressourcenkomponenten

Die Konfiguration bzw. das Zusammenwirken einzelner Ressourcendaten soll im Folgenden anhand der Komponentenklasse Spanner verdeutlicht werden. Spanner sind im Rohbau häufig verwendete standardisierte Baugruppen, die dazu eingesetzt werden, Bauteile während eines Bearbeitungsvorgangs durch Kraftschluss zu spannen bzw. zu fixieren. Sie bestehen in aller

Regel aus einem starren Grundkörper und einem beweglichen Druckarm, der mit Hilfe eines pneumatisch angesteuerten Zylinders bewegt wird und je nach Einstellung verschiedene Endlagen annehmen kann. Die Erkennung der Endlagenpositionen erfolgt über integrierte Sensoren, die diese Informationen zur Verarbeitung an die SPS weitergeben.

Neben mechanikbezogenen Daten (3D-Geometrie, Kinematik) verfügt ein mechatronisches Spannermodell über elektrische und pneumatische Anschlüsse, ein individuelles Funktionsmodell sowie über Ein- und Ausgangssignale, die die später erforderliche Kommunikation mit der SPS sicherstellen. Im Funktionsmodell wird beispielsweise festgelegt, wie der mechatronische Spanner auf bestimmte Eingangssignale zu reagieren hat, wie sich eine Störung auf das Spannerverhalten auswirkt oder wann welche Ausgangssignale an die SPS weitergeleitet werden. Firmenspezifische Standards (z.B. Signalbezeichnungen, SPS-Programmbausteine) sind bei der Konfiguration der mechatronischen Komponentenklassen ebenso zu berücksichtigen wie mögliche Interdependenzen zu anderen Ressourcenkomponenten. So werden Pneumatikspanner beispielsweise nie auf direktem Weg, sondern stets über zwischengeschaltete Ventile von der SPS angesteuert. Eine Störung am Ventil bedingt somit immer auch eine Störung an den mit dem Ventil verbundenen Spannern bzw. Zylindern. Diese individuellen Abhängigkeiten sind bei der Erstellung der mechatronischen Ressourcenkomponenten von vornherein zu berücksichtigen, um somit im Rahmen der virtuellen Inbetriebnahme eine realitätsgetreue Validierung der entwickelten Steuerungsprogramme gewährleisten zu können.

Mechatronische Ressourcenkomponenten verknüpfen folglich die in den einzelnen Bereichen vorherrschenden Sichtweisen und können demnach entlang des gesamten Planungsprozesses durchgängig verwendet werden. Sie beinhalten alle relevanten Ressourcendaten, unterstützen domänenübergreifende Standardisierungsbestrebungen, bewirken eine Verbesserung der interdisziplinären Zusammenarbeit und bilden zudem die Grundlage für eine automatisierte Generierung standardisierter Arbeitsunterlagen. Da mechatronische Ressourcenkomponenten nicht nur mechanische, elektrische und steuerungstechnische Informationen, sondern auch organisatorische sowie betriebswirtschaftliche Ressourcendaten beinhalten, stellen sie darüber hinaus auch die Basis für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (z.B. Kostenrechnungen, Flächenbedarfsermittlungen) dar.

Um einen projekt- und bereichsübergreifenden Zugriff auf diese interdisziplinären Ressourcenkomponenten zu ermöglichen, werden diese mechatronischen Einheiten den einzelnen Bereichen in Form einer zentral organisierten, standardisierten Ressourcenbibliothek zur Verfügung gestellt. Eine solche Ressourcenbibliothek bietet den Vorteil, dass alle Fachbereiche auf

dieselben Daten zugreifen und somit alle – im Gegensatz zu heute – mit denselben Datenständen arbeiten. Des Weiteren müssen Änderungen, Anpassungen bzw. Erweiterungen lediglich an einer Stelle eingepflegt werden, wodurch die Datenpflege stark vereinfacht wird und sich unkontrollierte Datenredundanzen vermeiden lassen.

Neben diesen allgemeingültigen Vorteilen, die sich durch den Einsatz einer mechatronischen Ressourcenbibliothek ergeben, müssen beim Aufbau einer solchen Bibliothek – zugunsten eines wirtschaftlichen Einsatzes – einige Rahmenbedingungen beachtet werden. Diese sind insbesondere als Kriterien für die der Datenverwaltung dienenden IT-Systeme zu verstehen, auf deren Grundlage eine entsprechende Systemauswahl zu treffen ist. Zu den wesentlichen Systemanforderungen zählen unter anderem:

- Archivierungsmöglichkeit mechatronischer Ressourcenkomponenten
- Eingliederung in vorhandene Systemlandschaften (offene Systemschnittstellen)
- Einfache, intuitive Bedienbarkeit, Übersichtlichkeit und Erweiterbarkeit
- Schneller Datenzugriff (z.B. durch geeignete Suchfunktionalitäten)
- Wirtschaftlichkeit (z.B. Anschaffungskosten, Wartungskosten, Pflegeaufwand)

5.2.2 Entwicklung eines mechatronischen Ressourcenmodells

Im Rahmen der zellenspezifischen Detailplanung werden die mechatronischen Komponenten der Bibliothek entnommen, an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst und mit weiteren projektspezifischen Bauteilen zu einem ressourcenorientierten Zellenmodell verknüpft. Demnach repräsentiert dieses mechatronische 3D-Ressourcenmodell nicht nur den mechanischen, elektrischen oder steuerungstechnischen Anteil eines realen Produktionssystems. Vielmehr liefert es eine ganzheitliche, integrierte Sicht auf diese drei Domänen. Aus diesem Grund dient das mechatronische Ressourcenmodell als interdisziplinäre Planungs- und Kommunikationsplattform, auf deren Basis die am Rohbau-Planungsprozess beteiligten Fachbereiche simultan und vernetzt zusammenarbeiten können. Das Ergebnis dieses Simultaneous Engineering spiegelt sich letzten Endes in zeitlich verkürzten und transparenten Planungsprozessen wider.

Jedoch stellen die mit dem Einsatz eines mechatronischen Ressourcenmodells einhergehenden Vorteile nur eine Seite der Medaille dar. Auf der anderen Seite führt die Zusammenführung der unterschiedlichen Ressourcendaten zu einem größeren Datenvolumen sowie zu einer steigenden Gesamtkomplexität. Aus diesem Grund müssen bei der Entwicklung des mechatronischen Ressourcenmodells klare, einheitliche und verbindliche Ressourcenstrukturen vor-

gegeben und eingehalten werden. Diese müssen – insbesondere vor dem Hintergrund der späteren Anwenderakzeptanz – folgenden Anforderungen genügen:

- Unterstützung der Denk- und Arbeitsweisen der verschiedenen Fachbereiche
- Einfache, funktionsorientierte und archivierbare Datenstrukturierung
- Zusammenfassung aller Einzelteile und Baugruppen, die eine gemeinsame Bewegung ausführen (zur Effizienzsteigerung bei Simulationsuntersuchungen)
- Realisierung aufgabenspezifischer Sichten (zur Komplexitätsbeherrschung)

Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen wird im Rahmen dieser Arbeit eine ressourcenbezogene Datenstruktur entwickelt, deren Ergebnis in Abbildung 5-6 dargestellt ist. Demnach setzt sich das mechatronische Ressourcenmodell – in Anlehnung an den Aufbau realer Fertigungssysteme – aus mehreren Aggregationsstufen zusammen. Dabei stellen die mechanischen Einzelteile die unterste Ebene dar. Zugunsten einer effektiven Durchführung von Simulationsuntersuchungen werden alle Bauteile, die eine gemeinsame Bewegung ausführen, zu Untergruppen zusammengefasst. Funktionsgruppen bündeln wiederum alle Untergruppen sowie die aus der Bibliothek entnommenen mechatronischen Ressourcenkomponenten, die als funktionale Konstruktionseinheit eine definierte Aufgabe erfüllen. So stellen beispielsweise Spannstellen typische mechatronische Funktionsgruppen dar, die in aller Regel aus einem mechatronischen Spanner sowie aus mehreren mechanischen Untergruppen bestehen. In einem weiteren Schritt werden unter Verwendung dieser modular aufgebauten Funktionsgruppen so genannte Hauptgruppen (z.B. Vorrichtungen, Layout) entwickelt, die in einer nächsten Strukturierungsebene schließlich zur mechatronischen Fertigungszelle zusammengeführt werden.

Wie in [KiBB06a] ausführlicher erläutert, kommt insbesondere der datenbezogenen Komplexitätsbeherrschung eine wichtige Bedeutung zu. Der hierzu entwickelte Lösungsansatz basiert auf der Tatsache, dass die im zellenbezogenen Planungsprozess involvierten Fachbereiche nur für einen bestimmten Aufgabenumfang verantwortlich sind und demnach nur den für sie relevanten Datenumfang mit individuellen Detaillierungsgraden benötigen. Während der Simulationsexperte Kollisionsanalysen auf Basis gruppierter, vereinfachter Bauteile (Untergruppen) durchführt, liegt der Fokus des Betriebsmittelkonstruktors beispielsweise auf der detaillierten Vorrichtungsentwicklung unter Verwendung aller dafür relevanten Einzelteile. Im Gegensatz dazu liegt der Interessensschwerpunkt der Elektro-/Steuerungsingenieure auf der funktionalen Repräsentation der eingesetzten Betriebsmittel (Abbildung 5-6). Zur softwaretechnischen Realisierung dieses „rollenspezifischen Sichtenkonzepts“ wird daher ein an diese Anforderungen

angepasstes Datenmanagementsystem benötigt, das auf Basis der in Abbildung 5-6 skizzierten Ressourcenstruktur die einzelnen Fachbereiche mit entsprechend aufbereiteten aufgabenabhängigen Daten versorgt.

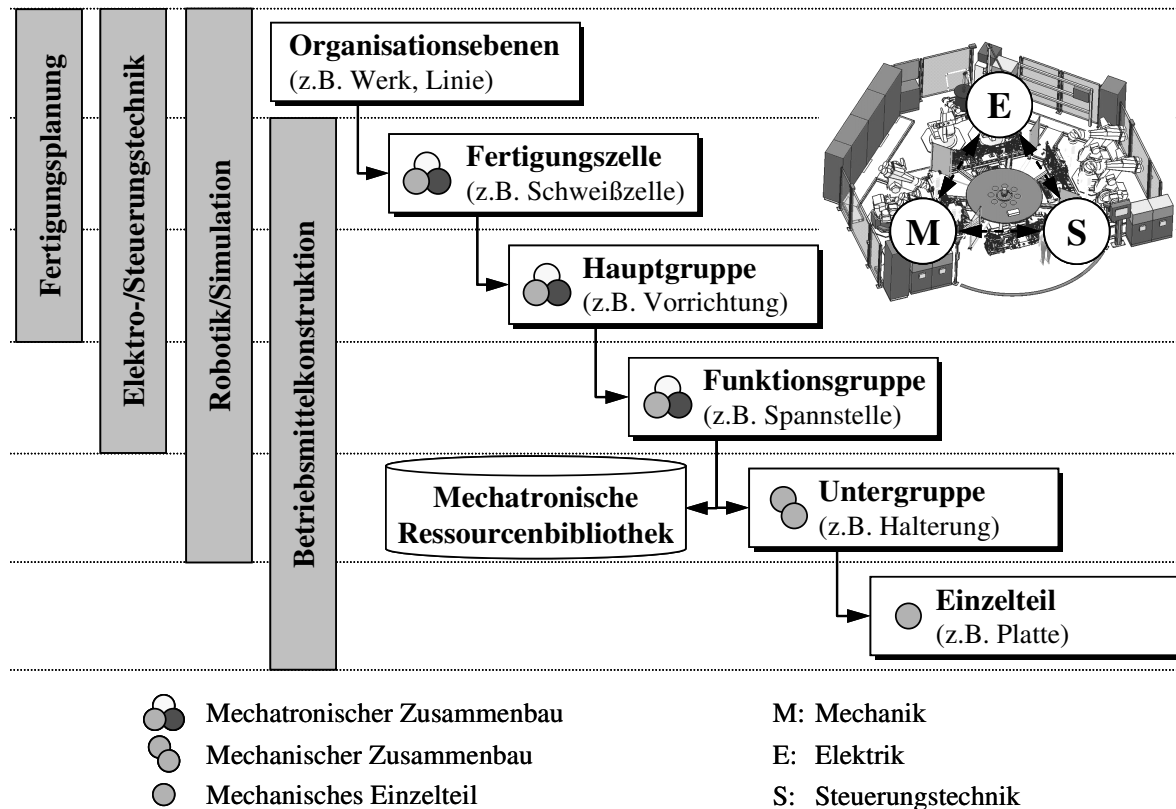


Abbildung 5-6: Aufbau und Strukturierung eines mechatronischen Ressourcenmodells

5.3 Interdisziplinäre Prozessplanung automatisierter Fertigungszellen

Parallel zur Entwicklung des mechatronischen Ressourcenmodells findet die detaillierte zellenspezifische Prozessplanung statt. Unter Berücksichtigung bestimmter Anforderungen wird hierzu das Funktionsspektrum heute existierender digitaler Prozessmodelle um neue Prozesselemente bzw. um neue prozessspezifische Eigenschaften erweitert. Auf diese Weise können diese erweiterten digitalen Prozessmodelle sowohl zur eindeutigen und standardisierten Prozessdokumentation als auch als Grundlage zur automatisierten Erstellung ablauffähiger, IEC-konformer SPS-Programme verwendet werden.

5.3.1 Motivation und Anforderungen

Die Situation im heutigen Zellenentwicklungsprozess ist durch eine große Heterogenität der in diesem Zusammenhang erstellen Arbeitsunterlagen gekennzeichnet. Dies trifft im besonde-

ren Maße auch auf die Dokumentation des zellenspezifischen Prozessablaufs zu, die u. a. eine wichtige Arbeitsgrundlage für die spätere SPS-Projektierung darstellt. Typische Inhalte einer solchen Prozessdokumentation sind die zur Bauteilbearbeitung notwendigen Prozessschritte (z.B. Einlegefolge, Spannfolge) sowie die prozessabhängigen Arbeitszustände der eingesetzten Ventile, Zylinder und Sensoren. Zur Darstellung dieses beschriebenen Sachverhaltes werden gegenwärtig eine Vielzahl redundanter, nicht-kompatibler Dokumente unter Verwendung unterschiedlicher IT-Systeme erzeugt, deren Ausprägungen von den individuellen Präferenzen des jeweiligen Sachbearbeiters abhängen (Abbildung 5-7). Eine einheitliche zellenspezifische Prozessbeschreibungsform existiert bis heute nicht. Bereichsübergreifende Missverständnisse, die letzten Endes zu fehlerbehafteten SPS-Programmen und somit zu zeitlich verzögerten Inbetriebnahmen führen, sind die logische Konsequenz dieser mehrdeutigen und inkonsistenten Prozessdokumentationen.

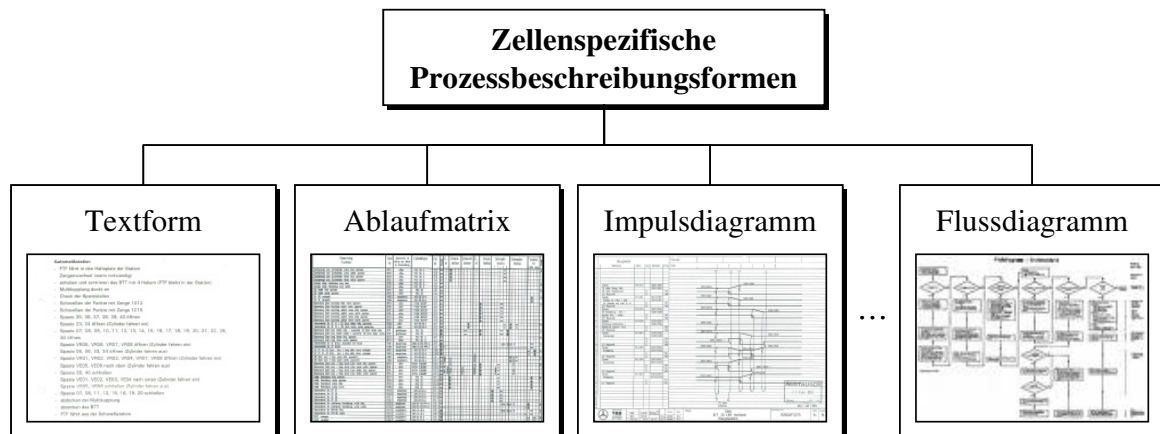


Abbildung 5-7: Heutige Dokumentationsformen zellenbezogener Prozessabläufe

Zur Verbesserung dieser beschriebenen Ist-Situation wurden im Rahmen der Digitalen Fabrik leistungsstarke Softwarelösungen entwickelt, die den Anwender bei der Erstellung zellenspezifischer Prozessbeschreibungen unterstützen. Diese IT-Werkzeuge bieten eine Auswahl vor-konfigurierter Prozesselemente (z.B. Einlegeprozesse, Spannprozesse), die sich mit Hilfe prozessspezifischer Eigenschaften (z.B. Prozesszeiten) näher charakterisieren lassen. Die individuellen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Prozesselementen bzw. ihre zeitliche Abfolge werden dabei in Form ablauforientierter Netzpläne („Pert-Diagramme“) und zeitlich-orientierter Balkendiagramme („Gantt-Diagramme“) festgelegt. Jedoch beschränken sich die in den digitalen Planungstools verfügbaren Prozesselemente auf rein technische, mechanikorientierte Prozesse. Zudem fehlen geeignete Hilfsmittel, um zwischen parallel und alternativ verlaufenden Prozessabfolgen differenzieren zu können. Aufgrund dieser Kritikpunkte ist eine eindeu-

tige bereichsübergreifende Prozessdokumentation mit Hilfe heute existierender IT-Werkzeuge nicht gegeben.

Vor diesem Hintergrund besteht eine zentrale Anforderung darin, ein eindeutiges, aus standardisierten Prozesselementen bestehendes Prozessmodell, welches als interdisziplinäre Kommunikations- und Verständigungsplattform entlang des gesamten Planungsprozesses dienen soll, zu entwickeln. Die Wichtigkeit eines solchen Prozessmodells wird u. a. in [BlFZ04] betont. Demnach hängt das Ergebnis eines Planungsprojektes insbesondere von der Qualität der dem Projekt zugrunde liegenden Prozessbeschreibung ab.

Weiterhin soll dieses digitale Prozessmodell derart aufbereitet werden, dass auf dessen Basis nicht nur verschiedene mechanikorientierte Simulationsuntersuchungen durchgeführt werden können. Vielmehr soll diese ablaufforientierte Prozessbeschreibung auch als Grundlage zur automatisierten Generierung ablauffähiger, IEC-konformer SPS-Programme – unter Beachtung der im Kapitel 4.6.1 aufgeführten Kritikpunkte heute bestehender Lösungsansätze – dienen.

5.3.2 Elemente des Prozessmodells

Zur Erfüllung der im vorigen Abschnitt beschriebenen Anforderungen ist es zwingend erforderlich, die in den Softwaretools existierenden Prozesselemente um zusätzliche Elemente sowie um prozessspezifische Eigenschaften zu erweitern. Da das digitale Prozessmodell u. a. als Grundlage zur automatisierten SPS-Programmgenerierung dienen soll, werden im Speziellen Elemente und Eigenschaften benötigt, deren Ausprägungen in der IEC 61131-3 beschrieben sind. So müssen analog zum Aufbau einer SPS-Schrittfolge Transitionen und bestimmte Verknüpfungselemente neu definiert werden, die unter Einhaltung vorgegebener Regeln zu einem digitalen Prozessmodell zusammengesetzt sind [IEC61131-3].

Zugunsten eines einheitlichen und eindeutigen Begriffsverständnisses werden im Folgenden die bereits vorhandenen bzw. die zusätzlich benötigten Elemente des Prozessmodells in insgesamt zwei Haupt- und vier Subklassen unterteilt. Die erste Hauptklasse fasst alle technischen Elemente zusammen, die sich wiederum in die beiden Subklassen Aktivitäten und Transitionen untergliedern lassen. Aktivitäten sind dabei als die Prozessschritte zu verstehen, die eine „Transformation von Leistungsobjekten von einem Anfangs- zu einem Endzustand bewirken“ [VDI3600] (Aktorik). Im Gegensatz dazu stellen Transitionen Weichschaltbedingungen zwischen aufeinander folgenden Aktivitäten dar, die als prozess- oder zeitbedingte Signale von der SPS verarbeitet werden (Sensorik). Die zweite Hauptklasse beinhaltet alle erforderlichen Verknüpfungselemente in Form von Alternativ- und Parallelverknüpfungen, die zur Generie-

rung IEC-konformer SPS-Schrittketten bzw. zur Erzeugung eines eindeutigen Prozessmodells benötigt werden. Eine zusammenfassende Übersicht über die zur anforderungsgerechten Entwicklung des digitalen Prozessmodells benötigten Elemente ist in Abbildung 5-8 gegeben.

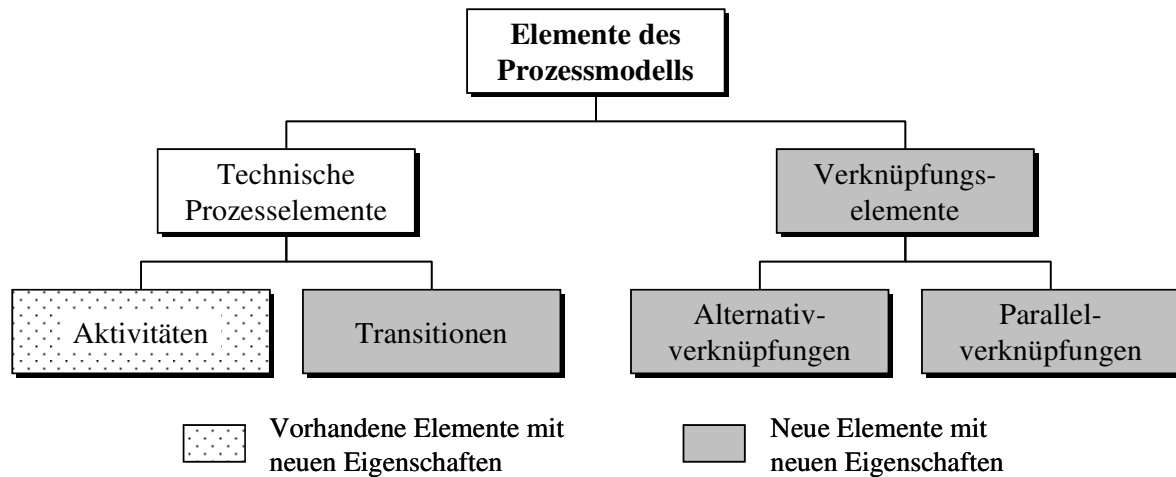


Abbildung 5-8: Elemente des Prozessmodells

Digitale Planungstools bieten die Möglichkeit, einzelne Elemente des Prozessmodells mit Hilfe vorkonfigurierter Eigenschaften näher zu charakterisieren. Grundsätzlich lassen sich diese prozessbeschreibenden Eigenschaften in zwei Gruppen untergliedern: in allgemeine, prozessneutrale (z.B. Prozessname, Prozesszeit) und in prozessspezifische Eigenschaften (z.B. Haltekräfte bei Spannprozessen). Zudem verfügen digitale Planungstools meist über Funktionalitäten, einzelnen Prozesstypen vordefinierte Merkmale anzuhängen, nach denen das Prozessmodell gefiltert und somit analysiert werden kann. So differenzieren beispielsweise viele Unternehmen zwischen „wertschöpfenden“ und „nicht wertschöpfenden“ Prozessen, um somit den zellenspezifischen Prozessablauf gezielt nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimieren zu können. Um eine modellbasierte Generierung eines ablauffähigen SPS-Programms zu ermöglichen, ist es sinnvoll, die verwendeten Prozesselemente weiterhin nach ihrer steuerungstechnischen Relevanz zu unterscheiden bzw. den von einer Steuerung koordinierten Prozessschritten die Art der jeweiligen Steuerung zuzuweisen (z.B. SPS, Robotersteuerung).

Im Folgenden werden die in dieser Arbeit neu konfigurierten Prozesselemente zuzüglich ihrer individuellen Eigenschaften – insbesondere vor dem Hintergrund der modellbasierten Erstellung von SPS-Programmen – vorgestellt und kurz erläutert.

Aktivitäten

Grundsätzlich sind Aktivitäten als einzelne Prozessschritte zu verstehen, die zur Herstellung eines Produktes notwendig sind. Diese werden entweder manuell (nicht steuerungsrelevant)

oder automatisiert ausgeführt. Beispiele für typische zellenbezogene Rohbau-Aktivitäten sind Einlege-, Spann- oder Schweißprozesse. Zur näheren Beschreibung der einzelnen Aktivitäten steht den Prozessplanern eine erweiterte Auswahl vorkonfigurierter Prozesseigenschaften zur Verfügung, die neben allgemeingültigen vor allem auch steuerungsspezifische Attribute beinhalten. Da steuerungsrelevante Aktivitäten in der erzeugten SPS-Schrittfolge die Schritte darstellen, die wiederum bestimmte Aktionen im SPS-Programm auslösen, beziehen sich die neu zu deklarierenden Attribute auf die hierzu benötigten Informationen. Dies sind beispielsweise Signalnamen, Bestimmungszeichen und aktionsbezogene Überwachungszeiten.

Transitionen

Transitionen stellen zum einen Weichschaltbedingungen zwischen aufeinander folgenden Aktivitäten dar, dienen zum anderen aber auch als Entscheidungsbedingung nach Alternativverzweigungen. Analog zu Aktivitäten können Transitionen steuerungsrelevant oder nicht steuerungsrelevant sein. Dies hängt davon ab, ob die Weichschaltbedingung durch die Steuerung überprüft wird oder ob die Überprüfung durch einen Werker erfolgt (z.B. Sichtprüfung). Da in einer steuerungsrelevanten Transitionsbedingung zumeist mehrere Sensorensignale abgefragt und von der SPS verarbeitet werden, müssen sich diese Informationen auch in den transitionsbezogenen Eigenschaftsdialogen hinterlegen lassen. Dies kann sowohl über eine Auflistung der notwendigen Variablen zuzüglich ihrer logischen Verknüpfungen als auch mit Hilfe eines vordefinierten Unterprogramms erfolgen.

Alternativverknüpfungen

Alternativverknüpfungen kennzeichnen im Prozessmodell den Anfang und das Ende von (zumeist variantenbedingten) Prozessverzweigungen, wobei jeweils nur ein Prozesszweig – abhängig von der nachfolgenden Transition – durchlaufen wird. In Analogie zu Aktivitäten und Transitionen können Alternativverknüpfungen steuerungsrelevant oder nicht steuerungsrelevant sein. Dies hängt im Wesentlichen davon ab, ob die nach einer Alternativverknüpfung stehende Transitionsbedingung manuell (durch einen Werker) oder automatisiert (durch die SPS) überprüft wird.

Parallelverknüpfungen

Im Unterschied zu Alternativverknüpfungen symbolisieren Parallelverknüpfungselemente den Anfang und das Ende von mehreren Prozesszweigen, die unabhängig von der jeweiligen Produktvariante zeitgleich durchlaufen werden. Als eine häufige Ursache für parallel verlaufende

Prozessschritte ist die Minimierung produktionsbezogener Taktzeiten (z.B. durch den parallelen Einsatz mehrerer Schweißroboter) zu nennen. Die steuerungsbezogene Relevanz von Parallelverknüpfungen ergibt sich in Abhängigkeit vom „Ausführungsmechanismus“ der jeweils nachfolgenden Aktivitäten, die entweder manuell oder automatisiert ausgeführt werden.

Für die beiden Verknüpfungstypen Alternativverknüpfung und Parallelverknüpfung müssen analog zu Aktivitäten und Transitionen eindeutige steuerungsbezogene Eigenschaften als Basis zur automatisierten SPS-Programmgenerierung hinterlegt werden. Neben allgemeinen Angaben (Steuerungsrelevanz, -identifikation) beziehen sich diese Informationen vor allem auf den Verknüpfungs- und Knotentyp (Anfangs-/Endknoten) sowie auf die Anzahl der von den Verknüpfungselementen eingeschlossenen Verzweigungen.

5.3.3 Interdisziplinäre Prozessmodellierung

In Analogie zur Bereitstellung der mechatronischen Ressourcenkomponenten werden die entsprechend vorkonfigurierten Prozesselemente den Prozessplanern in Form einer standardisierten projektübergreifenden Prozessbibliothek zur Verfügung gestellt. Dies bietet den Vorteil, dass alle Projektbeteiligten mit denselben Prozesselementen arbeiten, dass Änderungen zentral eingesteuert werden können und dass somit eine eindeutige, standardisierte und projektneutrale Prozessbeschreibung gewährleistet ist. Ihren projektspezifischen Bezug erfahren die verwendeten Prozesselemente dadurch, dass sie aus der Prozessbibliothek entnommen und an die individuelle Projektsituation (über die Prozesseigenschaften) angepasst werden.

Im Gegensatz zum Entwicklungsvorgehen beim Aufbau des mechatronischen Ressourcenmodells erfolgt die Erstellung des zellenspezifischen Prozessmodells nach dem klassischen Top-Down-Prinzip: Auf Grundlage grober Prozessvorgaben von der Fertigungsplanung wird das digitale Prozessmodell im Rahmen der Detailplanung sukzessive detailliert. Der Betriebsmittelkonstrukteur legt dabei in enger Abstimmung mit den Robotikspezialisten die vorrichtungsbezogenen Prozessabläufe (z.B. Einlege- und Spannreihenfolge) fest, wohingegen der Robotikspezialist für die Detailgestaltung der roboterbezogenen Prozessabläufe verantwortlich ist. Komplettiert wird das interdisziplinäre Prozessmodell durch Informationen aus dem Bereich Elektro-/Steuerungstechnik. Diese beziehen sich zum einen auf das Hinzufügen steuerungsrelevanter Prozesseigenschaften. Zum anderen sind bei der Erstellung des Gesamtmodells steuerungsspezifische Verknüpfungsregeln zu beachten, um ein ablauffähiges SPS-Programm automatisiert erzeugen zu können. Ein Beispiel eines solchen Prozessmodells, welches unter Beachtung IEC-konformer Verknüpfungsregeln entwickelt wurde, ist in Abbildung 5-9 gegeben.

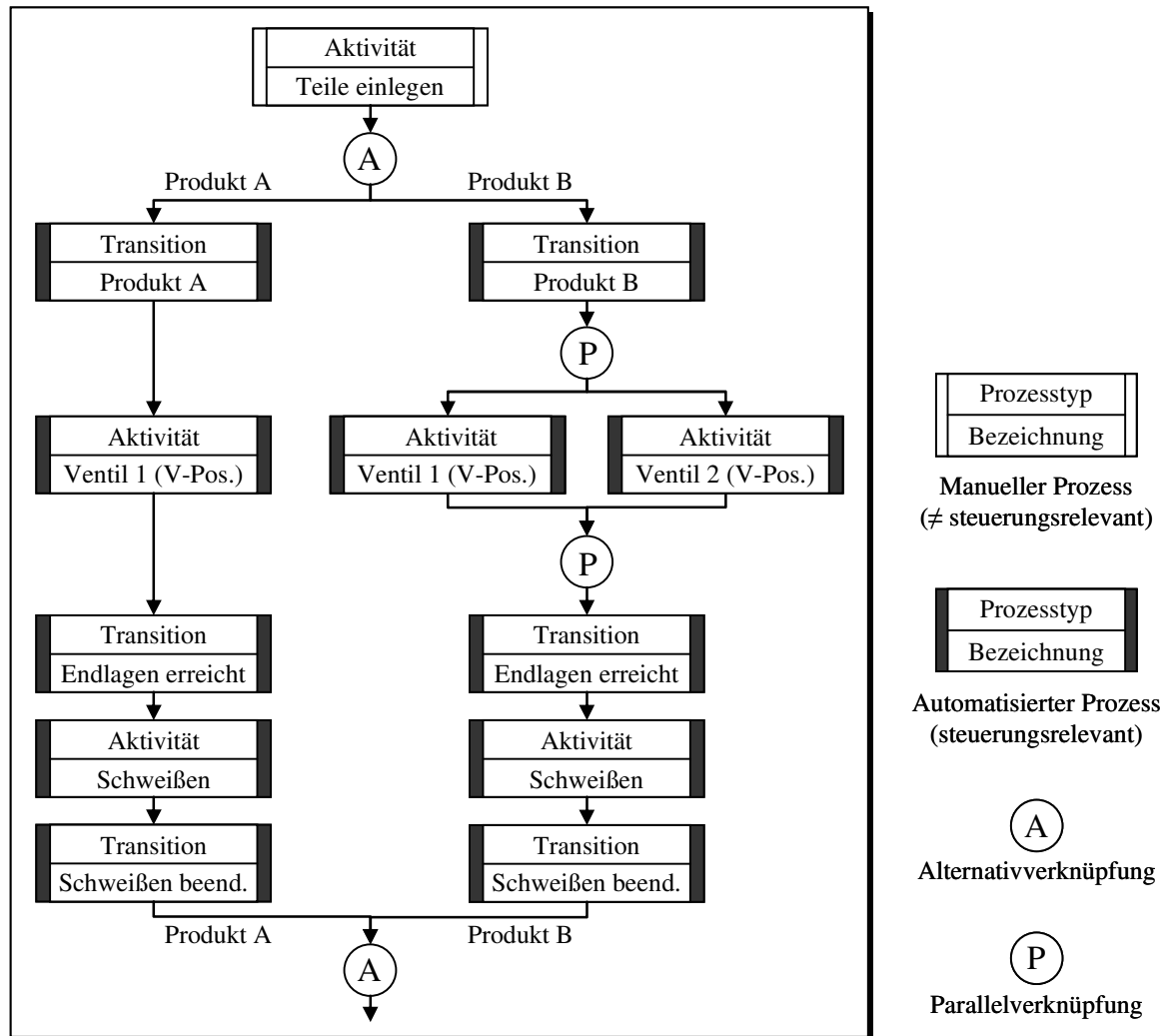


Abbildung 5-9: Beispiel eines interdisziplinären Prozessmodells

Im Gegensatz zu heutigen Prozessbeschreibungsformen stellt das in dieser Arbeit konfigurierte Prozessmodell eine standardisierte kollaborative Arbeitsumgebung dar, auf deren Basis die an der Prozessplanung beteiligten Fachbereiche vernetzt zusammenarbeiten können. Prozessbezogene Änderungen müssen nicht mehr länger in einer Vielzahl unterschiedlicher Arbeitsunterlagen nachgepflegt werden; durch den Einsatz einer zentralen Datenbasis stehen sie allen Prozessbeteiligten direkt und transparent zur Verfügung. Da alle Fachbereiche durch die Verwendung einheitlicher projektneutraler Prozesselemente fortan „dieselbe Sprache sprechen“, lassen sich zudem domänenübergreifende Missverständnisse – insbesondere an der organisatorischen Schnittstelle zwischen Mechanikkonstruktion und Elektro-/SPS-Projektierung – signifikant verringern. Dieser Sachverhalt spiegelt sich letzten Endes in der Entwicklung qualitativ hochwertiger SPS-Programme und folglich in der Realisierung beschleunigter und stabiler Inbetriebnahmen wider.

Trotz aller Vorteile dürfen die mit dem Einsatz eines interdisziplinären Prozessmodells einhergehenden Herausforderungen nicht unberücksichtigt bleiben. Diese beziehen sich im Wesentlichen auf administrative Themen (Datenhoheit, Änderungsrechte etc.) sowie auf die Beherrschung der durch die Berücksichtigung von elektrischen und steuerungstechnischen Prozessinformationen resultierenden Datenkomplexität. In diesem Zusammenhang bieten jedoch die heute existierenden IT-Werkzeuge der Digitalen Fabrik entsprechende Lösungen an. Mit Hilfe eines rollenbezogenen „Rechtmanagements“ können beispielsweise sämtliche administrative Fragestellungen geklärt werden. Zur Beherrschung der Gesamtkomplexität dienen hingegen prozessbezogene Filtermechanismen, mit deren Hilfe eine gezielte Prozessoptimierung (z.B. hinsichtlich SPS-Programmgenerierung) durchgeführt werden kann.

5.4 Erstellung eines mechatronischen PPR-Datenmodells

Parallel zur zellenbezogenen Prozess- und Ressourcenplanung erfolgt die projektspezifische Verknüpfung zwischen den Prozesselementen, den eingesetzten mechatronischen Ressourcenkomponten und den in der Zelle zu fertigenden Produkten. Dieses so entwickelte mechatronische PPR-Datenmodell stellt nicht nur die Grundlage zur Durchführung verschiedener Simulationsuntersuchungen dar. Es bildet zudem eine zentrale Planungs- und Kommunikationsplattform, auf deren Basis sich im weiteren Planungsverlauf standardisierte Arbeitsunterlagen sowie zellenspezifische SPS-Programme automatisiert generieren lassen.

5.4.1 Wechselwirkungen im mechatronischen PPR-Datenmodell

Eine der zentralen Aufgaben der in der detaillierten Zellenplanung involvierten Fachbereiche liegt in der Zusammenführung zellenbezogener Produkte, Prozesse und Ressourcen. Dadurch wird eindeutig festgelegt, welches Produkt bzw. Bauteil (was) in welchem Prozess (wie) mit welcher Ressource (womit) be- bzw. verarbeitet wird. Gemäß dem Planungsfortschritt erfolgt diese projektspezifische Verknüpfung nach dem klassischen Top-Down-Vorgehen. So legt die Fertigungsplanung beispielsweise bereits in der Konzeptphase fest, welches Produkt auf welcher Linie bzw. in welcher Zelle unter Verwendung welcher Bauteile hergestellt werden soll. Basierend auf diesen Planungsvorgaben wird dieses zunächst grobe PPR-Modell im Rahmen der zellenspezifischen Detailplanung sukzessive detailliert. Wie in Abbildung 5-10 illustriert, werden hierbei zunächst alle Produkte, Prozesse und Ressourcen auf Stationsebene (z.B. Einlegestation, Schweißstation) miteinander verlinkt, was die Basis für zellenspezifische Kapazitätsbetrachtungen bildet. Die detaillierte PPR-Verknüpfung erfolgt schließlich auf technischer

Prozessebene unter Verwendung der in dieser Arbeit neu konfigurierten Prozesselemente und der mechatronischen Ressourcenkomponenten.

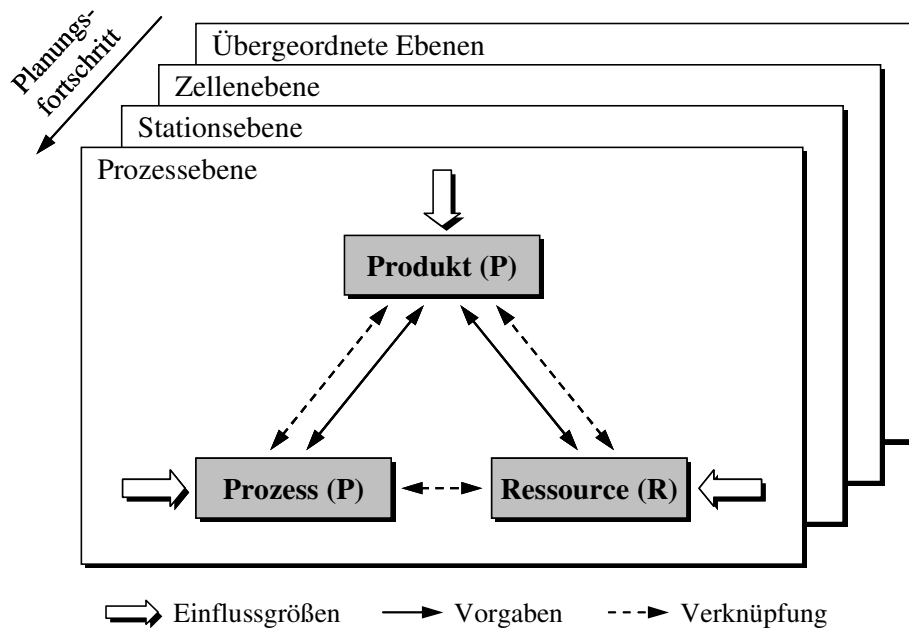


Abbildung 5-10: Wechselwirkungen im mechatronischen PPR-Datenmodell

Grundsätzlich ist das PPR-Datenmodell einer Vielzahl unterschiedlicher Einflüsse ausgesetzt. Diese lassen sich allgemein in externe und interne Einflussgrößen untergliedern. Externe Einflussgrößen können dabei als die Größen verstanden werden, die von den planungsbezogenen Fachbereichen nicht direkt beeinflusst werden können (z.B. Produktänderungen, betriebliche Auflagen). Interne Einflussgrößen werden hingegen direkt von den am Planungsprozess beteiligten Fachbereichen induziert und spiegeln sich letzten Endes in modifizierten Prozess- und Ressourcendaten wider.

Neben den ebenenbezogenen PPR-Verknüpfungen und den auf das PPR-Datenmodell einwirkenden Einflussgrößen zeigt Abbildung 5-10 die zwischen den verplanten Produkten und den geplanten Prozessen und Ressourcen herrschenden Wechselwirkungen. Zum einen stellen die Produktdaten (z.B. 3D-Geometrie, Schweißpunkte, SFK) wesentliche Eingangsgrößen zur detaillierten Prozess- und Ressourcengestaltung dar. Zum anderen beeinflussen die generierten Prozess- und Ressourcendaten (z.B. Einlegereihenfolge, eingesetzte Betriebsmittel) aber auch die detaillierte Ausgestaltung des zu realisierenden Produktes im Sinne einer produktionsgerechten Produktgestaltung. Vor diesem Hintergrund stellt das mechatronische PPR-Datenmodell eine zentrale bereichsübergreifende Planungs- und Kommunikationsplattform dar, auf deren Basis wichtige Synergieeffekte zwischen den einzelnen Fachbereichen genutzt werden können und sich somit wirtschaftliche Gesamtoptima erzielen lassen.

5.4.2 Das PPR-Datenmodell als interdisziplinärer „Planungsmaster“

Aufgrund seines zentralen Charakters nimmt das PPR-Datenmodell die Rolle eines interdisziplinären „Planungsmasters“ ein. Dies äußert sich u. a. darin, dass alle Fachbereiche unter Verwendung abgestimmter IT-Werkzeuge fortan auf derselben Datenbasis arbeiten bzw. dass Änderungen nur noch zentral an einer Stelle eingepflegt werden müssen und anschließend allen Projektbeteiligten direkt und transparent zur Verfügung stehen. Zudem stellt das PPR-Modell die Basis zur Durchführung 3D-gestützter Simulationsuntersuchungen dar. Beispiele hierfür sind Taktzeit- sowie dynamische Kollisions- und Zugänglichkeitsanalysen. Auf diese Weise lassen sich nicht nur die im Vorfeld definierten Prozessabläufe frühzeitig validieren. Vielmehr kann das Zusammenspiel von Prozessen und Ressourcen unter Berücksichtigung der zu fertigenden Produkte überprüft und hinsichtlich eines zellenbezogenen Gesamtoptimums frühzeitig verbessert werden.

Durch die Nutzung der im Rahmen dieser Arbeit neu konfigurierten Prozess- und mechatronischen Ressourcenelemente lassen sich auf Basis des PPR-Datenmodells zudem weitere Nutzenpotentiale erschließen. Diese beziehen sich vor allem auf die modellbasierte Generierung bereichsübergreifender Arbeitsunterlagen sowie auf die automatisierte Ableitung IEC-konformer Steuerungsprogramme.

Automatisierte Erzeugung bereichsübergreifender Arbeitsunterlagen

Wie in Kapitel 4.4 beschrieben, ist die Ergebnisdokumentation in heutigen Planungsprojekten mit einem großen zeitlichen Aufwand verbunden. Hinzu kommt, dass gegenwärtig eine Vielzahl unterschiedlicher Dokumentationsarten mit zum Teil redundanten Inhalten existieren, die aufgrund eines unzureichenden Änderungsmanagements in der Regel nicht dem aktuellen Planungsstand entsprechen. Vor diesem Hintergrund wurden in den vergangenen Jahren einige Lösungen entwickelt, die eine automatisierte Erzeugung von Arbeitsunterlagen auf Basis dreidimensionaler CAD-Modelle ermöglichen. Jedoch handelt es sich hierbei zumeist um proprietäre Lösungen bzw. beschränken sich diese Ansätze auf die Generierung rein mechanikbezogener Arbeitsunterlagen (z.B. Stücklisten Mechanik, Fertigungszeichnungen).

Wie in Abbildung 5-11 dargestellt, unterstützt das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte mechatronische Datenmodell nicht nur die Erzeugung mechanikbezogener Arbeitsunterlagen. Es stellt zudem die Basis zur automatisierten Generierung standardisierter interdisziplinärer Listen und Pläne dar. Hierzu zählen beispielsweise Pneumatik- und Elektropläne sowie signalbezogene Zuweisungslisten, die über entsprechende Systemschnittstellen aus der PPR-Datenbasis

exportiert und in die jeweiligen Zielsysteme eingelesen werden können. Auf diese Weise lässt sich eine Effizienzsteigerung im Rahmen der zellenbezogenen Produktionsplanung erreichen, die sich sowohl in einem bedeutenden Zeitgewinn als auch in einer verbesserten Planungsqualität widerspiegelt.

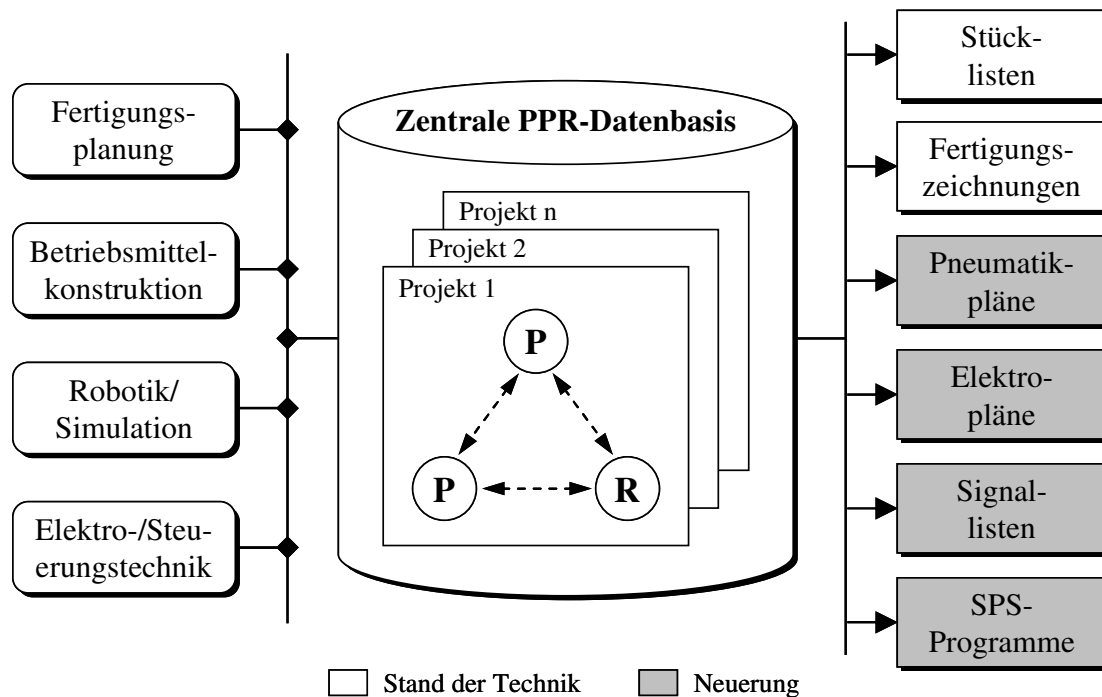


Abbildung 5-11: Das PPR-Datenmodell als interdisziplinärer „Planungs-master“

Automatisierte Generierung IEC-konformer SPS-Programme

Als ein wesentliches Defizit in heutigen Planungsprozessen wird in Kapitel 4.4 die unzureichende Unterstützung bei der SPS-Programmerstellung identifiziert. Unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.6.1 aufgeführten Kritikpunkte bestehender Lösungsansätze wird in dieser Arbeit ein Weg aufgezeigt, der eine automatisierte Generierung ablauffähiger SPS-Programme nach Vorgaben der IEC 61131-3 ermöglicht. Diesem hier entwickelten Lösungsansatz liegen demnach folgende Anforderungen zugrunde:

- Nahtlose Integration in den zellenspezifischen Planungsprozess
- Positives Aufwand-Nutzen-Verhältnis für spätere Anwenderakzeptanz
- Generierung von strukturierten, leicht verständlichen SPS-Programmen
- Erzeugung vollständiger, funktionsfähiger SPS-Programme nach IEC 61131-3
- Softwaretechnische Umsetzbarkeit mit kommerziellen IT-Werkzeugen
- Unterstützung standardisierter Datenaustauschformate

Basis dieser neu entwickelten Lösung stellt das in Abbildung 5-11 illustrierte PPR-Datenmodell unter Berücksichtigung der neu konfigurierten Prozess- und Ressourcenelemente dar. Dabei werden die steuerungsrelevanten Inhalte des zellenspezifischen Prozessmodells über definierte Systemschnittstellen in Form einer IEC-konformen SPS-Schritt看ette an das jeweils verwendete SPS-Programmiersystem übergeben. Das Prozesselement „Aktivität“ im Prozessmodell entspricht dabei dem SPS-Element „Schritt“ einer SPS-Schritt看ette, die übrigen Elemente (Transitionen, Alternativ-/Parallelverknüpfungen) sind in beiden Prozessbeschreibungsformen enthalten. Neben diesen Hauptelementen (inklusive ihrer individuellen Abhängigkeiten) werden zudem alle mit diesen Elementen verbundenen steuerungsspezifischen Eigenschaften mit ins erzeugte SPS-Programm übernommen. Die modellbasierte Generierung einer funktionsfähigen SPS-Schritt看ette stellt jedoch nur einen Teil des neuen Lösungsansatzes dar. Durch die projektspezifische Verknüpfung von Prozessen und Ressourcen können zudem die in den mechatronischen Ressourcenkomponenten integrierten SPS-Programmbausteine sowie die darin enthaltenen Signalinformationen in das jeweilige SPS-Programm übernommen werden.

Auf diese Weise entsteht ein vollständiges, ablauffähiges SPS-Programm nach Vorgaben der IEC 61131-3, das im Rahmen der SPS-Projektierung lediglich mit steuerungsspezifischen Zusatzinformationen vervollständigt werden muss. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um zellenspezifische Sicherheitskonzepte („Not-Aus-Strategien“) sowie um die Implementierung zusätzlicher Programmroutinen, die insbesondere den Umgang mit auftretenden Fehlern beschreiben. Die hierfür erforderlichen Programmbestandteile liegen jedoch meist in Form vorgefertigter und getesteter Module vor und müssen lediglich in das den Zellenablauf beschreibende SPS-Programm integriert werden.

5.5 Virtuelle Inbetriebnahme als Übergang von der Digitalen in die reale Fabrik

Bezogen auf den gesamten Lebenszyklus automatisierter Fertigungssysteme kommt dem mechatronischen PPR-Datenmodell in vielerlei Hinsicht eine herausragende Bedeutung zu. Auf der einen Seite unterstützt und fördert es ein simultanes interdisziplinäres Planungsvorgehen und bildet aufgrund seines zentralen Charakters die Basis für qualitativ hochwertige und beschleunigte Planungsprozesse. Auf der anderen Seite stellt dieses bereichsübergreifende Datenmodell die ideale Plattform zur frühzeitigen Validierung und Optimierung zellenbezogener Steuerungsprogramme sowie produktionsbezogener IT-Systeme dar. Somit lassen sich nicht nur Erstinbetriebnahmeprozesse mit dem Ergebnis höherer Soft- und Hardwarereifegrade zum

Produktionsbeginn deutlich beschleunigen. Mit Hilfe dieser innovativen Absicherungsmethode der virtuellen Inbetriebnahme können darüber hinaus produktbedingte Integrationsprozesse bzw. Anlagenmodernisierungen während des laufenden Produktionsbetriebs in kürzeren Zeitintervallen und mit steileren Wiederanläufen realisiert werden.

5.5.1 Virtuelle Inbetriebnahme: Vorgehensweise und Nutzenpotentiale

Wie in Kapitel 5.4.2 erläutert, können bereits während des zellenspezifischen Entwicklungsprozesses diverse Simulationsuntersuchungen, wie z.B. Kollisions- und Zugänglichkeitsanalysen, durchgeführt werden. Diese basieren auf der aufgabenabhängigen Verknüpfung zwischen digitalen Produkt-, Prozess- und Ressourcedaten und beschränken sich demnach auf reine Geometrie- bzw. Kinematikabsicherungen der verwendeten Betriebsmittel. Das mechatronische PPR-Datenmodell bildet jedoch nicht nur die Basis für simulationsgestützte Absicherungen der entwickelten Anlagenmechanik. Durch die Verwendung eines mechatronischen Ressourcenmodells lässt sich zudem das funktionale Zusammenspiel von mechanischen, elektrischen und steuerungstechnischen Anlagenbestandteilen vor dem Aufbau des realen Produktionssystems überprüfen und verbessern. Hierzu werden im Gegensatz zur prozessgetriebenen Zellsimulation die mechatronischen Betriebsmittel nicht von digitalen Prozessdaten aus der Digitalen Fabrik angesteuert. Vielmehr basiert die funktionsorientierte Absicherungsmethode der virtuellen Inbetriebnahme auf Automatisierungskomponenten aus der realen Fabrik, die über definierte Systemschnittstellen mit dem mechatronischen Ressourcenmodell verbunden werden. Aufgrund dieser hybriden Datenversorgung bildet die Methode der virtuellen Inbetriebnahme den entscheidenden Schritt beim Übergang von der Digitalen in die reale Fabrik.

Wie in Abbildung 5-12 dargestellt, können im Zusammenspiel mit dem mechatronischen Ressourcenmodell sowohl Fehler in den entwickelten SPS-Programmen detektiert und beseitigt als auch die Funktionalitäten der verwendeten HMI-Software getestet und gegebenenfalls optimiert werden. Durch den Einsatz vorkonfigurierter mechatronischer Ressourcen verhält sich das mechatronische Ressourcenmodell in seiner Funktionsweise dabei analog zur später eingesetzten realen Fertigungszelle: Steuerungsspezifische Ausgangssignale bewirken definierte Aktionen im Ressourcenmodell (z.B. Ventilansteuerung), modellspezifische Ausgangssignale (z.B. Spannerendlagenmeldungen) werden hingegen als Eingangssignale an die entsprechende Steuerung zurückgegeben. Für die modellbasierte SPS-Programmvalidierung spielt es dabei keine Rolle, ob die Steuerungssoftware auf einer realen Hardware oder auf einer SPS-Simulation läuft. Wichtig ist nur, dass die verwendeten Steuerungskomponenten über kompatible

Schnittstellen verfügen. Der Einsatz einer SPS-Simulationsumgebung bietet zwar den Vorteil, dass beim Softwaretest keine Hardware erforderlich ist, bringt aber den entscheidenden Nachteil mit sich, dass die entsprechende Hardware- und Buskonfiguration nicht mitgetestet werden kann.

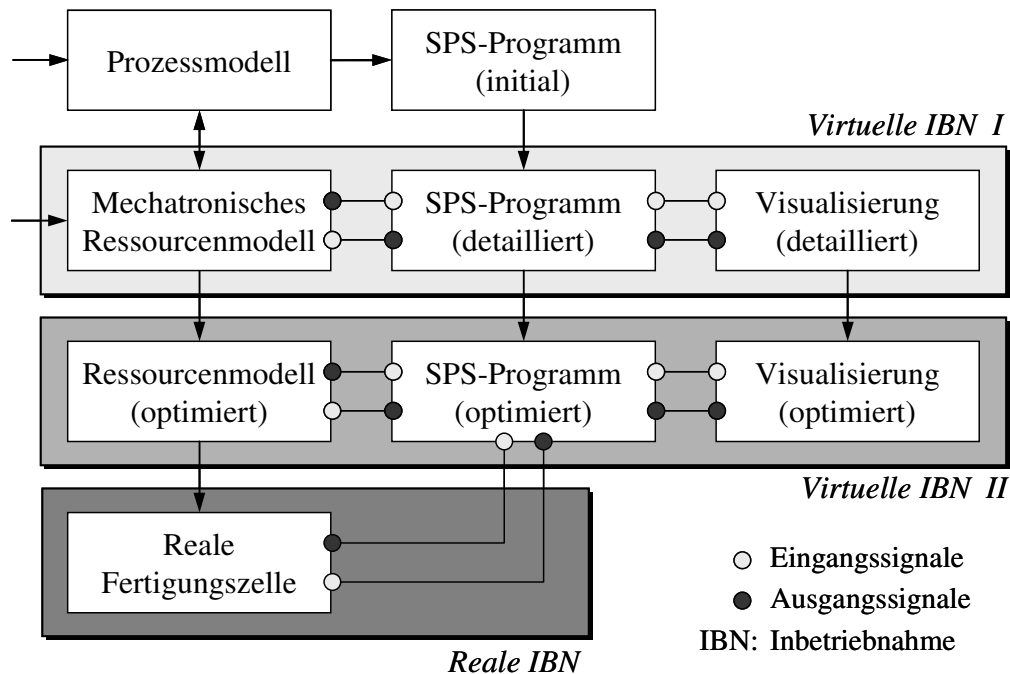


Abbildung 5-12: Virtuelle Inbetriebnahme als Übergang von der Digitalen in die reale Fabrik

Mit Hilfe einer virtuellen Inbetriebnahme lässt sich jedoch nicht nur der „Gut-Ablauf“ eines SPS-Programms im Automatikbetrieb testen. Neben der modellbasierten Validierung der Betriebsarten Hand- und Einrichtbetrieb liegt ein weiteres Nutzenpotential virtueller Inbetriebnahmen im gezielten Herbeiführen und im systematischen Testen möglicher Störszenarien, ohne dabei Personen oder die Produktionsanlage gefährden zu müssen. Auf Basis aktueller Layoutdaten der Digitalen Fabrik können zudem das Zusammenspiel von Roboter- und SPS-Programmen (z.B. Freigabe-, Verriegelungssignale) unter Verwendung der originalen Steuerungssoftware überprüft sowie ausgehend davon wichtige Produktionskenngrößen abgeleitet werden. Hierzu zählen beispielsweise die Ermittlung realer Roboterlastungen, kritischer Fertigungspfade sowie zellenbezogener Taktzeiten. Diese wirtschaftlichen Kenngrößen lassen sich im Rahmen einer virtuellen Inbetriebnahme so lange in iterativen Regelkreisen optimieren, bis schließlich alle geforderten Leistungsmerkmale erfüllt sind.

Aufgrund der steigenden Gesamtkomplexität zellenbezogener Steuerungsprogramme und den sich hieraus ergebenden potentiellen Fehlerquellen empfiehlt sich der Einsatz standardisierter

Checklisten, um somit einen einheitlichen Ablauf bei der Durchführung virtueller Inbetriebnahmen gewährleisten zu können. Analog zum späteren Inbetriebnahmeprozess sollten diese Checklisten zum einen eine vordefinierte Reihenfolge zur Überprüfung des zellenbezogenen „Gut-Ablaufs“ beinhalten. Zum anderen sollten aber auch die in der Realität vorkommenden Fehlersituationen in diesen standardisierten Checklisten aufgeführt sein. Durch einen kontinuierlichen Abgleich dieser vordefinierten Fehlertestszenarien mit den in der Realität auftretenden Störfällen kann zudem eine permanente Verbesserung der Softwarequalität in zukünftigen Planungsprojekten erzielt werden.

Qualitativ hochwertige Steuerungsprogramme stellen nicht nur die Basis für einen reibungslosen Betrieb der jeweiligen Produktionsanlage dar, sondern bilden insbesondere die Voraussetzung für die Durchführung beschleunigter und stabilerer Produktionsanläufe. Wird in heutigen Inbetriebnahmeprojekten noch der größte Zeitanteil auf die Inbetriebnahme elektrischer und steuerungstechnischer Anlagenbestandteile bzw. auf die Suche und Beseitigung von Softwarefehlern verwendet [ZäWü05], so können all diese Tätigkeiten fortan im Rahmen der virtuellen Inbetriebnahme vorweggenommen werden. Weiterhin wird es möglich sein, das später eingesetzte Bedienpersonal unter Verwendung der realen Visualisierungssysteme anhand des mechatronischen Ressourcenmodells im Vorfeld der Anlageninbetriebnahme zu schulen. Dies führt zu einem erhöhten Qualifikationsstand des Maschinenbedieners zum Produktionsbeginn. Zum anderen bewirken diese „virtuellen Schulungsmaßnahmen“ eine zusätzliche Zeitersparnis im Anlaufprozess, was sich letztlich in geringeren Gesamtkosten, in schnelleren Markteintritten und somit in einer erhöhten Gesamtrentabilität widerspiegelt.

5.5.2 Virtuelle Serienbetreuung zugunsten beschleunigter Integrationsprozesse

Die weit reichenden Vorteile des mechatronikorientierten Planungsansatzes beschränken sich nicht ausschließlich auf den Planungs- und Erstinbetriebnahmeprozess automatisierter Fertigungssysteme. Ihr volles Potential entfaltet diese neue Planungsmethodik erst bei produktbedingten Integrationsprozessen sowie bei zellenbezogenen Prozess- und Ressourcenmodifikationen während des laufenden Produktionsbetriebs. Mit Hilfe der Softwarevalidierungsmethode der virtuellen Inbetriebnahme lassen sich vor allem in dieser Phase erhebliche Zeit- und Kostenpotentiale bei einem gleichzeitigen softwarebezogenen Qualitätszuwachs erschließen. Dies rührt daher, dass zunächst alle soft- und hardwarebezogenen Anlagenänderungen entkoppelt von der realen Anlage anhand des mechatronischen Ressourcenmodells getestet und bewertet werden können. Erst nachdem die geforderte Gesamtfunktionalität erfolgreich nachgewiesen

wurde, erfolgt der Datentransfer aus der Digitalen in die reale Fabrik. Dadurch können die für die Umbaumaßnahmen erforderlichen Stillstandszeiten der Fertigungssysteme signifikant verringert, die Wiederanläufe beschleunigt und das Risiko für etwaige Störfälle während des Produktionsbetriebs deutlich reduziert werden. Das Ergebnis dieser „virtuellen Serienbetreuung“, deren prinzipieller Ablauf Abbildung 5-13 zu entnehmen ist, spiegelt sich letzten Endes in einem lebenszyklusbezogenen Produktivitätszuwachs der betrachteten Fertigungszellen wider.

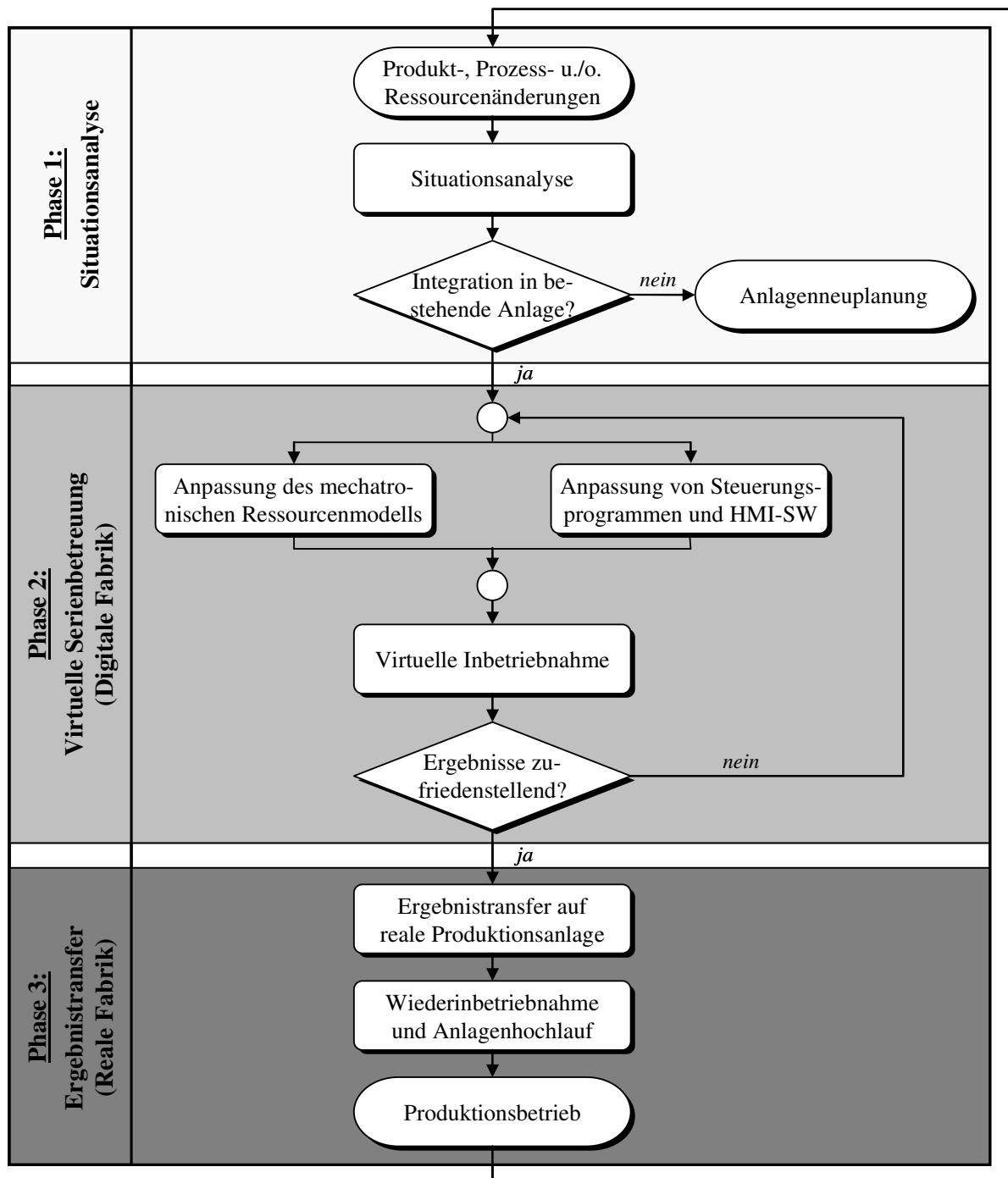


Abbildung 5-13: Virtuelle Serienbetreuung im Regelkreis des Produktionslebenszyklus

Der Übergang von der „Digitalen in die reale Fabrik“ bildet nur einen Teil der anzustrebenden Vernetzung dieser beiden „Welten“. Durch die Realisierung eines geschlossenen Regelkreises zwischen der Digitalen und der realen Fabrik eröffnen sich weitere wichtige Nutzenpotentiale. Ein permanenter Rückfluss produktionsbezogener Optimierungen und Erfahrungen in das mechatronische Ressourcenmodell stellt zum einen die Grundlage für eine effiziente Durchführung von Integrationsprozessen und Anlagenmodernisierungen dar. Zum anderen kann dieses gewonnene Produktionswissen nachhaltig in die digitale Planung integriert werden und findet auf diese Weise im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses wieder Eingang in neue Planungsprojekte.

5.5.3 Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit

Die in den vorigen Abschnitten erläuterten Nutzenpotentiale, die durch den Einsatz virtueller Inbetriebnahmen erschlossen werden können, stellen eine Seite der Medaille dar. Auf der anderen Seite dürfen die zur Durchführung virtueller Inbetriebnahmen erforderlichen Zusatzaufwendungen nicht unberücksichtigt bleiben, um die Wirtschaftlichkeit dieser innovativen Absicherungsmethode objektiv bewerten zu können.

Grundsätzlich kann die Wirtschaftlichkeit neuer Technologien, Methoden oder IT-Lösungen nach folgender allgemeingültiger Formel ermittelt werden:

$$\text{Wirtschaftlichkeit} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}}$$

Der mit dem Einsatz der neu entwickelten Planungslösung einhergehende Nutzen wird in den vorangegangenen Abschnitten ausführlich beschrieben. Dieser spiegelt sich in Zeit- und Kosteneinsparungen im Planungs- und Anlaufprozess sowie in einer verbesserten Planungsqualität mit höheren Anlagenreifegraden wider. Die Qualitätssteigerungen führen letzten Endes zu einem stabileren Betriebszustand der jeweiligen Produktionssysteme sowie zu kürzeren Stillstandszeiten bei Optimierungs- und Integrationsprozessen. Die mit Hilfe virtueller Inbetriebnahmen zu erschließenden Potentiale sind dabei umso höher,

- je höher die **Zellenkomplexität** bzw. der **Steuerungsanteil** am Gesamtsystem ist,
- je höher das zellenspezifische **Risikopotential** im Verbund mit anderen Systemen ist,
- je mehr **Produktvarianten** nachträglich in die Fertigungszelle integriert werden,
- je tiefer die **Digitale Fabrik** bereits im jeweiligen Unternehmen verankert ist bzw.
- je mehr unternehmensspezifisches **Know-how** vorhanden ist.

Die zur Durchführung virtueller Inbetriebnahmen benötigten Zusatzaufwendungen lassen sich prinzipiell in zwei Aufwandskategorien untergliedern:

- **Zusätzlicher Modellierungsaufwand:** Dieser wird im Wesentlichen durch die Komplexität der zu modellierenden Fertigungszelle bestimmt. Nach [Zeug98] setzt sich die Gesamtkomplexität aus der modellierten Elementeanzahl (z.B. Anzahl an Baugruppen, E/As), den Elementebeziehungen sowie der Verschiedenartigkeit dieser Beziehungen zusammen.
- **Sonstige Zusatzaufwendungen:** Hierzu zählen vor allem IT-bezogene Zusatzkosten (z.B. Lizenz-, Support-, Schulungskosten) und organisatorische Mehraufwendungen (z.B. Aufwendungen für Bibliotheks- und Modellpflege).

Wie bereits in Kapitel 3.3.3 erläutert, sind es insbesondere die zur Durchführung virtueller Inbetriebnahmen benötigten zusätzlichen Modellierungsaufwendungen, die bis dato einem operativen Einsatz dieser neuen Absicherungsmethode entgegenwirken. Ein anderes Bild ergibt sich hingegen bei der in dieser Arbeit entwickelten mechatronischen Planungsstrategie. Hier stellt die virtuelle Inbetriebnahme nicht länger eine isolierte Inselapplikation am Ende der Planungsprozesskette dar, sondern wird durch die interdisziplinäre Entwicklung eines mechatronischen Zellenmodells von vornherein in den Gesamtprozess integriert. Dadurch lässt sich der zusätzliche Modellierungsaufwand auf ein Minimum reduzieren. Die konkreten zusätzlichen Gesamtaufwendungen hängen jedoch in erster Linie von den Ausprägungen der verwendeten IT-Lösungen ab. Neben den mit diesen neuen IT-Systemen direkt einhergehenden Zusatzkosten sollte bei der Systemauswahl daher sowohl auf das Vorhandensein offener Systemschnittstellen als auch auf die Unterstützungsmöglichkeiten durch Automatismen geachtet werden.

6 IT-Unterstützung des integrierten Planungsansatzes

Die softwaregestützte Umsetzung des im vorigen Kapitel vorgestellten Gesamtkonzepts erfordert eine geeignete IT-Infrastruktur. Im Rahmen dieses Kapitels wird eine solche Infrastruktur aufgezeigt, die das Zusammenwirken der hierzu benötigten Informationssysteme beschreibt. Grundsätzlich müssen nach [Vajn05] dabei zwei Arten von Informationssystemen unterschieden werden: „Datenerzeuger-“ und „Datenverwaltungssysteme“. Ein Überblick über die zur Konzeptumsetzung benötigten IT-Systeme, deren Zusammenwirken sowie über die zwischen den einzelnen Systemen herrschenden Datenflüsse ist in zusammengefasster Form in Abbildung 6-1 gegeben.

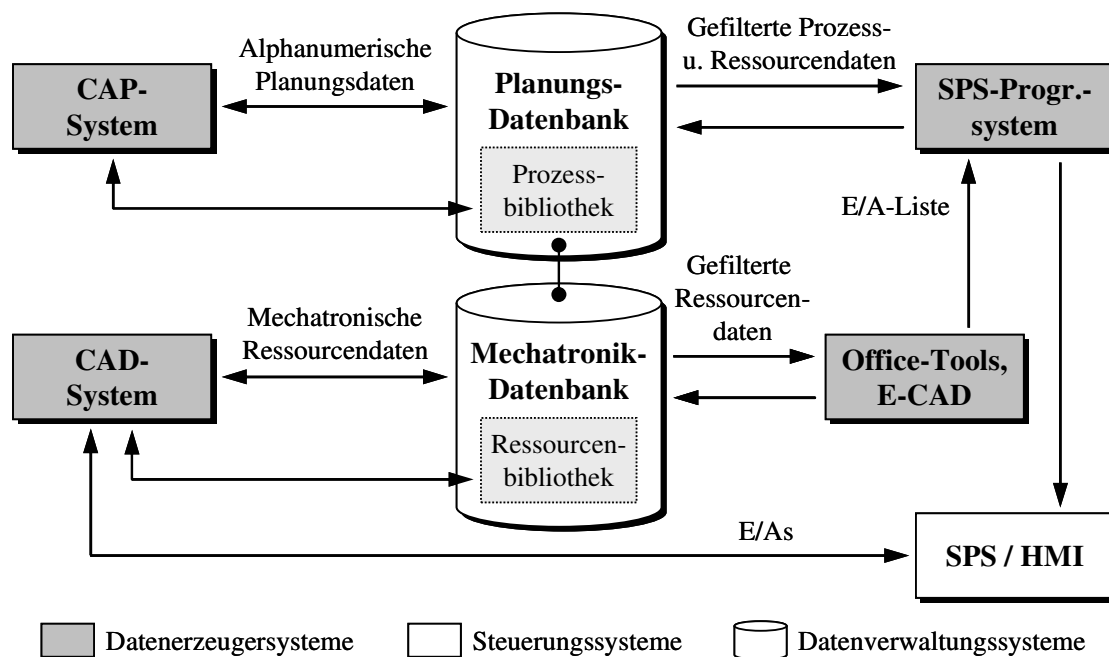


Abbildung 6-1: IT-Unterstützung des integrierten Planungsansatzes

Ausgangsbasis der mechatronikorientierten Zellenplanung bilden standardisierte Prozess- und mechatronische Ressourcenelemente, die mit Hilfe von CAD- bzw. CAP-Systemen generiert und anschließend in entsprechenden Bibliotheken verwaltet werden. Die Erstellung der mechatronischen Ressourcenelemente erfolgt dabei mit Hilfe klassischer M-CAD-Systeme, wobei die elektrischen und steuerungstechnischen Ressourcendaten über spezielle Zusatzmodule in die mechanischen 3D-Modelle eingebracht werden (Kapitel 6.1). Die Generierung der zur Konzeptumsetzung notwendigen Prozesselemente basiert hingegen auf kommerziellen IT-Lösungen, die an die im Kapitel 5.3 gestellten Anforderungen anzupassen sind (Kapitel 6.2).

Durch die integrierte Sicht auf Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten wird die Basis dafür gelegt, dass alle am Planungsprozess beteiligten Fachbereiche fortan auf einer einheitlichen, kollaborativen PPR-Umgebung arbeiten können. Sämtliche Ressourcendaten werden dabei in einer mechatronischen Datenbank (PDM-System) archiviert. Zur Verwaltung der alphanumerischen Planungsdaten dient hingegen eine zentral organisierte Planungsdatenbank, die über entsprechende Systemschnittstellen mit der Mechatronik-Datenbank verbunden ist. Die in diesen beiden verknüpften Datenbanken enthaltenen Prozess- und Ressourcendaten bilden auch die Grundlage zur automatisierten Generierung bereichsübergreifender Arbeitsunterlagen und zellenspezifischer Steuerungsprogramme. Mit Hilfe spezieller Softwarelösungen werden die hierzu benötigten Prozess- und Ressourcendaten gezielt gefiltert und in die jeweiligen Zielapplikationen (Office-Tools, E-CAD-, SPS-Programmiersysteme) transferiert (Kapitel 6.3). Das Überprüfen und Optimieren der entwickelten Steuerungssoftware erfolgt auf Basis des in der Mechatronik-Datenbank archivierten mechatronischen Ressourcenmodells. Dieses wird zum Softwaretest in das jeweilige CAD-System geladen und zum Austausch der Steuerungssignale über vordefinierte Systemschnittstellen (z.B. OPC, COM) mit den in der realen Fabrik eingesetzten Steuerungssystemen verbunden (Kapitel 6.4).

6.1 Nutzung mechatronischer Komponenten in der CAD-basierten Zellenkonstruktion

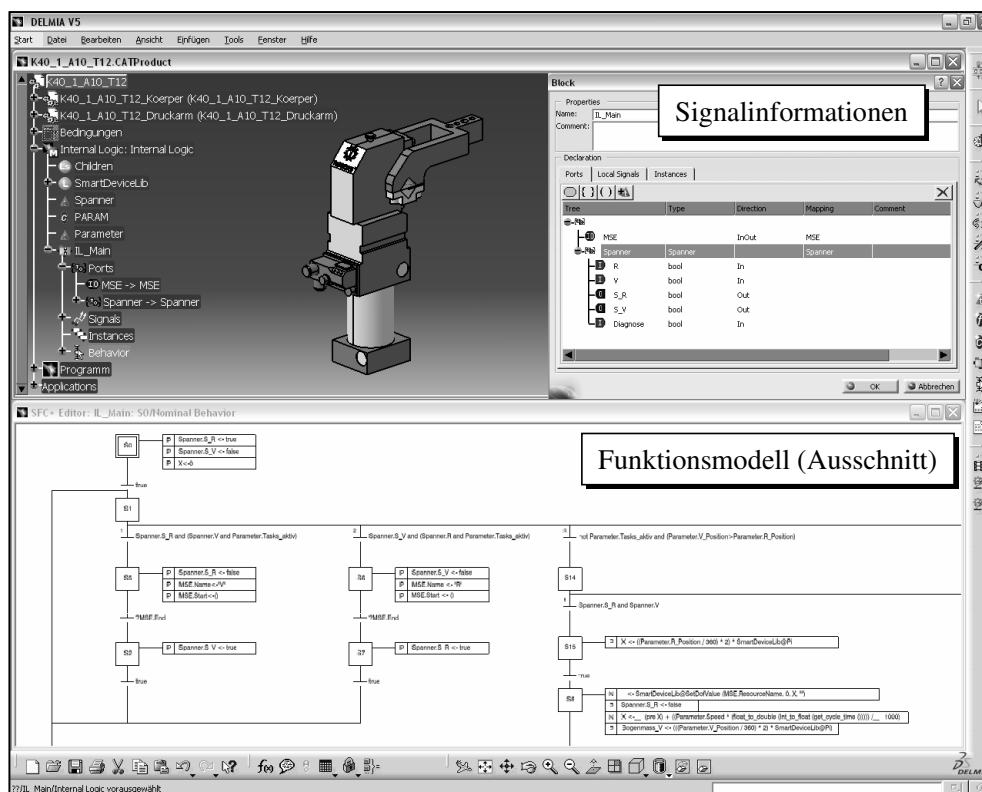
Während die konzeptionelle Erstellung und Verwendung mechatronischer Ressourcenkomponenten in Kapitel 5.2 beschrieben wird, widmet sich dieses Kapitel den softwaretechnischen Umsetzungsmöglichkeiten. Zum einen wird gezeigt, inwiefern diese bereichsübergreifenden Komponenten mit Hilfe heutiger CAD-Systeme erstellt bzw. mit heutigen Archivierungssystemen verwaltet werden können. Den zweiten Betrachtungsgegenstand bildet die softwaregestützte Realisierung des mechatronischen Zellenmodells. Zur prototypischen Umsetzung werden dabei das CAD-System CATIA V5 sowie die von der Firma DELMIA entwickelte CAX-Applikation DELMIA Automation V5 (Release 16) eingesetzt.

6.1.1 Mechatronische Ressourcenmodellierung und -bereitstellung

Grundlage mechatronischer Ressourcenkomponenten stellen die in klassischen 3D-CAD-Systemen entwickelten mechanischen Ressourcendaten (3D-Geometrie, Kinematik) dar. Die weitere Bearbeitung dieser 3D-Daten erfolgt in einem CAD-basierten Zusatzmodul. Hier werden die vorliegenden Mechanikdaten um komponentenspezifische Elektro- und Steuerungsinfor-

mationen erweitert. Zur Veranschaulichung der neuen Planungsmethode werden in dieser Arbeit ausgewählte rohbauspezifische Ressourcenkomponenten – u. a. Spanner, Zylinder, Sensoren und Roboter – „mechatronisiert“, auf deren Basis auch die Umsetzung des in Kapitel 7 erläuterten Anwendungsszenarios erfolgt.

Verdeutlicht wird dieser „Mechatronisierungsprozess“ im Folgenden anhand der Komponentenklasse Spanner. Hierzu wird das in CATIA V5 erstellte 3D-Spannermodell über vordefinierte Systemschnittstellen nach DELMIA Automation V5 geladen, wo es u. a. mit speziellen Ein- und Ausgangssignalen versehen wird. Analog der Funktionsweise eines realen Spanners sind dies die beiden Eingangssignale „R“ (Ruhelage) und „V“ (Verfahrlage) sowie die beiden Ausgangs- bzw. Statussignale „S_R“ und „S_V“, die der SPS das Erreichen der Spannerendlagen signalisieren. Die Festlegung des Zusammenspiels zwischen diesen Signalen und dem jeweiligen Spannerverhalten geschieht im spannerspezifischen Funktionsmodell. Dieses ist so flexibel gestaltet, dass es für alle Spannertypen gleichermaßen Verwendung findet. Ein Überblick über die neu generierten spannerspezifischen Zusatzinformationen ist in Abbildung 6-2, ausführlichere Dokumentationen sind in den Abbildungen A-2 – A-7 (Anhang A) gegeben.



forderlich. Im Rahmen dieser Arbeit werden hierzu drei verschiedene Datenverwaltungssysteme anhand der im Kapitel 5.2.1 gestellten Anforderungskriterien näher untersucht. Hierbei handelt es sich um die von den IT-Systemen CATIA V5, DELMIA Process Engineer (DPE) und CADENAS angebotenen Produkt- bzw. Ressourcenbibliotheken.

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Toolevaluierung sind in Tabelle 6-1 aufgezeigt. Hierbei ist anzumerken, dass die Ergebnisse ausschließlich vor dem Hintergrund Gültigkeit besitzen, wenn zur Zellenentwicklung das CAD-System CATIA V5 genutzt wird. Dies gilt vor allem für die beiden Kriterien „Schnittstelle zu CATIA V5“ und „Wirtschaftlichkeit“. Wie in Tabelle 6-1 dargestellt, erfüllt CATIA V5 die wichtigsten Anforderungen zur Verwaltung mechatronischer Komponenten und wird daher zur Konzeptumsetzung in dieser Arbeit eingesetzt.

Anforderungen	CATIA V5	DPE	CADENAS
Archivierungsmöglichkeit	●	●	●
Schnittstelle zu CATIA V5	●	○	◐
Benutzerfreundlichkeit	●	◐	●
Visualisierung (Voransichten)	◐	◐	●
Bibliotheksaufbau / Übersichtlichkeit	●	◐	◐
Erweiterungsmöglichkeiten	●	●	●
Anhängen weiterer Dokumente (z.B. *.doc)	◐	●	○
Suchfunktionalitäten	◐	◐	●
Wirtschaftlichkeit	●	○	◐

● Anforderung voll erfüllt ◐ Anforderung teilweise erfüllt ○ Anforderung nicht erfüllt

Tabelle 6-1: Vergleich von IT-Systemen zur Verwaltung mechatronischer Komponenten

6.1.2 IT-gestützte Entwicklung des mechatronischen Ressourcenmodells

Auf Basis der vor dem Projektbeginn erstellten Ressourcenbibliothek erfolgt die IT-gestützte Entwicklung des mechatronischen Ressourcenmodells. Die projektspezifische Instanziierung dieser standardisierten, wieder verwendbaren Bibliothekselemente wird im Folgenden anhand der Komponentenklasse Spanner verdeutlicht.

Analog zum heutigen Konstruktionsprozess entnimmt der Konstrukteur den mechatronischen Spanner aus der Bibliothek und „verbaut“ diesen mit weiteren Anbauteilen – gemäß der in Abbildung 5-6 skizzierten Datenstruktur – zu einer mechatronischen Funktionsgruppe. Mit Hilfe kinematikbasierter Simulationsuntersuchungen wird diese Funktionsgruppe zunächst so lange optimiert, bis ein kollisionsfreies Zusammenspiel zwischen den einzelnen Produkt- und

Ressourcenkomponenten gegeben ist. Auf Basis der hierbei gewonnenen Erkenntnisse erfolgt die Festlegung der spannerbezogenen „R“- und „V“-Stellungen und des maximalen Spanneröffnungswinkels. Nach Beendigung des vorrichtungsbezogenen Konstruktionsprozesses trägt der Konstrukteur die ressourcenspezifischen Signalbezeichnungen in die jeweils vorkonfigurierten Eigenschaftsdialoge, wie in Abbildung 6-3 dargestellt, ein.

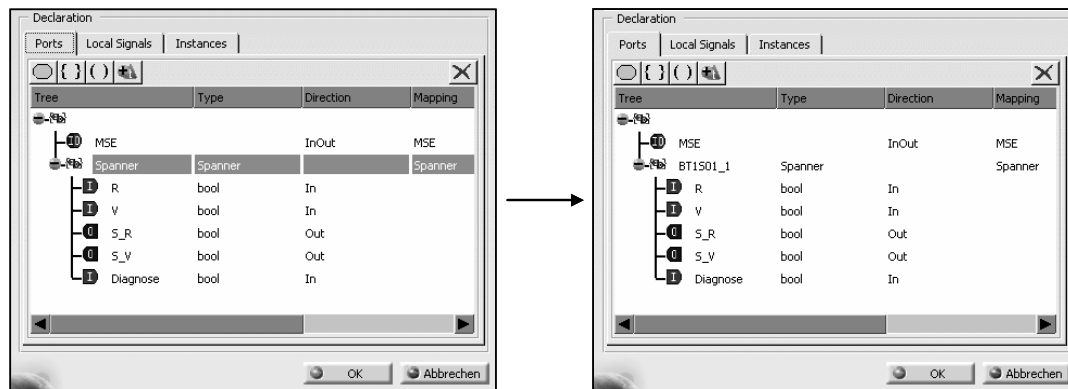


Abbildung 6-3: Anpassen der spannerspezifischen Signalbezeichnungen

Zum einen bilden diese Signalinformationen die Grundlage zur Generierung der projektspezifischen Signalliste. Zum anderen werden ausgehend von diesen Signalbezeichnungen die Spanner-Ventil-Verschaltungen automatisiert abgeleitet. Hierzu dient ein Makro, das auf Basis standardisierter Namenskonventionen die Zusammenhänge zwischen Spannern und Ventilen analysiert und als XML-Code in das Tool DELMIA Automation V5 importiert (Abbildung 6-4). Diese Spanner-Ventil-Verschaltungen bilden sowohl die Grundlage zur realitätsgetreuen Durchführung virtueller Inbetriebnahmen und stellen darüber hinaus die Basis zur automatisierten Erstellung von Pneumatikplänen dar.

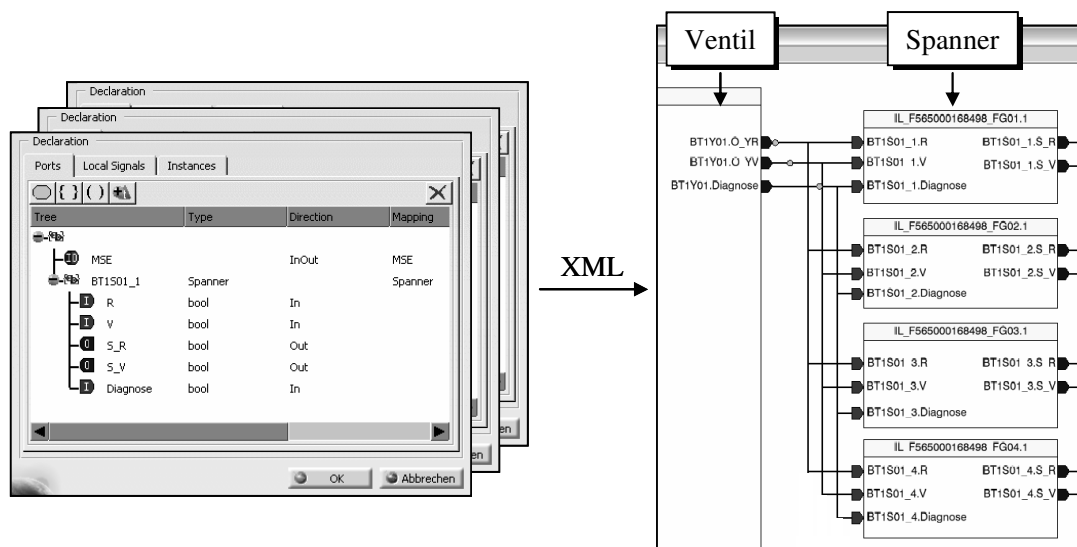


Abbildung 6-4: Automatisierte Generierung der Spanner-Ventil-Verschaltungen

In Analogie zur Entwicklung der mechatronischen Spannvorrichtung werden auch die übrigen Hauptgruppen einer automatisierten Rohbau-Fertigungszelle (z.B. Roboter, Zellenlayout, Fördermittel) unter Verwendung mechatronischer Bibliothekskomponenten erstellt. Dabei erfolgt zunächst immer die simulative Absicherung der mechanischen Leistungsmerkmale, bevor die elektro- bzw. steuerungsspezifischen Parameter (z.B. projektspezifische Signalanpassungen) vergeben werden. Hierzu bieten die verwendeten IT-Systeme CATIA V5 und DELMIA Automation V5 benutzerdefinierte Eigenschaftsdialoge an, mit deren Hilfe diese neuen Ressourceninformationen in das Ressourcenmodell integriert werden können. Zudem verfügen diese beiden datenerzeugenden IT-Systeme über offene Systemschnittstellen (CSV, XML), über die sich mit Hilfe spezieller Makros gefilterte Ressourceninformationen aus dem Datenmodell exportieren und in die jeweiligen Zielsysteme transferieren lassen. Eine Auswahl prototypischer Umsetzungen dieser Datentransfers ist in Kapitel 6.3 näher beschrieben.

6.2 Prozessmodellierung mit digitalen Planungstools

In diesem Abschnitt wird dargelegt, inwiefern sich der in Kapitel 5.3 vorgestellte Ansatz zur zellenspezifischen Prozessplanung mit Hilfe kommerziell verfügbarer CAP-Systeme realisieren lässt. Dies betrifft sowohl die IT-gestützte Umsetzung der zur SPS-Programmgenerierung zusätzlich benötigten Prozesselemente als auch deren Verwendung im Rahmen der zellenspezifischen Prozessmodellierung. Bei den hierzu eingesetzten digitalen Planungstools handelt es sich um die von der Firma DELMIA entwickelten CAP-Systeme DELMIA Process Engineer (DPE) und DELMIA V5 (Release 16).

Grundlage aller DPE-basierten Planungen stellt der so genannte Plantypensatz dar. Dieser beschreibt sowohl die dem Planungsprojekt zugrunde liegende Datenstruktur als auch die dort zu verwendenden Produkt-, Prozess- und Ressourcenelemente mit ihren individuellen Eigenschaften. Mit Hilfe eines Konfigurationswerkzeugs ist es möglich, die standardmäßig vorhandene Datenstruktur um neue Prozesselemente zu erweitern bzw. vorhandenen Elementen neue Eigenschaften zuzuweisen (Abbildung 6-5). Diese prozessbezogenen Neuerungen werden in den jeweiligen Plantypensatz übernommen und stehen den an der Prozessplanung beteiligten Fachbereichen anschließend zur Verfügung. Die im Anhang B vorzufindenden Abbildungen B-1 – B-5 geben zum einen eine Übersicht über die zur Konzeptumsetzung neu erstellten Prozesselemente im digitalen Planungstool DPE. Zum anderen zeigen sie die neu konfigurierten steuerungsspezifischen Eigenschaftsdialoge für die vier Prozessklassen Aktivitäten, Transitionen und Alternativ-/Parallelverknüpfungen, deren individuelle Ausprägungen in Kapitel 5.3.2

beschrieben werden. Eine Sonderrolle nimmt dabei der Prozesstyp „Sprung“ ein, der aufgrund seiner Funktion zwar den Verknüpfungselementen zuzuordnen ist, im Gegensatz zu diesen allerdings über spezielle Steuerungseigenschaften verfügt.

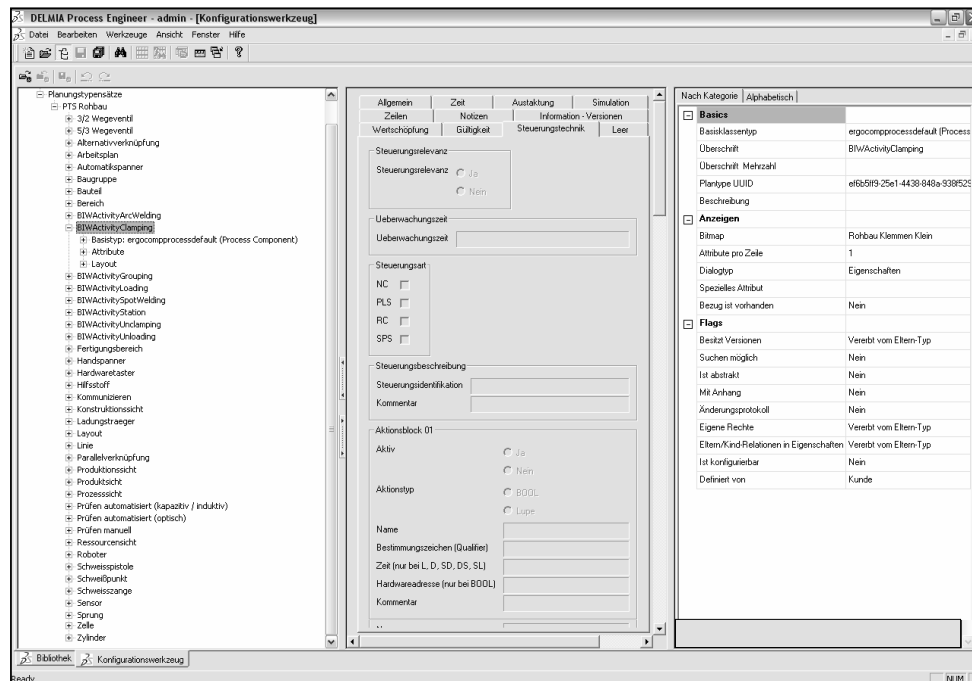


Abbildung 6-5: Konfigurationsumgebung im DELMIA Process Engineer

Archiviert werden die neu konfigurierten Prozesselemente in der DPE-spezifischen Planungsdatenbank, dem so genannten PPR-Hub. Auf diese Weise stehen sie allen prozessbeteiligten Fachbereichen transparent zur Verfügung und können aufgrund der zentralen Datenbankorganisation unternehmensweit und beliebig oft wieder verwendet werden. Eine Auswahl der im Rahmen dieser Arbeit prototypisch erstellten und im PPR-Hub archivierten Prozesselemente ist in Abbildung 6-6 gegeben.

Wie in Kapitel 5.3.3 erläutert, erfolgt die Entwicklung des zellenspezifischen Prozessmodells nach dem klassischen Top-Down-Vorgehen. Hierzu werden die zur Prozessbeschreibung notwendigen Prozesselemente der Prozessbibliothek entnommen und mit Hilfe der CAP-Systeme DPE bzw. DELMIA V5 zu einem interdisziplinären Prozessmodell zusammengesetzt. Im Anschluss daran erfolgt, wie in Abbildung 6-6 dargestellt, die Vergabe der prozessspezifischen Eigenschaften. Dieses um steuerungsspezifische Prozesse und Eigenschaften erweiterte digitale Prozessmodell dient nicht nur zur eindeutigen und standardisierten Prozessbeschreibung sowie als interdisziplinäre Kommunikationsplattform. Aufgrund seiner steuerungstechnischen Erweiterungen stellt es vor allem die informationstechnische Grundlage zur Ableitung zellenspezifischer SPS-Programme dar. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die Prozessmodellie-

rung sowie das Hinterlegen der steuerungsrelevanten Eigenschaften nach den in [IEC61131-3] beschriebenen Regeln erfolgt.

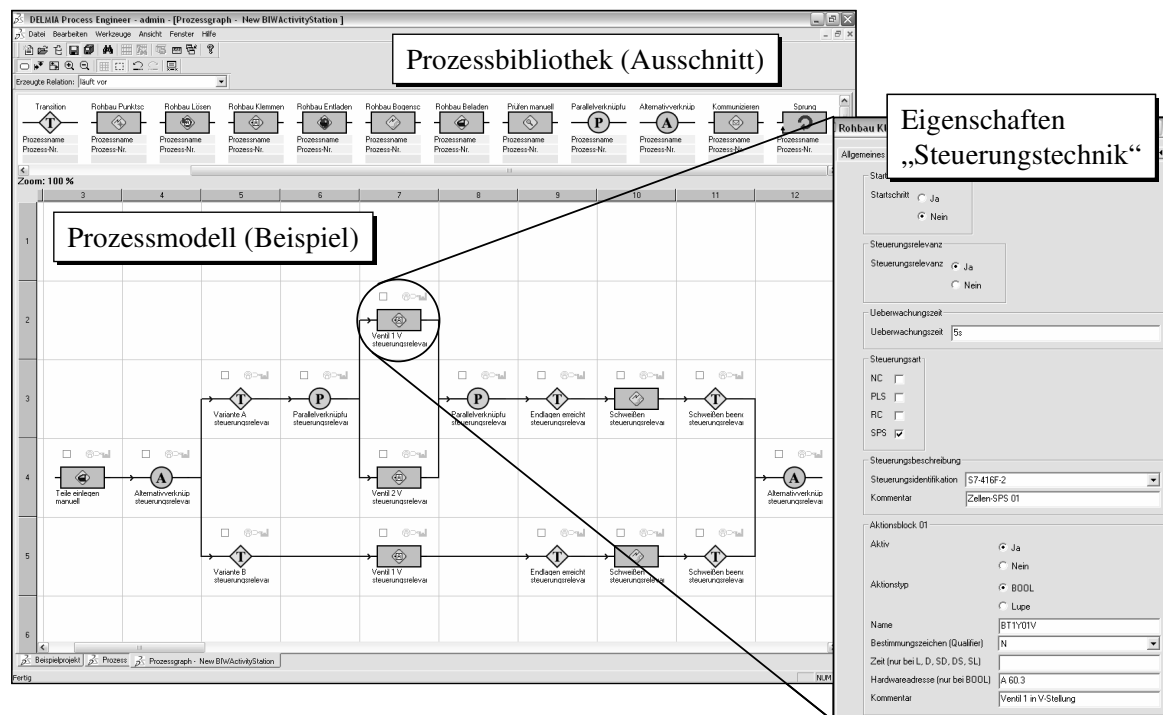


Abbildung 6-6: Prozessbibliothek, Prozessmodell und Prozesseigenschaften im DPE

Zur Erstellung bzw. zur systematischen Optimierung des digitalen Prozessmodells bietet die CAP-Applikation DPE eine Reihe unterschiedlicher Funktionalitäten an. Diese beziehen sich beispielsweise auf die Vergabe rollenspezifischer Zugriffs- und Änderungsrechte, auf die Verwaltungsmöglichkeit unterschiedlicher Arbeitsstände sowie auf die Nutzung verschiedener Filtermechanismen. Dabei kommt im Rahmen der Prozessmodellierung vor allem der letztgenannten Softwarefunktionalität eine besondere Bedeutung zu. Die in den IT-Systemen DPE und DELMIA V5 integrierten Filtermechanismen dienen der modellbezogenen Komplexitätsbeherrschung und können darüber hinaus zur gezielten Analyse und Optimierung des Prozessmodells (z.B. hinsichtlich SPS-Programmierstellung) verwendet werden.

6.3 Das PPR-Modell als zentrale Datendrehscheibe

Wie in Kapitel 5.4 erläutert, findet parallel zur Erstellung des Prozess- und mechatronischen Ressourcenmodells die Verknüpfung der in diesen beiden Modellen enthaltenen Prozess- und Ressourcenelemente mit den zu fertigenden Produkten statt. Das Ergebnis dieses zellenspezifischen Verknüpfungsprozesses bildet das mechatronische PPR-Datenmodell. Im derzeitigen Entwicklungsstadium der Digitalen Fabrik muss beim Management der im Planungsprozess

verwendeten Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten prinzipiell zwischen alphanumerischen Planungs- und Geometriedaten unterschieden werden. Während „klassische“ Planungsdatenbanken – wie z.B. der von der Firma DELMIA entwickelte PPR-Hub – alphanumerische Planungsdaten verwalten, werden die Geometriedaten gegenwärtig aus den jeweils eingesetzten PDM-Systemen exportiert und für die Planung auf entsprechenden File-Servern bereitgestellt. Wenngleich dieser Downloadprozess mit einigem Zeitaufwand verbunden ist, ermöglicht er jedoch ein Arbeiten auf Basis aktueller Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten. Auf diese Weise werden die PPR-Daten über die eingesetzte Planungsdatenbank den jeweiligen CAP-Systemen bereitgestellt, in denen sie anschließend von den verantwortlichen Fachbereichen nach verschiedenen Kriterien optimiert und simulativ abgesichert werden können.

Einerseits verfügen die zur Datenverwaltung eingesetzten PDM-Systeme und Planungsdatenbanken über definierte Systemschnittstellen, über die die zur Zellenplanung benötigten PPR-Daten in die jeweiligen CAP-Systeme transferiert werden können. Andererseits bieten sowohl die datenerzeugenden als auch die datenverwaltenden IT-Werkzeuge in aller Regel „neutrale“ Systemschnittstellen (z.B. CSV, XML) an, über die sich mit Hilfe spezieller Skripte gezielte Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten exportieren lassen. Das Vorhandensein offener Systemschnittstellen ermöglicht sowohl das Generieren bereichsübergreifender Arbeitsunterlagen als auch die modellbasierte Ableitung IEC-konformer Steuerungsprogramme.

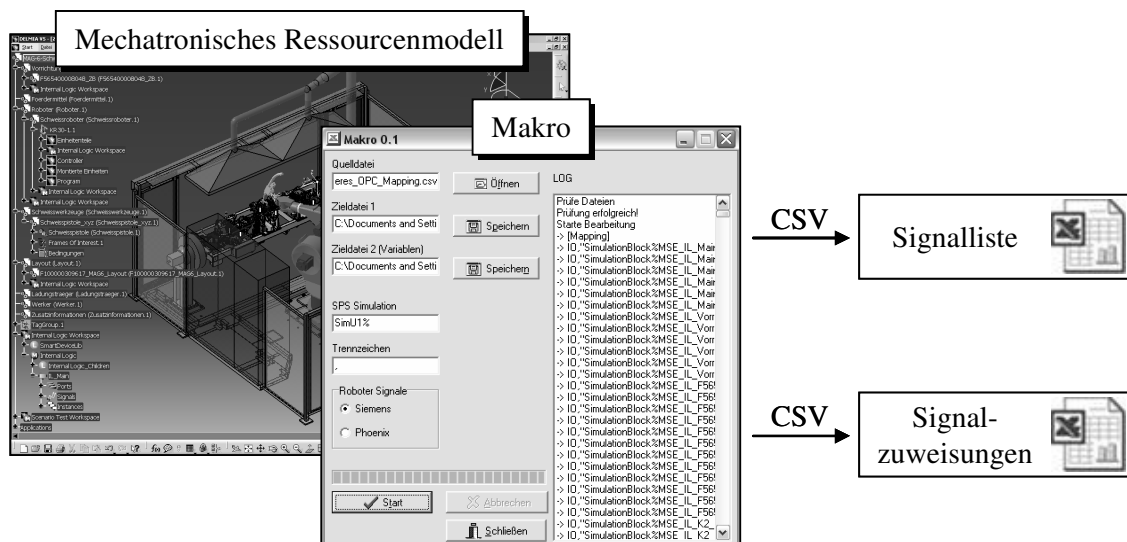


Abbildung 6-7: Automatisierte Erstellung von Signallisten und -zuweisungen

Um diese weit reichenden Nutzenpotentiale zu veranschaulichen, wird im Rahmen dieser Arbeit beispielhaft ein Makro entwickelt, das die im mechatronischen PPR-Modell enthaltenen Signalinformationen systematisch filtert und ausgehend davon eine Signalliste in Microsoft

Excel generiert. Diese enthält neben den einzelnen Signalnamen auch die jeweiligen Signaltypen (z.B. BOOL) und die Signalrichtungen (E/A) und muss im SPS-Programmiersystem lediglich um die signalbezogenen Hardwareadressen vervollständigt werden. Weiterhin dient dieses Makro der automatisierten Zuweisung von Modell- und SPS-bezogenen Steuerungssignalen, die, wie in Kapitel 6.4 beschrieben, die Basis zur Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme bildet (Abbildung 6-7).

Neben der Generierung von Signallisten lassen sich durch den Einsatz eines mechatronischen PPR-Modells weitere standardisierte Arbeitsunterlagen automatisiert erzeugen. Hierzu zählen nicht nur mechanikbezogene Pläne und Listen, sondern vor allem auch die in der Elektrokonstruktion entwickelten Arbeitsdokumente. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die zur Zellenplanung eingesetzten IT-Systeme und die im Unternehmen verwendeten E-CAD-Systeme über kompatible Schnittstellen verfügen.

Der folgende Abschnitt widmet sich der softwaregestützten Umsetzung des im Kapitel 5.4.2 erläuterten Konzepts zur modellbasierten SPS-Programmerstellung. Grundlage hierfür bilden die im digitalen Prozessmodell enthaltenen Steuerungs- sowie die mit den Prozesselementen verknüpften mechatronischen Ressourceninformationen. Abbildung 6-8 illustriert die zur automatisierten SPS-Programmerstellung benötigten Planungsdaten und zeigt zudem die individuellen Korrespondenzen zwischen Planungsdaten und SPS-bezogenen Programminhalten.

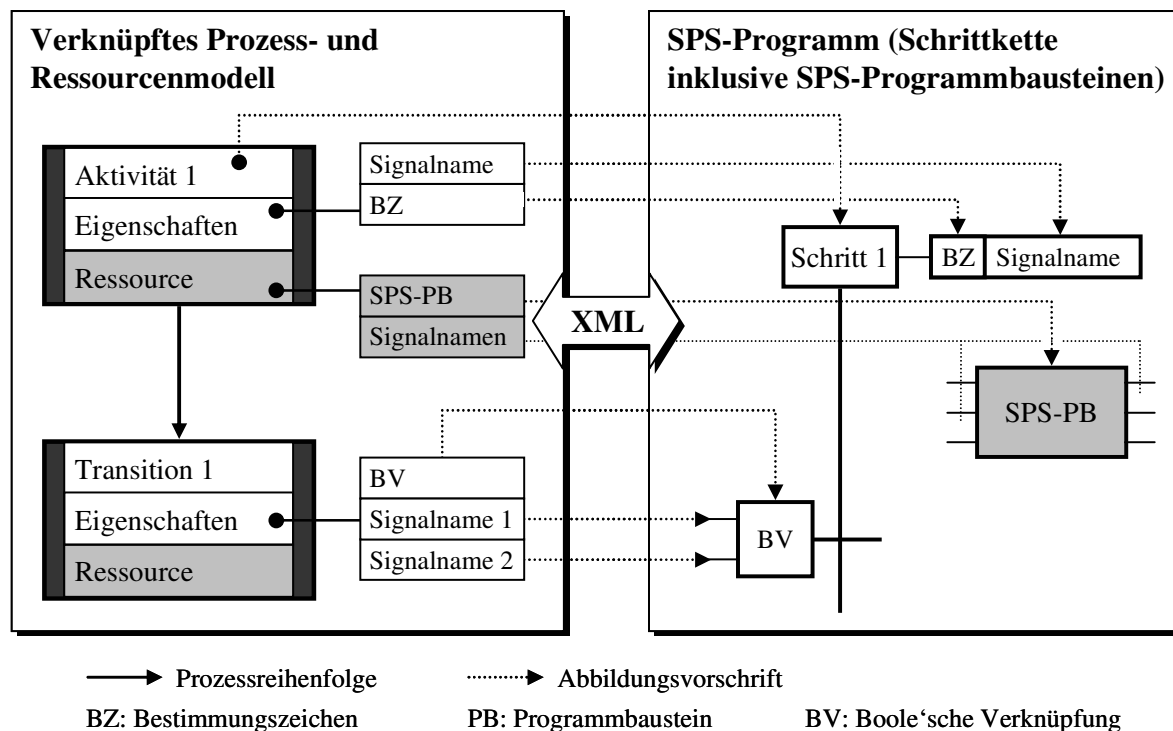


Abbildung 6-8: Planungsdaten zur automatisierten SPS-Programmgenerierung

Aufgrund ihrer zunehmenden Bedeutung in der Informationstechnik bietet sich die von vielen IT-Systemen bereitgestellte XML-Schnittstelle zum Datentransfer zwischen der Planungsdatenbank und den verwendeten SPS-Programmiersystemen an: Einerseits unterstützt die in dieser Arbeit genutzte Planungsdatenbank (PPR-Hub) dieses Datenaustauschformat; andererseits wird dieses Schnittstellenformat durch die SPS-Nutzerorganisation PLCopen gefördert und ist bereits in einigen SPS-Programmiersystemen implementiert. In diesem Zusammenhang wird eine Auswahl heute existierender kommerzieller SPS-Programmiersysteme näher untersucht. Die Ergebnisse dieser schnittstellenbezogenen Systemevaluierungen sind in Tabelle 6-2 dargestellt. Um die Machbarkeit der modellbasierten SPS-Programmgenerierung nachzuweisen, wird in dieser Arbeit neben dem PPR-Hub das von der Firma Schneider Electric entwickelte SPS-Programmiersystem Unity eingesetzt. Hierzu ist ein XML-Skript erforderlich, das die in der Planungsdatenbank enthaltenen steuerungsrelevanten PPR-Informationen in das von Unity unterstützte XML-Format transformiert. Grundlage hierfür bildet die in der Abbildung 6-8 dargestellte Abbildungsvorschrift. Die wesentlichen Schritte und informationstechnische Ausprägungen dieses SPS-bezogenen Datentransformationsprozesses können dabei Abbildung C-1 (Anhang C) entnommen werden.

Programmier-system	Eingesetzt von	Systemschnittstellen für Datenimport und -export
STEP 7	Siemens	• Keine offenen Systemschnittstellen • Projektimport/-export mittels proprietärer Textdatei (nur AWL, ST im Klartext)
Unity	Schneider Electric	• XML-Schnittstelle für IEC 61131-3 • Standardisierung nach PLCopen geplant
OpenPCS	z.B. infoteam	• XML-Schnittstelle nach PLCopen-Standard • RDF-Schnittstelle (siehe [MODA05]) • Projektimport/-export mittels proprietärer Textdatei (nur AWL, ST im Klartext)
Multiprog	z.B. Phoenix Contact	• XML-Schnittstelle geplant • Projektimport/-export mittels proprietärer Textdatei (nur AWL, ST im Klartext)
CoDeSys	z.B. Beckhoff	• XML-Schnittstelle geplant • Projektimport/-export mittels proprietärer Textdatei (nur AWL, ST im Klartext)

Tabelle 6-2: Schnittstellen heute existierender SPS-Programmiersysteme

Die modellbasierte Erstellung von Arbeitsdokumenten und SPS-Programmen stellt jedoch nur eine Richtung der angestrebten Datendurchgängigkeit dar. Allerdings ist es nicht immer sinn-

voll, alle Modifikationen und Änderungen zunächst im PPR-Datenmodell durchzuführen und diese anschließend in die jeweiligen IT-Systeme zu transferieren. Vielmehr ist es anzustreben, einen bidirektionalen „Updateprozess“ zu implementieren, um somit die Konsistenz zwischen den einzelnen Datenmodellen sicherstellen zu können. Auf diese Weise ist es möglich, Änderungen direkt in den Office-, E-CAD- und SPS-Programmiersystemen einzupflegen und diese mit Hilfe entsprechender Skripte in das mechatronische PPR-Datenmodell zu übertragen.

6.4 Softwaregestützte Umsetzung virtueller Inbetriebnahmen

Wie in Abbildung 6-9 dargestellt, sind zur Durchführung virtueller Inbetriebnahmen mehrere Komponenten bzw. mehrere Informationssysteme erforderlich. Dabei handelt es sich zum einen um das mechatronische Ressourcenmodell, das zum Softwaretest der Mechatronik-Datenbank entnommen und in das jeweilige CAD-System importiert wird. Zum anderen müssen die zu validierenden Steuerungsprogramme in die verwendeten Steuerungssysteme (Simulations- oder Hardwarekomponenten) geladen werden, die zur Laufzeit über definierte Schnittstellen mit dem mechatronischen Ressourcenmodell verbunden sind. Gängige Schnittstellen sind in diesem Zusammenhang beispielsweise die von der Firma Microsoft geprägte und an die Automatisierungstechnik angepasste OPC- sowie die von einigen Systemanbietern bereitgestellte COM-Schnittstelle [Woll05]. Außerdem bieten die zur Durchführung virtueller Inbetriebnahmen eingesetzten IT-Werkzeuge die Möglichkeit, reale Bedienfelder, Produktionsleitsysteme etc. über definierte Bussysteme mit dem mechatronischen Ressourcenmodell zu verbinden.

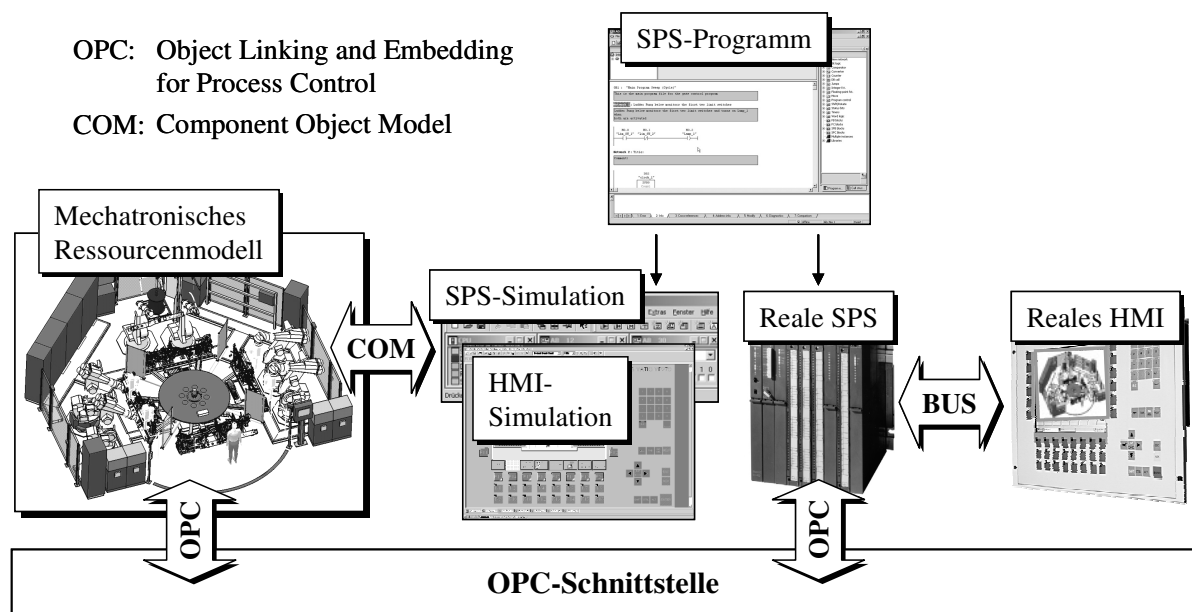


Abbildung 6-9: Systemarchitektur zur Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme

Zur Durchführung virtueller Inbetriebnahmen sind einige Vorarbeiten notwendig, die sich im Wesentlichen auf das Abbilden von modell- und SPS-bezogenen Signalen beziehen. Mit Hilfe des in Abbildung 6-7 dokumentierten Makros lässt sich dieser Abbildungsprozess jedoch automatisiert durchführen. Dabei werden die modellbezogenen Ausgangssignale den korrespondierenden Eingangssignalen der SPS zugewiesen bzw. werden die SPS-bezogenen Eingangssignale auf die entsprechenden modellbezogenen Ausgangssignale „gemappt“. Das Ergebnis solcher automatisiert durchgeführten Signalabbildungen ist anhand des in Kapitel 7 illustrierten Praxisbeispiels in Abbildung 6-10 exemplarisch dargestellt.

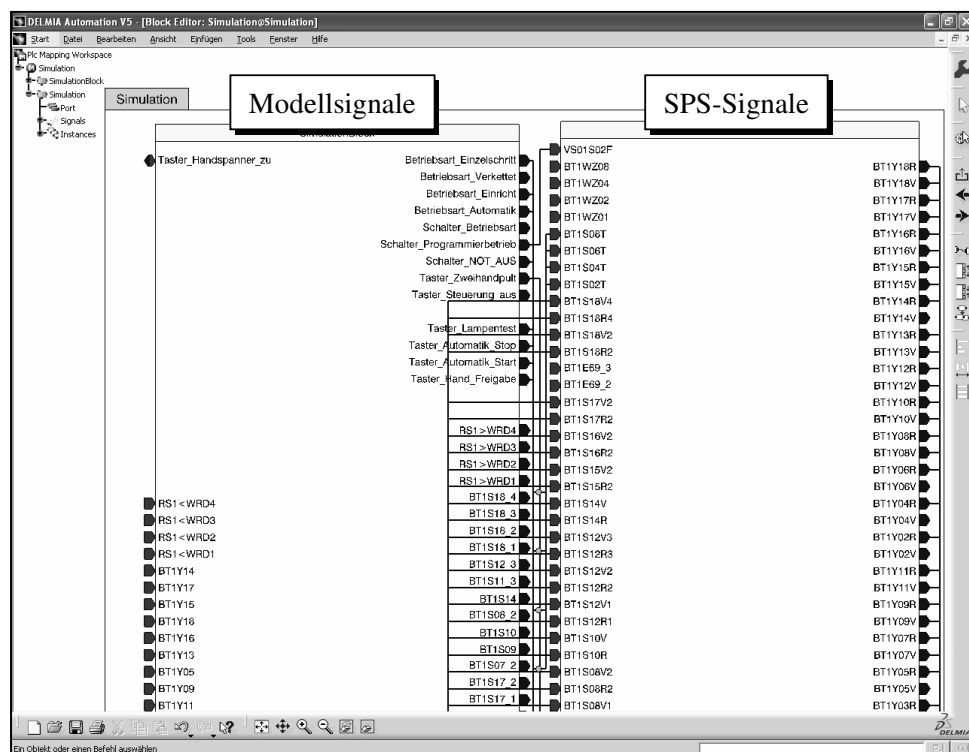


Abbildung 6-10: Automatisierte Signalzuweisungen in DELMIA Automation V5 (Ausschnitt)

Auf diese Weise stellt die virtuelle Inbetriebnahme nicht länger eine zeitaufwendige und fehleranfällige Zusatztätigkeit am Ende der Planungsprozesskette dar. Vielmehr lässt sie sich mit Hilfe der in dieser Arbeit entwickelten Gesamtlösung – sowohl methodisch als auch softwaretechnisch – durchgängig und ohne zusätzliche Aufwendungen in den digitalen Planungsprozess integrieren.

6.5 IT-bedingte Einschränkungen

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich das in Kapitel 5 vorgestellte Gesamtkonzept zur mechatronikorientierten Zellenplanung mit heute verfügbaren IT-Systemen grundsätzlich

realisieren lässt. Jedoch gibt es einige konzeptbedingte Anforderungen, die derzeit nicht bzw. nur unzureichend von den in dieser Arbeit eingesetzten Informationssystemen unterstützt werden. Diese IT-bedingten Einschränkungen lassen sich im Wesentlichen in den folgenden fünf Themenkomplexen zusammenfassen, die als Anforderungsspezifikationen zur Weiterentwicklung der jeweiligen IT-Systeme bei den entsprechenden Systemherstellern einzulasten sind:

- **Durchgängiges Datenmanagement:** Wie in Kapitel 6.3 erläutert, werden derzeit CAD-basierte Geometrie- und CAP-basierte Planungsdaten getrennt in unterschiedlichen Datenverwaltungssystemen archiviert. Zur Beplanung geometrischer Produkt- und Ressourcendaten müssen diese in aufwändigen Downloadprozessen in die Planungsdatenbank geladen werden. Ein durchgängiges, integriertes PPR-Datenmanagement existiert bis heute nicht.
- **Integration von SPS-Programmbausteinen:** IT-bedingt gibt es heute keine Möglichkeit, SPS-Programmbausteine an die mechatronischen Ressourcenkomponenten „anzuhängen“, die anschließend für die automatisierte SPS-Programmgenerierung genutzt werden können. Hierzu existieren jedoch einige spezielle SPS-bezogene IT-Lösungen, die es zukünftig mit den im digitalen Planungsprozess eingesetzten CAX-Systemen zu vereinen gilt.
- **Systemschnittstellen:** Zum einen verfügen die zur Konzeptumsetzung benötigten Informationssysteme – insbesondere die CAP-, E-CAD- und SPS-Programmiersysteme – nur sehr eingeschränkt über offene Programmierschnittstellen, was der Umsetzung einer durchgängigen Planungslösung entgegenwirkt. Zum anderen ändern sich die Schemata der Schnittstellenformate ständig, so dass die entwickelten Skripte fortlaufend anzupassen sind.
- **Zeitverhalten bei virtuellen Inbetriebnahmen:** Da das IT-System DELMIA Automation V5 zur Durchführung virtueller Inbetriebnahmen lediglich die beiden Schnittstellenformate OPC und COM unterstützt bzw. die Berechnung der modellspezifischen Ausgangssignale von der DELMIA-internen Grafiksimation abhängt, ist derzeit keine echtzeitfähige Signalübertragung möglich. Um dies zu gewährleisten, müsste das System einerseits über direkte Busanbindungen und andererseits über ein grafikunabhängiges Simulationsverfahren verfügen.
- **Allgemeine softwarespezifische Defizite:** Neben den im Vorfeld beschriebenen Problempunkten sind es weiterhin allgemeine systemspezifische Defizite (z.B. fehlende Softwarefunktionalitäten, mangelnde Systemstabilitäten und -performance), die derzeit einem Produktiveinsatz der neuen Planungsmethode (noch) im Wege stehen. Diese Problempunkte beeinträchtigen insbesondere den Aufbau eines mechatronischen Ressourcenmodells.

7 Anwendungsszenario

Die praktische Anwendbarkeit der neu entwickelten Planungsmethode und der zur Umsetzung benötigten IT-Infrastruktur stellt den Hauptgegenstand dieses Kapitels dar. Als Anwendungsszenario wird hierzu eine typische automatisierte Fertigungszelle aus dem Karosserierohrbau herangezogen, die sich seit etwa 2 Jahren im DaimlerChrysler Nutzfahrzeugwerk in Würth im operativen Einsatz befindet. Die hier betrachtete Rohbau-Fertigungszelle bietet sich in vielerlei Hinsicht besonders an: Zum einen repräsentiert sie den derzeit aktuellen Stand der Technik (bezüglich Betriebsmitteln, Fertigungsprozessen und Steuerungstechnik). Zum anderen wurde diese Fertigungszelle bereits „konventionell“ geplant und in Betrieb genommen, so dass sich auf Basis der hierbei gewonnenen Erkenntnissen Aussagen zur Wirtschaftlichkeit der neuen mechatronikorientierten Planungslösung ableiten lassen.

7.1 Betrachtungsgegenstand: MAG-Schweißzelle 6

Bei der betrachteten Fertigungszelle handelt sich um die „MAG-Schweißzelle 6“, die im Jahr 2004 in Betrieb genommen wurde und seitdem zur Fertigung verschiedener Cockpitträger des LKW-Typs „Atego“ Verwendung findet. Insgesamt werden in dieser Zelle zwei unterschiedliche Produktvarianten hergestellt, deren Differenzierung mit Hilfe induktiv messender Sensoren, die in der Vorrichtung integriert sind, erfolgt. Aus produktionsbezogener Sicht stellt die MAG-Schweißzelle 6, deren Ausprägungen und Inhalte Abbildung 7-1 zu entnehmen sind, eine klassische Fertigungsinsel aus dem Bereich der „Rohbau-Vorfertigung“ dar.

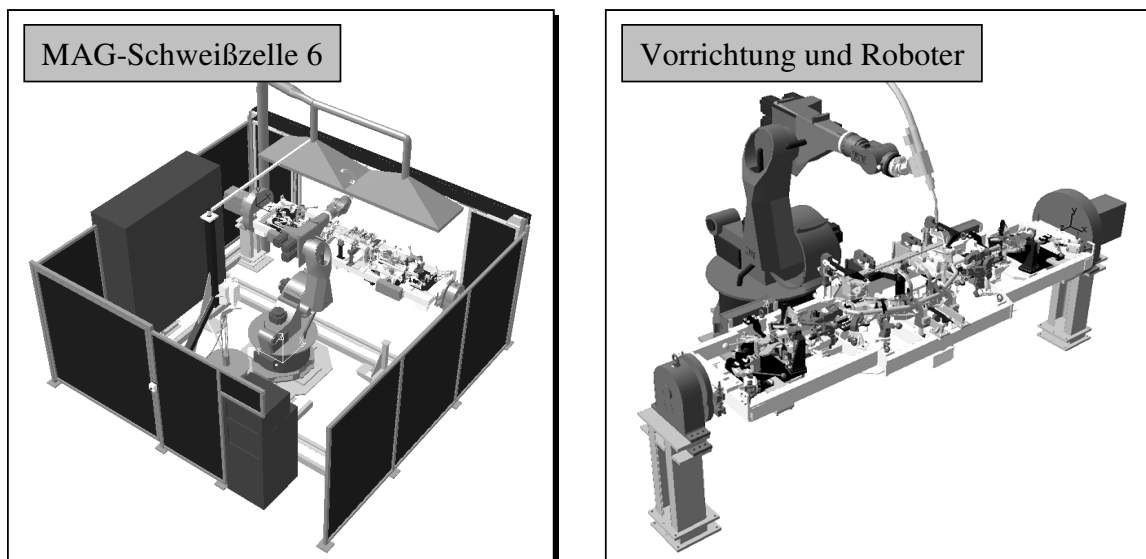


Abbildung 7-1: Anwendungsszenario: MAG-Schweißzelle 6

Wie in Abbildung 7-1 dargestellt, besteht die MAG-Schweißzelle 6 aus einer Vielzahl unterschiedlicher Ressourcenkomponenten. Diese lassen sich gemäß der in Kapitel 5.2.2 beschriebenen ressourcenbezogenen Datenstruktur in folgenden „Hauptgruppen“ zusammenfassen:

- **Vorrichtung:** Hierbei handelt es sich um eine drehbar gelagerte Spannvorrichtung, auf deren Trägerrahmen sich insgesamt 23 pneumatisch betriebene Spannstellen, 3 Ventilinseln und 8 Sensoren zur Teileerkennung befinden. Von den 23 Spannstellen sind 7 als manuell zu betätigende Spanngruppen konzipiert, die restlichen werden über unterschiedliche Ventiltypen von der Zellen-SPS automatisiert angesteuert.
- **Roboter:** Die Fertigung der beiden Produktvarianten erfolgt mit Hilfe eines 6-Achs-Roboters der Firma KUKA, der mit etwa 20 Schweißnähten die einzelnen Produktkomponenten zusammenfügt. Außerdem ist dem Roboter eine 7. Achse zugeordnet, über die der Roboter als modulare Antriebseinheit die Rotationsbewegung der Vorrichtung steuert.
- **Layout:** Das Zellenlayout fasst im Wesentlichen die die Zelle abgrenzenden Schutzzäune, die produktbezogenen Ladungsträger als auch die die Zellen-, Roboter- und Schweißsteuerung beinhaltenden Schaltschränke zusammen. Während die meisten Layoutkomponenten lediglich statische, mechanische Eigenschaften besitzen, verfügen die Schutztüren darüber hinaus über Aktoren und Sensoren und werden von der SPS angesteuert bzw. überwacht.

Zur Ansteuerung und Überwachung der in der Zelle bzw. in den Zellenkomponenten enthaltenen Aktoren und Sensoren dienen grundsätzlich mehrere Steuerungseinheiten. Als übergeordnete Zellensteuerungen fungieren eine S7-400 der Firma Siemens (für den Prozessablauf) und eine Siemens-Sicherheitssteuerung vom Typ S5-95F. Neben diesen beiden Zellensteuerungen verfügt die MAG-Schweißzelle 6 über zwei weitere Steuerungseinheiten: eine Kuka-Robotersteuerung zur Koordination und Überwachung des Schweißroboters sowie eine Schweißsteuerung der Firma Nimak vom Typ Cosy – LS1.2. Zur Visualisierung und Anlagenbedienung wird ein Siemens-Anlagenbedienfeld vom Typ Simatic MP270 verwendet.

Grundsätzlich haben die auf der Zellenebene eingesetzten Steuerungskomponenten aufgrund ihrer Brückenfunktion eine Reihe unterschiedlicher Aufgaben zu erfüllen. Auf der einen Seite dienen sie zur Ansteuerung bzw. Überwachung der Aktoren und Sensoren in der Feldebene, wobei in diesem Zusammenhang eine zentrale Herausforderung im ordnungsgemäßen Zusammenwirken der unterschiedlichen Steuerungsprogramme – vor allem zwischen der Zellen-SPS und der Robotersteuerung – liegt (horizontale Integration). Auf der anderen Seite muss ebenso die Kommunikation zwischen der Zellensteuerung und den in den übergeordneten Fabrik-

ebenen eingesetzten Produktionsleitsystemen sichergestellt sein (vertikale Integration). Diese dienen beispielsweise zur Produktions- bzw. Anlagenüberwachung, zur Darstellung und Auswertung wichtiger Betriebskenngrößen (z.B. gefertigte Stückzahlen) sowie zur Diagnose bzw. Fehleranalyse bei Produktionsausfällen. Bezogen auf das hier betrachtete Praxisbeispiel sind die steuerungstechnische Integration der MAG-Schweißzelle 6 sowie die zwischen den Steuerungsebenen verwendeten Kommunikationssysteme Abbildung 7-2 zu entnehmen.

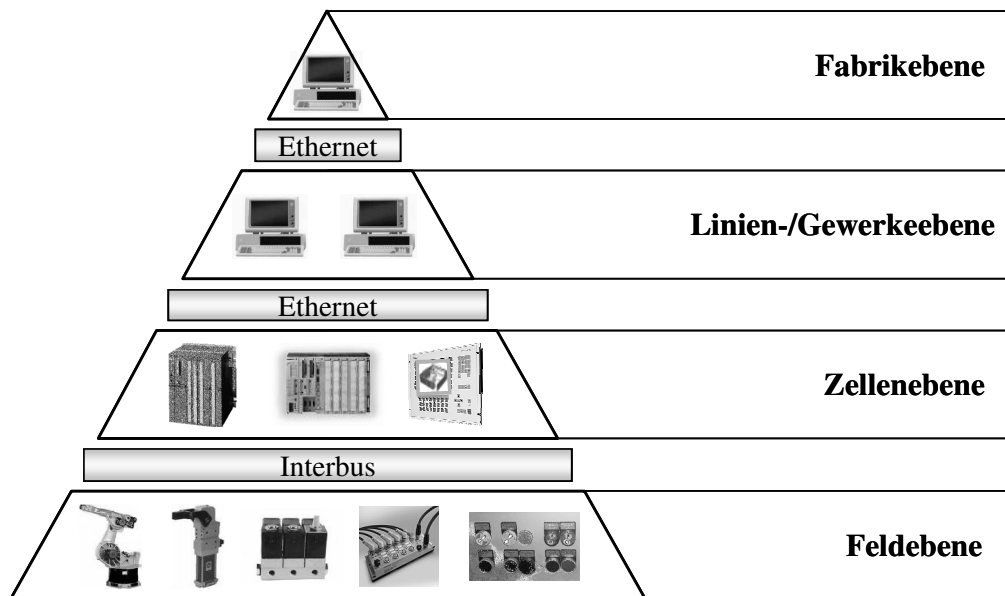


Abbildung 7-2: Steuerungstechnische Integration der MAG-Schweißzelle 6

7.2 Zellenspezifisches PPR-Datenmodell

Ausgehend von den in Kapitel 6 beschriebenen Implementierungsansätzen wird im Folgenden anhand des Anwendungsszenarios untersucht, inwieweit die mechatronikorientierte Planungsstrategie zur Effizienzsteigerung in der Produktionsplanung bzw. im Produktionsanlauf beitragen kann. In diesem Zusammenhang werden sowohl die Erstellung und Verwendung des mechatronischen Ressourcen- und des digitalen Prozessmodells als auch die Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme analysiert und bewertet.

7.2.1 Entwicklung des Ressourcenmodells unter Verwendung mechatronischer Komponenten

Grundlage zur Entwicklung des zellenspezifischen 3D-Ressourcenmodells bilden die in Kapitel 6.1.1 beschriebene bzw. die in Abbildung A-1 dargestellte mechatronische Ressourcenbibliothek. Als standardisierte Ressourcenkomponenten werden im Rahmen dieses Anwendungsbeispiels neben mechatronischen Spannern, Zylindern, Sensoren, Ventilen, Schutztüren und

einem Roboter auch ein standardisiertes Hardware-Panel verwendet. Dieses entspricht in seinen Ausprägungen und Funktionalitäten dem realen zur Anlagensteuerung eingesetzten Panel und stellt einen Teil des gesamten Anlagenbedienfelds dar. Aufgrund ihres allgemeingültigen und flexiblen Aufbaus können die in der Ressourcenbibliothek enthaltenen Mechatronikkomponenten jedoch nicht nur für diesen Zellentyp, sondern für die Entwicklung sämtlicher Fertigungszellen im Karosserierohbau verwendet werden.

Im Rahmen des Zellenentwicklungs- und -dokumentationsprozesses hat sich die Verwendung der vorkonfigurierten mechatronischen Ressourcenkomponenten als äußerst potentialreich erwiesen. Aufgrund des „Frontloading“-Prozesses müssen bei der Modellerstellung zwar einige zusätzliche Arbeitsschritte durchgeführt werden (Anpassung der elektrischen Bezeichnungen, höherer Detaillierungsgrad); verglichen mit den zu erwirtschaftenden Nutzenpotentialen sind diese jedoch als vernachlässigbar zu bewerten. Nach der Fertigstellung des mechatronischen Ressourcenmodells bildet dieses nicht nur eine transparente und bereichsübergreifende Kommunikationsplattform. Aufgrund ihres umfassenden Charakters stellt es darüber hinaus die informationstechnische Grundlage zur Ableitung bereichsübergreifender Arbeitsunterlagen dar. So unterstützen die in dieser Arbeit entwickelten Makros derzeit die automatisierte Erzeugung der Spanner-Ventil-Verschaltungen (Pneumatikplan) und der SPS-bezogenen Signalliste. Außerdem lassen sich auf Basis der elektrischen Bezeichnungen die Zuweisungen zwischen den Modell- und SPS-Signalen, wie in Abbildung 6-10 dargestellt, automatisiert ableiten, so dass die Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme mit keinem Mehraufwand verbunden ist (Kapitel 7.2.3). Abbildung 7-3 zeigt sowohl das Ergebnis des in CATIA V5 erstellten mechatronischen Abbilds der MAG-Schweißzelle 6 als auch die automatisiert erzeugten Spanner-Ventil-Zuweisungen, deren detaillierte Ausprägungen den Abbildungen A-8 – A-14 (Anhang A) zu entnehmen sind.

Aus rein technischen Gesichtspunkten wäre es prinzipiell denkbar, weitere elektro- und steuerungstechnische Komponenten (z.B. Leitungen, E/A-Baugruppen, Klemmen, Stecker) in das mechatronische Ressourcenmodell zu integrieren. Die Nutzung dieses „erweiterten“ Ressourcenmodells hätte den Vorteil, dass alle zellenbezogenen Planungsaktivitäten (inklusive der gesamten Elektroprojektierung) auf Basis eines standardisierten, durchgängigen Datenmodells durchgeführt werden könnten. Es gäbe fortan einen verbindlichen „Planungsmaster“, auf dessen Grundlage sich sämtliche Arbeitsdokumente (z.B. Schaltschranklayouts, Stromlaufpläne) ableiten ließen bzw. in dem alle Änderungen einheitlich und transparent für alle dokumentiert werden könnten. Demgegenüber würde jedoch ein deutlich steigender Mehraufwand stehen.

Dieser würde sich sowohl auf die digitale Erstellung und Verwaltung der neuen Komponenten als auch auf die Beantwortung neuer administrativer Fragestellungen in Form von Daten- und Änderungsrechten beziehen. Die Rentabilität eines alle Bereiche umfassenden „3D-Planungsmasters“ hängt demnach von vielen Faktoren – nicht zuletzt auch von organisatorischen und informationstechnischen Rahmenbedingungen – ab, die es in weiterführenden Arbeiten zu untersuchen gilt.

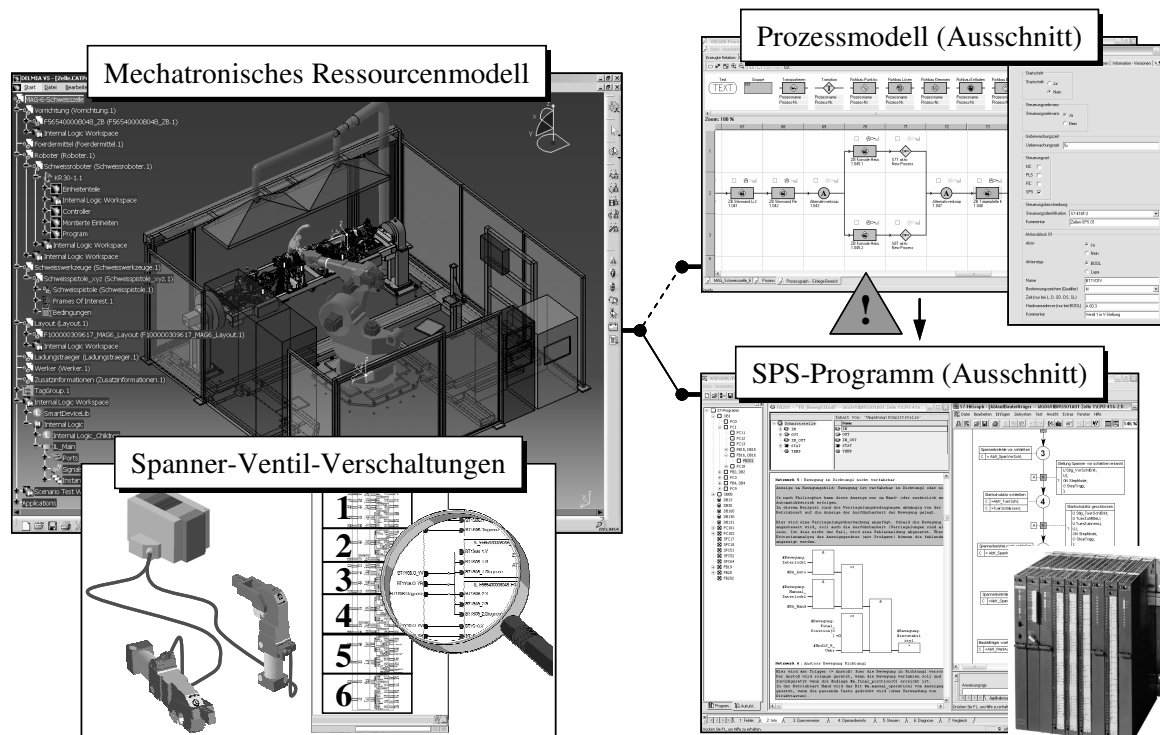


Abbildung 7-3: PPR-Datenmodell als Basis für SPS-Programmgenerierung und virtuelle Inbetriebnahme

7.2.2 Digitales Prozessmodell als Basis zur SPS-Programmgenerierung

Parallel zur Erstellung des mechatronischen Ressourcenmodells findet unter Verwendung der in Kapitel 6.2 beschriebenen neuen Prozesselemente die Entwicklung des zellenspezifischen Prozessmodells statt. Gemäß dem Planungsfortschritt erfolgt diese Prozessmodellierung nach der klassischen Top-Down-Methodik. Demnach wird die gesamte Schweißzelle in einem ersten Schritt in fünf „Bereiche“ untergliedert, die in einer sequentiellen und kontinuierlich wiederkehrenden Reihenfolge durchlaufen werden. Dabei handelt es sich, wie in Abbildung B-6 dargestellt, um den Einlege-, Spann-, Schweiß-, Entspann- und Entnahmebereich. Diese Bereiche werden anschließend von den verantwortlichen Fachbereichen sukzessive ausgestaltet, bevor die prozessspezifische Vergabe der Steuerungseigenschaften erfolgt. Das Ergebnis des den Prozessablauf der MAG-Schweißzelle 6 repräsentierenden digitalen Prozessmodells kann in detaillierter Form den Abbildungen B-7 – B-11 (Anhang B) entnommen werden.

Das digitale Prozessmodell stellt jedoch nicht nur eine einheitliche und von Mehrdeutigkeiten befreite Kommunikations- und Dokumentationsplattform dar. Durch die Verwendung der neu konfigurierten Prozesselemente bildet es vielmehr auch die informationstechnische Grundlage zur automatisierten SPS-Programmgenerierung und ist somit als wichtiger Eingangsdatensatz für die SPS-Projektierung anzusehen.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass das digitale Prozessmodell bezüglich der in Kapitel 5.3.1 gestellten Anforderungen bereits einen sehr hohen Eignungsgrad aufweist, wenngleich es derzeit noch einige softwarebedingte Problempunkte zu verzeichnen gibt. Diese beziehen sich im Wesentlichen auf die fehlenden Möglichkeiten, ressourcenspezifische SPS-Programmbausteine den jeweiligen Ressourcen bzw. Prozessen zuzuweisen, sowie auf das Fehlen offener, standardisierter Schnittstellen bei den meisten SPS-Programmierungswerkzeugen. Aus diesem Grund ist es derzeit beispielsweise nicht möglich, eine strukturierte SPS-Schrittfolge in STEP 7 (Siemens) zu erzeugen (Abbildung 7-3). Stattdessen konnte die technische Machbarkeit dieses potentialreichen Lösungsansatzes unter Verwendung des SPS-Programmierungswerkzeugs Unity der Firma Schneider Electric erfolgreich nachgewiesen werden.

7.2.3 Virtuelle Inbetriebnahme der MAG-Schweißzelle 6

Die Verwendung des mechatronischen Ressourcenmodells trägt nicht nur zur Effizienzsteigerung während des zellenbezogenen Planungsprozesses bei. Aufgrund seines realitätsgetreuen Abbilds der MAG-Schweißzelle 6 bildet dieses Planungsmodell zudem die informationstechnische Grundlage zur Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme.

Aus steuerungstechnischer Sicht wird hierzu das auf der MAG-Schweißzelle 6 laufende originale SPS-Programm (STEP 7) unter Verwendung der Simulationssoftware PLCSIM der Firma Siemens sowie die Siemens-Visualisierungsumgebung ProTool eingesetzt. Insgesamt werden in diesem SPS-Programm 416 Signale (277 Eingangs-, 139 Ausgangssignale) verarbeitet, die den entsprechenden Modellsignalen im Vorfeld der virtuellen Inbetriebnahme zuzuweisen sind. Diese Signalzuweisungen erfolgen mit Hilfe des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Makros, dessen Ausprägungen Abbildung 6-7 zu entnehmen sind. Während der virtuellen Inbetriebnahme verhält sich das Ressourcenmodell – aufgrund der in den mechatronischen Ressourcenkomponenten integrierten Funktionsbeschreibungen – analog der realen Schweißzelle und bildet somit eine wertvolle 3D-Visualisierungsplattform zur frühzeitigen Steuerungsvalidierung. Die Nutzenpotentiale der virtuellen Inbetriebnahme beschränken sich nicht nur auf den Funktionstest von SPS-Programmen im Automatikbetrieb. Anhand des mechatronischen

Ressourcenmodells können zudem sämtliche Betriebsarten der MAG-Schweißzelle getestet, mögliche Störszenarien simuliert, das Zusammenspiel von Roboter- und SPS-Programm validiert sowie die späteren Maschinenbediener geschult und eingewiesen werden.

Durch ihre methodische und informationstechnische Integration in den Gesamtprozess ist die virtuelle Zelleninbetriebnahme sowohl unter technischen als auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten als sehr potentialreich zu bewerten. Zum einen fallen – im Gegensatz zu bestehenden Lösungsansätzen – keine Mehraufwendungen an. Zum anderen lassen sich die vollen Nutzenpotentiale dieser neuartigen 3D-Absicherungsmethode erschließen. Die gegenwärtigen Einschränkungen sind auf rein IT-bedingte Defizite zurückzuführen (z.B. Performance, Funktionalitäten), die es in den kommenden Software-Releases zu beheben gilt.

7.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Fazit

Neben der technischen Anwendbarkeit stellt die Wirtschaftlichkeit einer neuen Methode eine Grundvoraussetzung für einen möglichen Produktiveinsatz dar. Dabei werden neue Lösungen häufig einem dualen Bewertungsansatz unterzogen, dessen Gesamtergebnis sich aus den Teilergebnissen folgender Analyseverfahren zusammensetzt:

- **Anforderungs-Wirkungs-Analyse:** Hierbei handelt es sich um ein rein qualitatives Analyseverfahren, das die Ergebnisse der neuen Lösung (Wirkungen) den im Vorfeld ermittelten Anforderungen gegenüberstellt und hinsichtlich des Erfüllungsgrades bewertet.
- **Quantitative Analyse:** Bei der quantitativen Analyse werden die positiven und negativen Wirkungen der neuen Lösung in Form eines Aufwand-Nutzen-Verhältnisses gegenübergestellt und anhand messbarer, objektiver Kriterien miteinander verglichen und bewertet.

Bezogen auf die Anwendung der neuen Planungsmethode auf das Praxisbeispiel sind die wesentlichen Ergebnisse der Anforderungs-Wirkungs-Analyse in Tabelle 7-1 zusammengefasst. Verglichen mit der konventionellen Planung und Inbetriebnahme der MAG-Schweißzelle 6 weist die neue mechatronikorientierte Planungslösung bezüglich der Erfüllung der in Kapitel 4.5 identifizierten Anforderungen bedeutende Vorteile auf. Die durchgängige Nutzung eines bereichsübergreifenden PPR-Datenmodells trägt sowohl maßgeblich zur Effizienzsteigerung in der Produktionsplanung als auch zur Realisierung beschleunigter Produktionsanläufe mit dem Ergebnis höherer Anlagenreifegrade bei. Darüber hinaus stellt dieses mechatronische Datenmodell eine ideale Plattform zur Dokumentation von Produktionserfahrungen dar, was zu einer kontinuierlichen Qualitätsverbesserung in zukünftigen Planungsprojekten führt.

Anforderungs- Wirkungs-Matrix		Wirkungen						
		Positiv						Negativ
		Mechatronische Ressourcenkomp.	Mechatronisches Ressourcenmodell	Interdisziplinäre Prozesselemente	Interdisziplinäres Prozessmodell	Mechatronisches PPR-Datenmodell	Virtuelle Inbetriebnahme	
Anforderungen	Unterstützung und Förderung des SE		✓		✓	✓	✓	Komplexere IT-Infrastruktur (höherer Pflegeaufwand) Zusätzliche Software-, Lizenz-, Support-, Schulungskosten Zusätzlicher Pflegeaufwand (Modelle, Bibliotheken) Zusatzaufwendungen durch „Frontloading“ in frühen Phasen
	Verbesserung der Zusammenarbeit		✓		✓	✓	✓	
	Effektivitätssteigerung durch Standardisierung	✓	✓	✓	✓	✓		
	Durchgängiges Doku.-/ Änderungsmanagement		✓		✓	✓		
	Unterstützung bei SPS-Programmerstellung	✓			✓	✓	✓	
	Softwaretests vor realer Inbetriebnahme		✓				✓	
	Wissensspeicherung von Produktionserfahrungen		✓		✓	✓		
	Berücksichtigung vorhandener IT-Werkzeuge	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Beschleunigte Planungs- und Anlaufprozesse		✓		✓	✓	✓	
	Höherer Anlagenreife-grad (SW/HW) zum SOP		✓		✓	✓	✓	

Tabelle 7-1: Matrix zur Anforderungs-Wirkungs-Analyse

Den positiven Wirkungen der neuen Methode stehen allerdings auch einige negative Auswirkungen in Form zusätzlicher Aufwendungen gegenüber. Wie in Tabelle 7-1 dargestellt, belaufen sich diese auf höhere administrative Aufwendungen (Pflege/Wartung der IT-Infrastruktur, Modelle und Bibliotheken) sowie auf softwarespezifische Zusatzaufwendungen in Form von Software-, Lizenz- und Schulungskosten. Im Gegensatz zur Anforderungs-Wirkungs-Analyse gestaltet sich die Durchführung einer quantitativen Analyse als deutlich schwieriger. Zum einen müssten hierfür eine Vielzahl an Referenzprojekten mit und ohne Einsatz der neuen Methode durchgeführt werden, um somit verlässliche und belegbare Wirtschaftlichkeitsaussagen ableiten zu können. Zum anderen hängt die Wirtschaftlichkeit der neuen Planungsmethode in entscheidendem Maß von den gegebenen organisatorischen, informationstechnischen und zellenspezifischen Rahmenbedingungen ab und muss daher – in Abhängigkeit von diesen Faktoren – unternehmensbezogen ermittelt und bewertet werden.

8 Prozessuale und organisatorische Auswirkungen

Studien zufolge scheitern bis zu 70 Prozent aller Projekte, die eine Veränderung an bestehenden Systemen, Prozessabläufen und Organisationsstrukturen zur Folge haben [Kott95]. Nur in den seltensten Fällen sind die Gründe hierfür jedoch auf rein methodische bzw. informationstechnische Unzulänglichkeiten zurückzuführen. Vielmehr liegen dem Scheitern von Veränderungsprojekten zumeist folgende Ursachen zugrunde:

- Fehlen einer geeigneten, methodengestützten Einführungsstrategie
- Unzureichende Beachtung prozessualer, organisatorischer und vor allem menschlicher Aspekte bei der Entwicklung neuer Methoden und IT-Systeme

Vor diesem Hintergrund werden in einem ersten Schritt die wichtigsten Ausprägungen des sogenannten Veränderungsmanagements, das ein methodisches Rahmenwerk zur Durchführung von Veränderungsprojekten beschreibt, vorgestellt und kurz erläutert. Der zweite Teil dieses Kapitels widmet sich den konkreten Auswirkungen der in dieser Arbeit neu entwickelten Planungsmethode auf den Prozessablauf, die Fachbereiche und die bereichsbezogenen Qualifikationsprofile. Als Referenzbeispiel dient hierzu der in Kapitel 4 analysierte Unternehmensbereich aus der Nutzfahrzeugindustrie.

8.1 Grundlagen des Veränderungsmanagements

In Anlehnung an die gängigen in der Literatur vorzufindenden Definitionen lassen sich unter dem Begriff Veränderungsmanagement alle Aufgaben und Tätigkeiten zusammenfassen, die eine umfassende, bereichsübergreifende und inhaltlich weit reichende Veränderung – zur Umsetzung neuer Strategien, Strukturen, Systeme, Prozesse oder Verhaltensweisen – in einer Organisation bewirken sollen. Im Folgenden wird auf zwei zentrale Aspekte des Veränderungsmanagements näher eingegangen. Dies ist zum einen die ganzheitliche Betrachtung von technischen und sozialen Teilsystemen. Zum anderen werden die einzelnen Phasen eines Veränderungsprozesses vorgestellt und ihre wichtigsten Ausprägungen erläutert.

8.1.1 Ganzheitliche Betrachtung von technischen und sozialen Teilsystemen

Nach [Damo96, Rose98, Easo01] ist die Einführung neu entwickelter Methoden und IT-Systeme nur dann Erfolg versprechend, wenn die späteren Anwender am Entwicklungs- und Einführungsprozess aktiv beteiligt werden bzw. wenn hierzu das gesamte „soziotechnische“ Sys-

tem betrachtet wird. In diesem Zusammenhang erklärt Eason: „The new technical system has to engage with the complex world of tasks, procedures and culture within the organization; it has to be part of a working socio-technical system“ [Easo01]. Auf diese Weise kann insbesondere die Mitarbeiterakzeptanz, die eine essentielle Voraussetzung für eine erfolgreiche Durchführung von Veränderungsprojekten darstellt, signifikant gesteigert werden [KKSL06b].

Die einzelnen Komponenten und Abhängigkeiten eines soziotechnischen Gesamtsystems werden anhand des in [StU197] publizierten MTO-Konzepts verdeutlicht. Demnach bestehen soziotechnische Systeme sowohl aus technischen (Methoden, IT-Systeme) als auch aus sozialen Teilsystemen (Mitarbeiter, Organisationsstrukturen), deren gemeinsamer Nenner die jeweilige Arbeitsaufgabe darstellt. Wie in Abbildung 8-1 illustriert, verknüpft die Arbeitsaufgabe dabei die technischen und sozialen Teilsysteme und verbindet zudem den Menschen mit den unternehmensspezifischen Organisationsstrukturen. Demnach dürfen Veränderungen nicht nur isoliert an einer Komponente des soziotechnischen Gesamtsystems vollzogen werden. Vielmehr muss die ganzheitliche Optimierung von Methoden, IT-Systemen, Prozessabläufen und Organisationsstrukturen im Vordergrund von Veränderungsprojekten stehen.

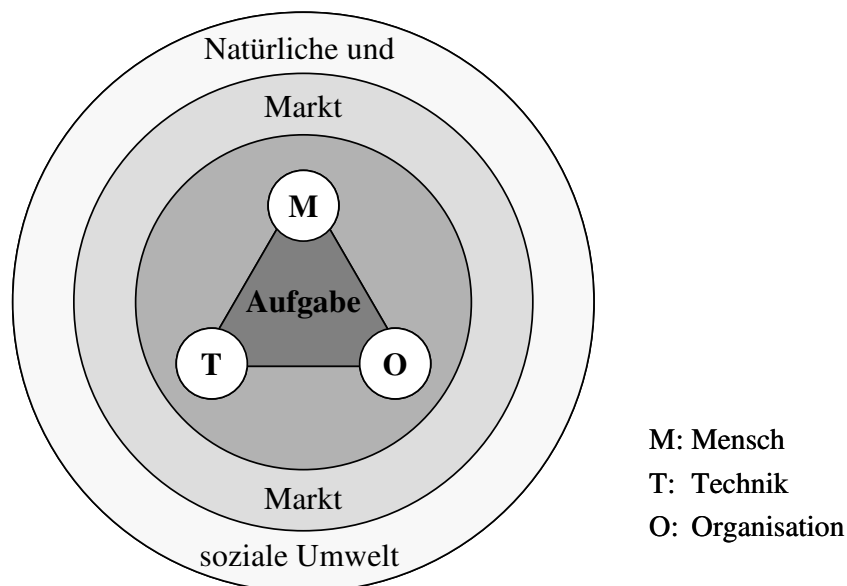


Abbildung 8-1: Ganzheitliches MTO-Konzept nach [StU197]

8.1.2 Phasen eines Veränderungsprozesses

Es liegt in der Natur der Sache, dass Menschen Veränderungen im Regelfall skeptisch gegenüberstehen. Vor diesem Hintergrund hat es sich als Erfolg versprechend erwiesen, die betroffenen Mitarbeiter nicht erst bei der Einführung neuer Methoden und IT-Systeme zu involvieren, sondern diese bereits in der Entwicklungsphase einzubeziehen. Somit lassen sich etwaige

menschliche Widerstände bei der Durchführung von Veränderungsprojekten minimieren bzw. kann durch solche Präventivmaßnahmen die Mitarbeiterakzeptanz deutlich gesteigert werden. Nach der klassischen Lehre des Veränderungsmanagements sind bei einem Veränderungsprozess daher – in Anlehnung an [DoLa05, KiBB06] – drei Phasen zu unterscheiden:

Phase 1: Analyse der Ausgangssituation

Bildlich gesprochen steht diese erste Phase für das Auftauen des bestehenden (eingefrorenen) Gleichgewichtes innerhalb der betrachteten Organisation. Wesentliche Ziele liegen hierbei in der systematischen Analyse der Ausgangssituation, im Herausarbeiten von Defiziten sowie im Wecken eines Problem- bzw. Veränderungsbewusstseins bei ausgewählten Mitarbeitern. Zur Erfassung der Ausgangssituation bieten sich abhängig vom konkreten Einsatzfall unterschiedliche Methoden an. Hierzu zählen u. a. bestimmte Dokumentenanalyseverfahren und gezielte Mitarbeiterbefragungen. Bezogen auf den Inhalt dieser Arbeit sind die wichtigsten Ergebnisse dieser ersten Phase in Kapitel 4.4 zusammengefasst.

Phase 2: Entwicklungsphase

In der zweiten Phase, der eigentlichen Veränderungsphase, erfolgt die Entwicklung neuer Lösungen. Dabei ist es von essentieller Bedeutung, nicht nur die bereits involvierten Mitarbeiter, sondern auch die betroffenen Führungskräfte in diesen Lösungsgenerierungsprozess einzubeziehen. Neben der Durchführung regelmäßiger Arbeitstreffen, in denen die neu entwickelten Methoden mit ihren Anwendern abgestimmt und verbessert werden, empfiehlt sich zudem die Integration von Regelkommunikationen, in denen die Führungsebene fortlaufend über den aktuellen Projektstand informiert wird. Die in dieser Phase generierten Lösungen sollten sich jedoch nicht nur auf methodische und informationstechnische Neuerungen beziehen. Vielmehr müssen in dieser Phase auch die methodischen Auswirkungen auf die Prozess- und Organisationsstrukturen sowie auf die bereichsbezogenen Qualifikationsprofile mit dem Ziel der Erreichung eines Gesamtoptimums berücksichtigt werden.

Phase 3: Implementierungsphase

Das Hauptziel dieser letzten Phase ist die nachhaltige Implementierung der neuen Methoden und IT-Systeme im jeweiligen Unternehmensbereich. Hierzu müssen zunächst alle vom Veränderungsprozess betroffenen Mitarbeiter über die konkreten Veränderungen unterrichtet und von der Notwendigkeit dieser Maßnahmen überzeugt werden. Dabei kann sich die frühzeitige Einbeziehung einiger Endanwender in den Methodenentwicklungsprozess als äußerst hilfreich

erweisen, da diese als „Meinungsbildner“ dienen und dadurch den Implementierungsprozess maßgeblich beschleunigen können. Darüber hinaus empfiehlt es sich, insbesondere in dieser Projektphase auf einen konsequenten Methodeneinsatz (z.B. bedarfsorientierte Arbeitstreffen, Gruppengespräche, extrinsische Anreize) zurückzugreifen.

8.2 Das mechatronikorientierte Planungsumfeld

Dem in dieser Arbeit entwickelten Lösungsansatz liegen in mehrfacher Hinsicht die in Kapitel 8.1 vorgestellten Grundprinzipien des Veränderungsmanagements zugrunde. Dies äußert sich beispielsweise darin, dass nicht nur die technischen Aspekte der neuen Planungsmethode berücksichtigt, sondern auch die prozessualen und organisatorischen Auswirkungen näher untersucht werden. Hierzu wird ein methodengerechtes Planungsumfeld entwickelt, dessen konkrete Ausprägungen anhand des in Kapitel 4 analysierten Unternehmensbereichs veranschaulicht werden (Kapitel 8.2.2). Darüber hinaus wird ein Weg aufgezeigt, wie sich die neue Planungsmethode bzw. die zur Umsetzung benötigten IT-Systeme gemäß der in Kapitel 4.5 gestellten Anforderungen ohne große Aufwendungen in die operative Praxis implementieren lassen.

8.2.1 Schrittweise Einführungsstrategie

Grundsätzlich lassen sich neue Planungslösungen mit unterschiedlichen Strategien in die Praxis einführen. Aufgrund der in Kapitel 4.5 beschriebenen Anforderungen und des modularen Aufbaus der neu entwickelten Planungsmethode empfiehlt sich in diesem Fall eine sukzessive Einführung der neuen Planungslösung („Keimzellenstrategie“). Dies bedeutet, dass nicht alle Teilaspekte der mechatronikorientierten Gesamtlösung auf einmal und über alle Bereiche hinweg gleichermaßen eingeführt werden müssen. Vielmehr ist eine Keimzelle festzulegen, die zunächst in einem definierten Umfeld eingeführt und anschließend – in Abhängigkeit von den firmenspezifischen Randbedingungen – schrittweise erweitert wird. Die Festlegung einer geeigneten Keimzelle bzw. ihre sukzessive Erweiterung hängt dabei in erster Linie von den Prioritäten des jeweiligen Unternehmens ab. Manche Unternehmen sehen zum Beispiel im Aufbau eines mechatronischen Ressourcenmodells bzw. in der Durchführung virtueller Inbetriebnahmen für sich die größten Potentiale. Für andere ist hingegen die Erstellung eines standardisierten Prozessmodells bzw. die automatisierte Generierung von SPS-Programmen von übergeordneter Bedeutung.

Wie in Abbildung 8-2 illustriert, hängt der wirtschaftliche Einsatz der neuen Planungsmethode in entscheidendem Maß von den Ausprägungen und der Pflege der eingesetzten mechatro-

nischen Ressourcenbibliotheken ab. Je mehr standardisierte und wieder verwendbare Ressourcenkomponenten in den Bibliotheken enthalten sind, desto geringer ist der Modellierungsaufwand bzw. desto größer ist die Wirtschaftlichkeit der neuen Methode. In diesem Zusammenhang empfiehlt es sich, sowohl das in den einzelnen Projekten gesammelte Erfahrungswissen als auch die in Vorgängerprojekten integrierten Spezialkomponenten projektbegleitend in die mechatronische Ressourcenbibliothek einzupflegen. Auf Basis dieser dokumentierten Projekterfahrungen können sowohl die Modellierungsaufwendungen in Nachfolgeprojekten kontinuierlich verringert als auch die Planungsqualität deutlich gesteigert werden.

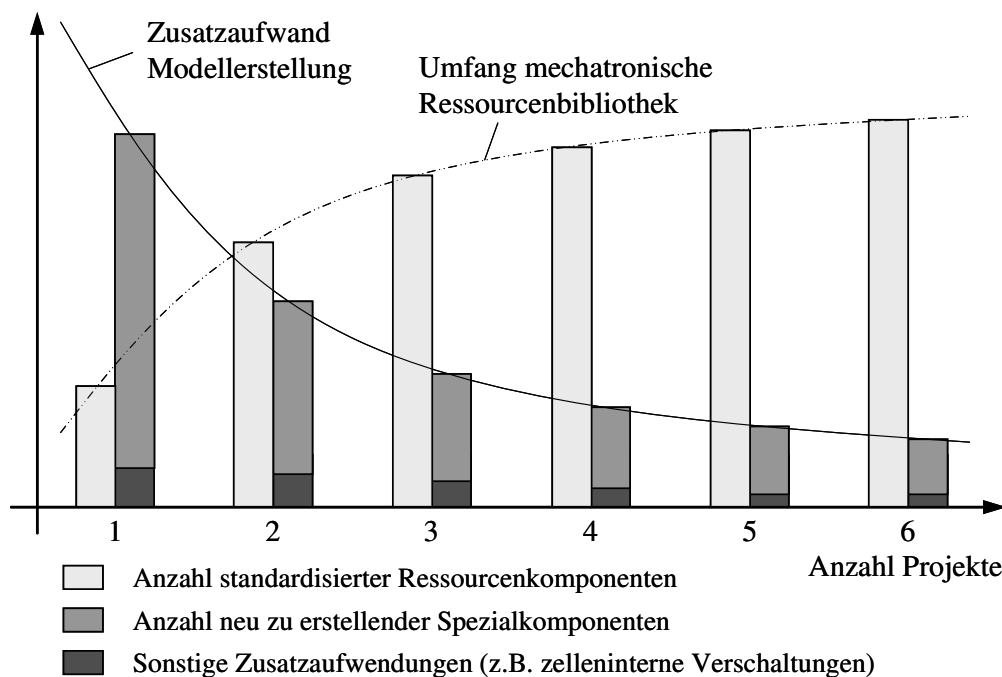


Abbildung 8-2: Aufwandsreduzierung durch wieder verwendbare Ressourcenkomponenten

8.2.2 Methodische Auswirkungen auf das Planungsumfeld

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Auswirkungen der neuen Planungsmethode auf das gegebene Planungsumfeld (Prozessablauf, Fachbereiche, Qualifikationsprofile) aufgezeigt und erläutert. Als Grundlage dient hierzu der in Kapitel 4 untersuchte Unternehmensbereich aus der Nutzfahrzeugindustrie. Die heutige Aufgabenverteilung innerhalb der einzelnen Fachbereiche ist in Kapitel 4.3 beschrieben. Eine zusammenfassende Übersicht über den zellenbezogene Rohbau-Planungsprozess ist in Abbildung 4-7 gegeben.

Bezogen auf das heutige Planungsumfeld hat die Einführung der neu entwickelten Planungsmethode folgende prozessuale und organisatorische Auswirkungen zur Folge:

Simultaneous Engineering

Während der heutige Rohbau-Planungsprozess durch eine größtenteils sequentielle Aufgabebearbeitung gekennzeichnet ist (Kapitel 4.4), unterstützt und fördert die neue Planungslösung ein simultanes und vernetztes Zusammenarbeiten der einzelnen Fachbereiche. Grundlage dieses Simultaneous Engineering bildet das mechatronische PPR-Datenmodell, dessen informationstechnische Ausprägungen in Kapitel 6.3 beschrieben sind. Auf diese Weise wird der für die Elektro- und Steuerungstechnik verantwortliche Fachbereich sehr viel früher im zellenspezifischen Planungsprozess involviert (Abbildung 8-3). Dies führt zu signifikanten Zeiteinsparungen in der Produktionsplanung und spiegelt sich aufgrund der gesteigerten Planungstransparenz darüber hinaus in einer Qualitätsverbesserung der Produktionssysteme wider.

Auswirkungen auf die Fachbereiche

Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, bedingt die Einführung der neuen Planungsmethode ein prozessuales und organisatorisches Zusammenrücken der beteiligten Fachbereiche. Dies äußert sich insbesondere darin, dass viele Tätigkeiten nicht mehr nur von einem, sondern in enger Zusammenarbeit von mehreren Fachbereichen durchzuführen sind. Beispiele hierfür sind die Entwicklung mechatronischer Ressourcenkomponenten, die projektspezifische Ausgestaltung des digitalen Prozess- und Ressourcenmodells sowie die Durchführung virtueller Inbetriebnahmen. Hierzu bietet sich der Einsatz interdisziplinärer Arbeitskreise an, da zur Bewerkstelligung dieser Aufgaben – vor allem für den funktionsübergreifenden Absicherungsprozess der virtuellen Inbetriebnahme – ein fundiertes, bereichsübergreifendes Fachwissen erforderlich ist.

Angepasste Qualifikationsprofile

Mit den beschriebenen Prozessveränderungen ändern sich zwangsläufig auch die Aufgabeninhalte bzw. die bereichsbezogenen Qualifikationsprofile. Aufgrund des vernetzten Zusammenarbeitens der einzelnen Fachbereiche ist die in Kapitel 4.3 beschriebene strikte Aufgabentrennung nicht mehr länger haltbar. Ziel ist nicht länger das Erreichen lokaler Optima. Stattdessen muss der ganzheitliche Planungsprozess bzw. der gesamte Lebenszyklus des Produktionssystems in den Vordergrund planerischer Aktivitäten rücken. Diese Anforderung bedingt eine interdisziplinär ausgerichtete Ausbildung der am Planungsprozess beteiligten Mitarbeiter. Dies bezieht sich sowohl auf das methodische Fachwissen als auch auf den Umgang mit den erforderlichen IT-Systemen.

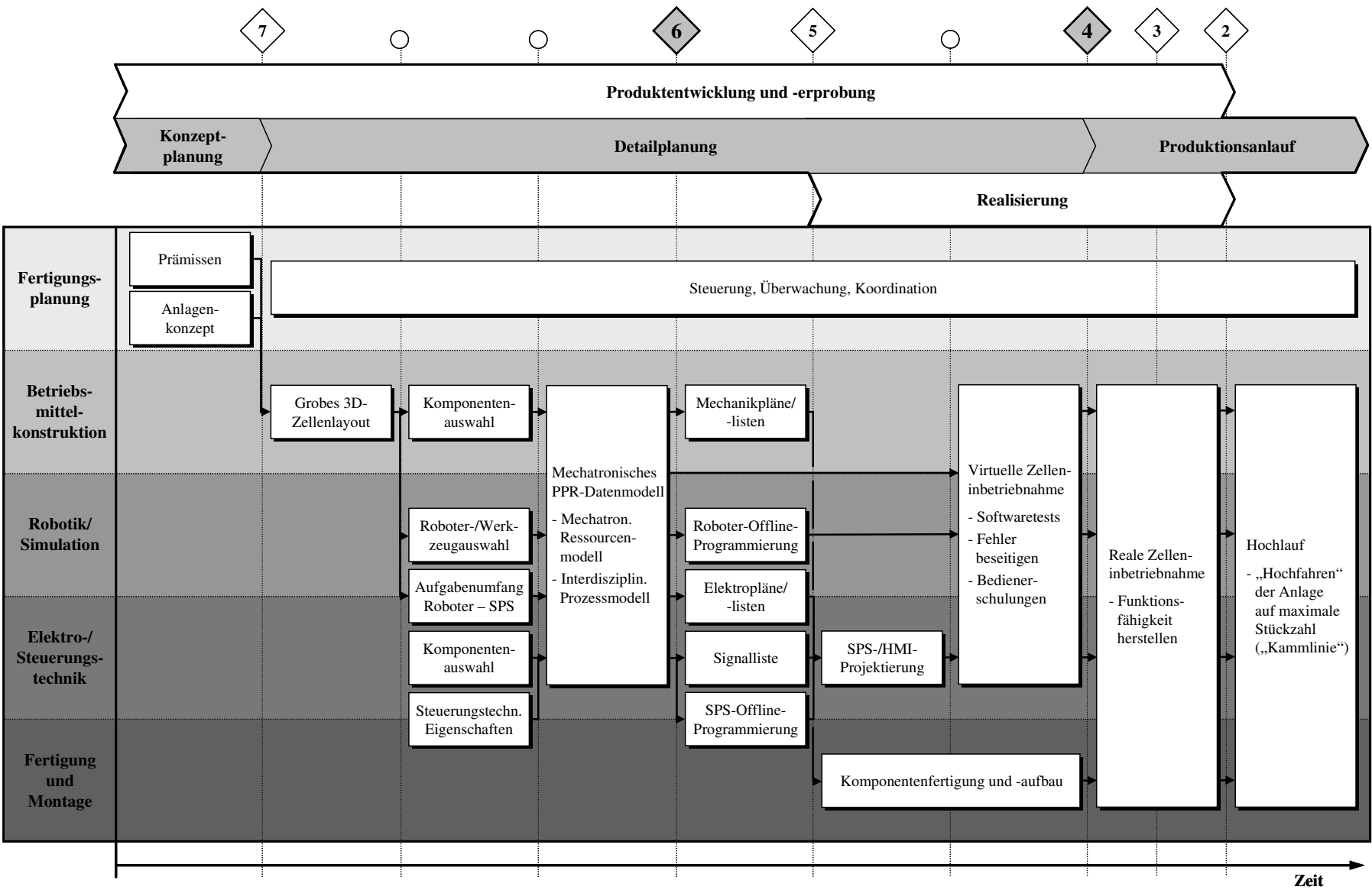


Abbildung 8-3: Vereinfachte Darstellung des mechatronikorientierten Planungsprozesses

Neue Synchronisationspunkte im Prozessablauf

Einerseits führt die vernetzte Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Fachbereichen zu einer höheren Planungstransparenz sowie zu einer Verkürzung der Produktionsplanungszeiten. Dies stellt jedoch nur eine Seite der Medaille dar, da dieses Planungsvorgehen andererseits zu einer Komplexitätssteigerung der internen Prozessabläufe führt. Aus diesem Grund müssen geeignete „organisatorische Hilfsmittel“ bereitgestellt werden, mit deren Hilfe diese Komplexität beherrschbar wird bzw. die zur Verbesserung der Projektorganisation und -koordination beitragen. Hierzu empfiehlt sich die Einführung zusätzlicher Synchronisationspunkte, die als verbindliche Meilensteine in den derzeitigen Produktionsentstehungsprozess zu integrieren sind. Bezogen auf den analysierten Unternehmensbereich sind dies vor allem die beiden Synchronisationspunkte „4“ und „6“, deren zeitliche Eingliederungen im Planungsprozess in Abbildung 8-3 dargestellt sind. Dabei handelt es sich um die beiden Meilensteine:

- **Virtueller SOP I (Meilenstein 6):** Zu diesem Prozesszeitpunkt liegt ein durchgängiges, vollständig beschriebenes PPR-Datenmodell (Prozessmodell, mechatronisches Ressourcenmodell) vor. Dieses wurde von allen am Planungsprozess beteiligten Fachbereichen positiv begutachtet, geometrisch abgesichert (d.h. auf Kollisionsfreiheit geprüft) sowie zur Ableitung von Arbeitsunterlagen, Roboter- und SPS-Programmen freigegeben.
- **Virtueller SOP II (Meilenstein 4):** Dieser Meilenstein stellt den letzten Synchronisationsschritt vor dem realen Produktionsanlauf dar. Zu diesem Zeitpunkt liegen neben dem mechatronischen PPR-Datenmodell die realen Steuerungskomponenten (Hard- und Software) vor, deren funktionales Zusammenspiel im Rahmen einer virtuellen Inbetriebnahme erfolgreich nachgewiesen wurde. Die Einhaltung der geforderten Leistungsparameter wurde dabei simulativ bestätigt; Bedienerschulungen wurden zudem am mechatronischen Ressourcenmodell durchgeführt.

Zur erfolgreichen Einführung der mechatronikorientierten Planungslösung sind nicht nur die in Kapitel 6 bzw. die in diesem Kapitel beschriebenen informationstechnischen, prozessualen und organisatorischen Voraussetzungen zu erfüllen. Es ist darüber hinaus ein grundsätzlicher Umdenkprozess erforderlich. Dieser Aspekt, dem im Rahmen von Veränderungsprojekten eine wichtige Bedeutung zukommt, wird u. a. in [Milb99] betont. Demnach stellt „der Abschied von der traditionellen tayloristischen Arbeits- und Denkweise eine wesentliche Hürde [...] für eine effiziente Nutzung der neuen Technologien des Virtual Engineering dar“.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung der Arbeit

Die marktgetriebenen Anforderungen in Form kürzer werdender Innovations- und Modellzyklen sowie steigender Variantenzahlen wirken sich auf den gesamten Entstehungsprozess neuer Produkte und Produktionseinrichtungen aus. Von diesen wettbewerbsentscheidenden Herausforderungen besonders betroffen sind die Prozesse innerhalb der Produktionsplanung und der anschließenden Anlaufphase. Diese werden auf der einen Seite zunehmend komplexer und infolge dessen auch fehleranfälliger. Auf der anderen Seite steht dem verantwortlichen Fachpersonal zur Durchführung der einzelnen Tätigkeiten immer weniger Zeit zur Verfügung.

Zwischen Anspruch und Wirklichkeit klafft heute eine große Lücke. Dies zeigt sich vor allem daran, dass derzeit ein Großteil der in europäischen Ländern stattfindenden Produktionsanläufe sowohl die wirtschaftlichen als auch die technischen Ziele verfehlt. Die Ursachen hierfür sind meist auf Fehler und Unzulänglichkeiten, die im Rahmen der Produktionsplanung verursacht werden, zurückzuführen. Diese beziehen sich insbesondere auf organisatorische Defizite in Form bereichsübergreifender Missverständnisse sowie auf technische Mängel, die in erster Linie aus der gestiegenen Vernetzung mechanischer, elektrischer und steuerungstechnischer Anlagenkomponenten sowie aus fehlerbehafteten Steuerungsprogrammen resultieren. Bereits im Jahre 1969 stellte Matley fest, dass „Geld verloren geht, welches nie wieder eingenommen werden kann, wenn der Anlauf einer neuen Anlage verzögert ist“ [Matl69]. Die Gewissheit, dass zukünftig die Anzahl an Produktionsanläufen – vor allem die der Wiederanläufe während der laufenden Produktion – weiter zunehmen wird, verdeutlicht zum einen die Bedeutung der von Matley getroffenen Feststellung und zeigt zum anderen die Notwendigkeit neuer und effizienterer Planungs- und Inbetriebnahmestrategien.

Vor diesem Hintergrund verfolgt die vorliegende Arbeit die Zielsetzung, die interdisziplinäre Zusammenarbeit in der Produktionsplanung durch den Einsatz innovativer Methoden, Modelle und angepasster IT-Systeme nachhaltig zu verbessern und somit den Grundstein zur Durchführung beschleunigter und stabiler Produktionsanläufe zu legen. Im Gegensatz zu den derzeit existierenden Lösungsansätzen weist die neu entwickelte Planungsstrategie entscheidende Alleinstellungsmerkmale auf. Betrachten die meisten Lösungsansätze lediglich die Realisierung punktueller bereichsbezogener Optima, so stellt das in dieser Arbeit neu entwickelte Gesamt-

konzept einen umfassenden und durchgängigen Ansatz dar, der nicht nur eine nachhaltige Optimierung des bereichsübergreifenden Planungsprozesses zur Folge hat. Vielmehr adressiert er den gesamten Lebenszyklus automatisierter Fertigungssysteme und zielt demnach auf die Realisierung eines globalen und lebenszyklusbezogenen Gesamtoptimums ab. Entwickelt wird dieser neuartige Gesamtansatz mit einem besonderen Fokus auf den Projektierungs- und Anlaufprozess automatisierter Fertigungszellen im Karosserierohbau.

Basis dieser neuen Planungslösung bildet die frühzeitige und integrierte Betrachtung mechanischer, elektrischer und steuerungstechnischer Ressourcendaten. Diese werden zu so genannten mechatronischen Ressourcenkomponenten zusammengefasst und den am Planungsprozess beteiligten Fachbereichen in Form einer standardisierten, projektübergreifenden Ressourcenbibliothek zur Verfügung gestellt. Eine weitere Neuerung besteht in der Funktionserweiterung heute existierender Prozessmodelle um neu konfigurierte Prozesselemente bzw. um deren anforderungsgerechte Erweiterung um neue steuerungsrelevante Eigenschaften. Unter Verwendung dieser neu definierten „Planungsobjekte“ erfolgt die interdisziplinäre und vernetzte Entwicklung eines mechatronischen Ressourcen- und eines den zellenspezifischen Prozessablauf beschreibenden digitalen Prozessmodells, die in einem weiteren Schritt zum mechatronischen PPR-Datenmodell zusammengefasst werden. Im Rahmen des Planungs- und Inbetriebnahmeprozesses nimmt dieses PPR-Datenmodell in vielerlei Hinsicht eine herausragende Bedeutung ein. Während der detaillierten Zellenplanung dient es u. a. als bereichsübergreifende Kommunikationsplattform und stellt zudem die Basis zur automatisierten Generierung standardisierter Arbeitsunterlagen und zellenspezifischer Steuerungsprogramme dar. Darüber hinaus kann das mechatronische Ressourcenmodell zur Validierung der entwickelten SPS- und HMI-Software eingesetzt werden. Diese „virtuelle Inbetriebnahme“ stellt zum einen ein wichtiges Instrument zur softwarebezogenen Qualitätssicherung als Basis zur Realisierung beschleunigter Produktionsanläufe dar. Zum anderen lassen sich mit Hilfe dieser innovativen Absicherungsmethode sehr viel früher im Gesamtprozess wichtige Erkenntnisse erschließen, die transparent für alle Projektbeteiligten in Form eines iterativen Verbesserungsprozesses in die laufende zellenspezifische Systemdetaillierung rückgeführt werden können.

Die mit dem neuen „mechatronikorientierten“ Gesamtkonzept einhergehenden Nutzenpotentiale beschränken sich nicht nur auf die Realisierung beschleunigter Planungs- und Anlaufprozesse mit dem Ergebnis höherer Anlagenreifegrade zum Produktionsbeginn. Ihr volles Potential entfaltet die neue Planungslösung erst bei produktbedingten Integrationsprozessen sowie bei Prozess- und Ressourcenmodifikationen während des Produktionsbetriebs. Das mechatro-

nische PPR-Datenmodell dient dabei als transparente Entscheidungsplattform, auf deren Basis sowohl hard- als auch softwarebezogene Zellenänderungen – entkoppelt von der realen Anlage – analysiert und bewertet werden können. Neben einer nachhaltigen Verbesserung der Anlagenqualität können durch diese Möglichkeiten Stillstandszeiten deutlich reduziert und somit ein Produktivitätszuwachs erzielt werden (Abbildung 9-1). Der Übergang von der „Digitalen in die reale Fabrik“ stellt jedoch nur einen Teil der anzustrebenden Vernetzung zwischen diesen beiden „Welten“ dar. Die Realisierung eines geschlossenen Regelkreises zwischen der Digitalen und realen Fabrik ermöglicht zudem eine permanente Rückkopplung von Produktionswissen in das mechatronische PPR-Datenmodell, das im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses wieder Eingang in neue Planungsprojekte findet.

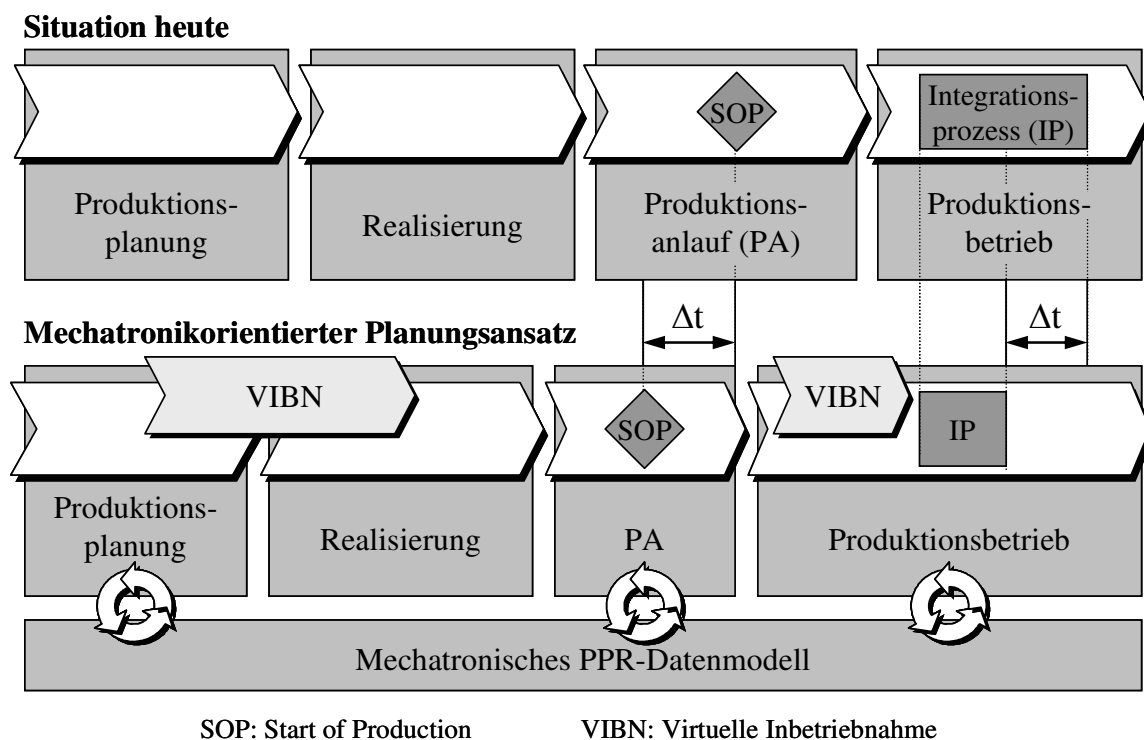


Abbildung 9-1: Auswirkungen des neuen Planungsansatzes auf den Produktionsentstehungsprozess

Die softwaretechnische Umsetzung dieser neuen Planungsmethode basiert auf kommerziellen IT-Werkzeugen der Digitalen Fabrik, die entsprechend den methodischen Anforderungen angepasst und erweitert werden. Neben der Untersuchung und Bewertung der informationstechnischen Umsetzungsmöglichkeiten werden weiterhin die prozessualen und organisatorischen Auswirkungen der neuen Planungsmethode am Beispiel eines ausgewählten Nutzfahrzeugherstellers aufgezeigt. Anhand eines Praxisbeispiels erfolgen schließlich eine Demonstration der technischen Anwendbarkeit der neuen Methode sowie eine abschließende Bewertung der mit der neuen Planungslösung zu erschließenden Nutzenpotentiale.

9.2 Ansätze für weitere Forschungsaktivitäten

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass das Konzept zur mechatronikorientierten Planung automatisierter Fertigungszellen die in Kapitel 4.5 gestellten methodischen Anforderungen in vollem Umfang erfüllt (Tabelle 7-1). Im Gegensatz dazu sind auf Seiten der IT noch punktuelle Einschränkungen festzustellen, die hinsichtlich eines etwaigen Produktiveinsatzes der neuen Planungslösung von den jeweiligen Systemherstellern zu beheben sind. Neben der Behebung dieser IT-bedingten Defizite gibt es basierend auf dem in dieser Arbeit entwickelten Gesamtkonzept noch eine der Reihe offener Fragestellungen, die es in weiterführenden Forschungsaktivitäten zu diskutieren und zu beantworten gilt. Hierzu zählen unter anderem:

- **Detaillierungsgrad des mechatronischen Ressourcenmodells:** Hierbei ist zu klären, welchen Umfang und Inhalt das mechatronische Ressourcenmodell besitzen sollte, so dass es einerseits möglichst viele bereichsübergreifende Daten beinhaltet (z.B. zur Ableitung von Arbeitsunterlagen), andererseits aber auch den zu stellenden Komplexitäts- und Wirtschaftlichkeitsanforderungen genügt.
- **Durchgängige Verzahnung einzelner Softwarelösungen:** Diese Anforderung betrifft insbesondere die zur digitalen Planung und Elektro-/Steuerungsprojektierung eingesetzten IT-Systeme. Offene Fragestellungen beziehen sich in diesem Zusammenhang u. a. auf die Integrationsmöglichkeiten der Elektrokonstruktion in den mechatronikorientierten Planungsprozess, die Integration ressourcenspezifischer SPS-Programmbausteine in mechatronische Ressourcenkomponenten sowie auf die Realisierung eines durchgängigen, domänenübergreifenden PPR-Datenmanagements.
- **Ganzheitliche Betrachtung mehrerer Fabrikebenen:** Den Fokus dieser Arbeit bildet die Entwicklung einer bereichsübergreifenden Planungslösung für automatisierte Produktionssysteme auf Zellenebene. Parallel hierzu existieren derzeit verschiedene Ansätze, den Projektierungsprozess übergeordneter Fabrikebenen (z.B. Fertigungslinien) durch den Einsatz neuer Methoden, Modelle und Informationssysteme zu verbessern. Beispiele hierfür sind in [HeWo04, Römb04, MaBu06] zu finden. Eine zentrale Anforderung wird zukünftig darin bestehen, die für die einzelnen Fabrikebenen existierenden Lösungsansätze sowohl methodisch als auch informationstechnisch zusammenzuführen, um somit ein ebenenübergreifendes Gesamtoptimum erzielen zu können.
- **Organisatorisches Zusammenwirken von OEM und Zulieferern:** Weitere Ansätze für zukünftige Forschungsaktivitäten bestehen in der Untersuchung und Bewertung der metho-

dischen und informationstechnischen Auswirkungen der neuen Planungslösung auf das organisatorische Zusammenwirken der OEM und ihren Zulieferern. Zu diskutierende Aspekte beziehen sich in diesem Zusammenhang u. a. auf die Klärung zukünftiger Modelle zur unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit (z.B. Zuständigkeiten/Verantwortlichkeiten, Gesamtworkflow) sowie auf technische Fragestellungen, die vor allem den unternehmensübergreifenden Datenaustausch adressieren.

- **Methodentransfer für Fertigungszellen anderer Bereiche:** Zwar fokussiert die in dieser Arbeit entwickelte Planungslösung den Planungs- und Anlaufprozess automatisierter Fertigungszellen im Karosserierohrbau, kann in ihrem Kern jedoch auch für Fertigungszellen anderer Bereiche (z.B. Montagezellen, Werkzeugmaschinen) adaptiert und angewendet werden. Voraussetzung hierfür ist eine eingehende Analyse der in diesen Bereichen gegebenen Rahmenbedingungen (z.B. Planungsprozess, Fachbereiche, verwendete Ressourcenkomponenten, Steuerungstechnik), die beim Methodentransfer zu berücksichtigen sind.

Quellenverzeichnis

Literatur

- [ADEH05] Assmann, D.; Dörr, J.; Eisenbarth, M.; Hefke, M.; Soto, M.; Szulman, P.; Trifu, A.: Using Ontology-Based Reference Models in Digital Production Engineering Integration, Proceedings of the 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, 2005.
- [Aggt87] Aggteleky, B.: Fabrikplanung, Band 1: Grundlagen – Zielplanung – Vorarbeiten, Carl Hanser Verlag, München, 1987.
- [Appe06] Appel, F.: Die virtuelle Inbetriebnahme im Anlagenbau – ein Erfahrungsbericht, in: Seminarberichte iwv, Nr. 84: Virtuelle Inbetriebnahme – Von der Kür zur Pflicht?, Herbert Utz Verlag, 2006.
- [Aßma96] Aßmann, S.: Methoden und Hilfsmittel zur abteilungsübergreifenden Projektierung komplexer Maschinen und Anlagen, Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 1996.
- [BäHa03] Bär, T.; Haasis, S.: Steps towards the Digital Factory, Proceedings of the 36th CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems, Saarbrücken, Germany, 2003.
- [Bees04] Beesten, H.: Fertige Programme für fiktive Maschinen, in IEE 49. Jahrgang 11, 2004.
- [Bern01] Berning, R.: Grundlagen der Produktion – Produktionsplanung und Beschaffungsmanagement, Cornelsen Studien-Baustein Wirtschaft, 2001.
- [BHZB02] Bär T.; Haasis S; Zenner C.; Bley H.: Verschmelzen digitale Prozessplanung und Ablaufsimulation?, CAD-CAM Report Nr. 12, 2002, S. 34-38.
- [BKSB05] Bär, T.; Kiefer, J.; Schmidgall, G.; Burr, H.: Objectives of a Seamless Digital Process Chain in the Automotive Industry, Proceedings of the CARV 05, Munich, Germany, 2005.

- [BlBo06] Bley, H.; Bossmann, M.: Automated Assembly Planning Based on Skeleton Modelling Strategy, Precision Assembly Technologies for Mini and Micro Products, IFIP International Federation for Information Processing, Springer-Verlag, 2006, S. 121-131.
- [BlFr01a] Bley, H.; Franke, C.: Integration von Produkt- und Produktionsmodell mit Hilfe der Digitalen Fabrik, in: wt Werkstattstechnik 91 (2001) H. 4, S. 214-220.
- [BlFr01b] Bley, H.; Franke, C.: Assembly System Design Based on Automated Process Modeling, in: Proceedings of the 34th CIRP International Seminar on Manufacturing systems, Athens, Greece, 2001, S. 39-44.
- [BlFZ04] Bley, H.; Franke, C.; Zenner, C.: The User as the Main Focus for the Actual Realization of the Digital Factory, International Conference on Competitive Manufacturing, Stellenbosch, South Africa, 2004, S. 337-342.
- [BlFZ06] Bley, H.; Fritz, J.; Zenner, C.: Die zwei Seiten der Digitalen Fabrik, in: ZWF Jahrg. 101 (2006) 1-2, S. 19-23.
- [BlNe04] Bleines, A.; Nestle, T.: Planung eines Idealrohbaus für die Baureihe XY, Ulm, 2004.
- [Blum06] Blumenau, J.-C.: Lean Planning unter besonderer Berücksichtigung der Skalierung wandlungsfähiger Systeme, Dissertation am Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM der Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2006.
- [Boeh79] Boehm, B. W.: Guidelines for Verifying and Validating Software requirements and Design Specifications, European Conference on applied information technology EURO IFIP, North Holland Publ. Co., London, 1997, S. 711-719.
- [Brac02] Bracht, U.: Ansätze und Methoden der Digitalen Fabrik, Tagungsband Simulation und Visualisierung 2002, Magdeburg, 2002.
- [BrEM05] Bracht, U.; Eckert, C.; Masurat, T.: Ein umfassender Ansatz für Planung und Betrieb, in: Intelligenter produzieren, VDMA Verlag GmbH, 2005/1, S. 8-10.
- [Brus05] van Brussel, H.: Mechatronics, or how to make better machines, in: VDI-Berichte 1892: Mechatronik 2005 – Innovative Produktentwicklung, VDI-Verlag, 2005, S. 85-105.

- [Brus96] van Brussel, H.: Mechatronics – A Powerful Concurrent Engineering Framework, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 1, No. 2, 1996, S. 127-136.
- [BSEM05] Bracht, U.; Schlange, C.; Eckert, C.; Masurat, T.: Datenmanagement für die Digitale Fabrik, in: wt Werkstattstechnik 95 (2005) H. 4, S. 197-204.
- [BuLW03] Budke, W.; Lux, K.-F.; Waldminghaus, S.: Megatrends der Automobilindustrie – Eine Zusammenfassung der wichtigsten Richtungsvorgaben des VDA-Technik-Kongresses in Wolfsburg, des Automobilforums in Stuttgart und der IAA in Frankfurt, veröffentlicht von der intra Unternehmensberatung, 2003.
- [BVDW04] Burr, H.; Vielhaber, M.; Deubel, T.; Weber, C.; Haasis, S.: CAx/EDM-integration – enabler for methodological benefits in the design process, Konferenz-Einzelbericht DESIGN 2004 – International Design Conference, The Design Society, Dubrovnik, 2004, S. 833-840.
- [Chac04] Chacko, J.: Aus der „Digitalen Fabrik“ in die „Reale Fabrik“ – und zurück, Vortrag im Rahmen des 1. Fachkongresses „Digitale Fabrik“, Ludwigsburg, 2004.
- [Damo96] Damodaran, L.: User involvement in the systems design process – a practical guide for users, in: Behaviour & Information Technology, 15, 1996, S. 363-377.
- [Dann05] Dannenberg, J.: Von der Technik zum Kunden, in: Gottschalk, B.; Kalmbach, R.; Dannenberg, J.: Markenmanagement in der Automobilindustrie – Die Erfolgsstrategien internationaler Top-Manager, 2005, S. 33-56.
- [DeAm06] Denkena, B.; Ammermann, C.: Analyse und Potentiale des Anlagenanlaufs in der Großserienfertigung, Vortrag im Rahmen des BMBF-Projekts „Ramp-Up/2“, Frankfurt, 2006.
- [DFJK05] Diedrich, C.; Franz, G.; John, K.-H.; Krause, J.; Poignee, F.: Support of Control Application Design using Digital Design and Planning of Manufacturing Cells, Proceedings of the 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, 2005.
- [DoLa05] Doppler, K.; Lauterburg, C.: Change Management – Den Unternehmenswandel gestalten, Campus Verlag, Frankfurt/Main, 2005.

- [DoTB01] Dombrowski, U.; Tiedemann, H.; Bothe, T.: Visionen für die Digitale Fabrik, in: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 96 (2001) 3, S. 96-100.
- [Easo01] Eason, K.: Changing perspectives on the organizational consequences of information technology, in: Behaviour & Information Technology, 20 (5), 2001, S. 323-328.
- [EiBr05] Eißrich, R.: Die vernetzte und integrierte Planung durch die Digitale Fabrik, in: Intelligenter produzieren, VDMA Verlag GmbH, 2005/1, S. 4-6.
- [EvBL95] Eversheim, W.; Bochtler, W.; Laufenberg, L.: Simultaneous Engineering, Springer-Verlag, Berlin, 1995.
- [Ever02] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik, Band 3: Arbeitsvorbereitung, 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2002.
- [Ever90] Eversheim, W.: Inbetriebnahme komplexer Maschinen und Anlagen, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990.
- [EvSc05] Eversheim, W.; Schuh, G.: Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung, Springer-Verlag, Berlin, 2005.
- [EvSW02] Eversheim, W.; Schmidt, K.; Weber, P.: Virtualität in der Wertschöpfungskette, in: wt Werkstattstechnik 92 (2002) H. 4, S. 149-153.
- [Fedr04] Fedrowitz, C.: Virtuelle Inbetriebnahme – heute und morgen, Vortrag im Rahmen des 1. Fachkongresses „Digitale Fabrik“, Ludwigsburg, 2004.
- [FiVo02] Fischer, K.; Vogel-Heuser, B.: UML in der automatisierungstechnischen Anwendung – Stärken und Schwächen, in: Automatisierungstechnische Praxis (atp) 44 (2002) Heft 10, S. 63-69.
- [Föll94] Föllinger, O.: Regelungstechnik – Einführung in die Methoden und ihre Anwendung, 8. Auflage, Hüthig Verlag, Heidelberg, 1994.
- [Fran03] Franke, C.: Feature-basierte Prozesskettenplanung in der Montage als Basis für die Integration von Simulationswerkzeugen in der Digitalen Fabrik, Dissertation am Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM der Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2003.

- [FrMJ01] Frey, G.; Minas, M.; John, K.-H.: Integration von Petrinetzen in den Steuerungsentwurf nach IEC 61131, Proceedings of the SPS/IPC/Drives, Nürnberg, 2001.
- [FrSc00] Frey, G.; Schmidt, A.: Automatische Erzeugung von SPS-Programmen aus Petrinetzen, in: Tagungsband der Fachtagung Verteilte Automatisierung 2000, Magdeburg, S. 177-184.
- [FWEN05] Fleischer, J.; Wawerla, M.; Ender, T.; Nyhuis, P.; Heins, M.; Großhennig, P.: Digitaler Serienanlauf beschleunigt den Markteintritt, in: Intelligenter produzieren, VDMA Verlag GmbH, 2005/1, S. 36-37.
- [GaEK01] Gausemeier, J.; Ebbesmeyer, P.; Kallmeyer, F.: Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung neuer Produkte von morgen, Carl Hanser Verlag, München, 2001.
- [GaLü00] Gausemeier, J.; Lückel, J.: Entwicklungsumgebungen Mechatronik – Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme, in: HNI-Schriftenreihe Band 80, Universität Paderborn, 2000.
- [GeLa01] Gerhardt, A.; Lanza, M.: Die Überwindung der Arbeitsteilung durch die Digitale Fabrik, Vortrag anlässlich der Mitgliederversammlung des VDMA am 19.10.2001, Berlin.
- [GeRe04] Geckler, D.; Rehnelt, C.: Die „Digitale Fabrik“ als neue Wissensdrehscheibe zwischen OEM und Zulieferer, in: Projektmanagement aktuell, 1/2004, S. 26-30.
- [GüTe05] Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik, 6. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2005.
- [Hall01] Haller, E.: Digitale Fabrik, EDM-Forum, Fellbach, 2001.
- [HaRi02] Hanßen, D.; Riegler, T.: Studie Digitale Fabrik – Zentrales Innovationsthema in der Automobilindustrie, Pressegespräch Digitale Fabrik, Leinfelden, 2002.
- [HaTF96] Harashima, F.; Tomizuka, M.; Fukuda, T.: Mechatronics – „What is It, Why, and How?“, An Editorial, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 1., No. 1, 1996, S. 1-4.

- [HeWo04] Heinrich, S.; Wortmann, D.: Die simulative Optimierung der Fertigungssteuerung im laufenden Betrieb am Beispiel der Lackiererei der AUDI AG, Ingolstadt, Vortrag im Rahmen des 1. Fachkongresses „Digitale Fabrik“, Ludwigsburg, 2004.
- [Hirz07] Hirzle, A.: AutomationML – Pressekonferenz Hannover Messe 2007, Vortrag im Rahmen der Hannover Messe, 2007.
- [Horn05] Horn, V.: Die neue Fabrik entsteht wie ein Puzzle, in: Intelligenter produzieren, VDMA Verlag GmbH, 2005/1, S. 20-22.
- [Iser99] Isermann, R.: Mechatronische Systeme – Grundlagen, Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- [JoTi00] John, K.-H.; Tiegelkamp, M.: SPS-Programmierung mit IEC 61131-3, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2000.
- [KeSG84] Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung, Carl Hanser Verlag, München, 1984.
- [KiBB06a] Kiefer, J.; Bär, T.; Bley, H.: Mechatronic-oriented Engineering of Manufacturing Systems Taking the Example of the Body Shop, Proceedings of the CIRP conference LCE2006, Leuven, Belgium, 2006, S. 681-686.
- [KiBB06b] Kiefer, J.; Bär, T.; Bergholz, W.: Virtuelle Inbetriebnahme – Hürden und Wege in die operative Praxis, in: Seminarberichte iwb, Nr. 84: Virtuelle Inbetriebnahme – Von der Kür zur Pflicht?, Herbert Utz Verlag, 2006.
- [Kief03] Kiefer, J.: Erarbeitung einer digitalen Planungsmethodik für den Bereich Rohbau im Geschäftsbereich Nutzfahrzeuge, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM der Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2003.
- [KiMB06] Kiefer, J.; Mandel, S.; Bär, T.: Simulation der Anlageninbetriebnahme im Karosserierohbau, in: Simulation in Produktion und Logistik 2006, Tagungsband zur 12. ASIM Fachtagung, 2006, S. 449-458.
- [KKSL06a] Keijzer, W.; Kreimeyer, M.; Schack, R.; Lindemann, U.; Zäh, M. F.: Isolierung versus Vernetzung – wie arbeitet die Branche zusammen?, Vortrag im Rahmen des 3. Fachkongresses „Digitale Fabrik“, Ludwigsburg, 2006.

- [KKSL06b] Keijzer, W.; Kreimeyer, M.; Schack, R.; Lindemann, U.; Zäh, M. F.: Vernetzungsstrukturen in der Digitalen Fabrik, Dr. Hut Verlag, 2006.
- [Kott95] Kotter, J. P.: Leading Change: Why Transformation Efforts Fail, in: Harvard Business Review, No. 2, 1995.
- [KWES02] Kuhn, A. (Hrsg.); Wiendahl, H.-P.; Eversheim, W.; Schuh, G.: Fast Ramp Up – Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten, Ergebnisbericht einer Vorstudie des BMBF, Dortmund, Verlag Praxiswissen, 2002.
- [LiGW99] Linner, S.; Geyer, M.; Wunsch, A.: Optimierte Prozesse durch Digital Factory Tools, VDI-Berichte 1489, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999, S. 187-198.
- [LoLM02] Lorek, D.; Lorenzen, T.; Mellott, R.: Business Value of Manufacturing Flexibility, Master Thesis at the Michigan State University, 2002.
- [LoSa06] Longhitano, L.; Sasse, A.: Digitale Vorrichtungsabnahme, Virtual Reality und Augmented Reality zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme, 9. IFF-Wissenschaftstage, 2006.
- [Lucz98] Luzcak, H.: Arbeitswissenschaft, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- [Lutz06] Lutz, R.: Kompetenz durch Simulation – Hilfsmittel bei Entwicklung, Inbetriebnahme und Anwendung komplexer Großpressen, in: Seminarberichte iwB, Nr. 84: Virtuelle Inbetriebnahme – Von der Kür zur Pflicht?, Herbert Utz Verlag, 2006.
- [MaBu06] Mayer, G.; Burges, U.: Virtuelle Inbetriebnahme von Produktionssteuersystemen in der Automobilindustrie mittels Emulation, in: Simulation in Produktion und Logistik 2006, Tagungsband zur 12. ASIM Fachtagung, 2006, S. 541-550.
- [MaHa05] Manger, R.; Hammermeister, T.: Digitale Fabrik – Softwarewerkzeug integriert Steuerungstechnik in virtuelle Produktionsplanung, in: Automation & Drives, 2005.
- [Mand78] Mandelbaum, M.: Flexibility in Decision Making: An Exploration and Unification, Dissertation at the University of Toronto, 1978.
- [Matl69] Matley, J.: Keys to Successful Plant Startups, Chemical Engineering 8, 1969.

- [Meng05] Menges, R.: Maßstab für die Fertigung im 21. Jahrhundert, in: Intelligenter produzieren, VDMA Verlag GmbH, 2005/1, S. 14-16.
- [Mewe05] Mewes, J.: Virtuelle Inbetriebnahme mit realen Automatisierungssystemen und virtuellen Maschinen, in: Tagungsband der Deutsch-Niederländischen Automatisierungstage, Emden, 2005.
- [Milb99] Milberg, J. et al.: Virtual Engineering – Leistungsfähige Systeme für die Produktentwicklung, in: Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium, Shaker Verlag, Aachen, 1999, S. 141-167.
- [MODA05] Hefke, M. et al.: Abschlussbericht des BMBF-Forschungsprojektes MODALE, Hrsg.: Forschungszentrum Informatik (FZI), Karlsruhe, 2005.
- [MTUK94] Milgram, P.; Takemura, H.; Utsumi, A.; Kishino, F.: Augmented Reality: A Class of Displays on the Reality-Virtuality Continuum, SPIE Vol. 2351, Telemanipulator and Telepresence Technologies, 1994, S. 282-292.
- [MüBW05] Müller, M.; Bär, T.; Weber, C.: Was ist Reifegrad?, in: Beiträge zum 16. Symposium „Design for X“, Neukirchen, 2005, S. 17-26.
- [NoGI03] Nolde, J.; Gleißner, A.: Modellgestützte SPS-Code-Erzeugung, Simulation und Verifikation, in: A&D Kompendium 2003, S. 140-142.
- [Oehm04] Oehme, O.: Ergonomische Untersuchung von kopfbasierten Displays für Anwendungen der erweiterten Realität in Produktion und Service, Schriftenreihe Rationalisierung und Humanisierung, Band 61, Shaker-Verlag, Aachen, 2004.
- [Osme98] Osmers, U.: Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality, Forschungsberichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe (wbk), Band 87, Karlsruhe, 1998.
- [PBFG06] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre, 7. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg, 2006.
- [Pesc05] Pesch, D.: Ziel: Baukastenbasiertes Engineering, CAD CAM, 2005, S. 25-27.
- [Petr03] Petri, H.: Herausforderungen und Strategien für die Automobilproduktion, Automobil Forum 2003.
- [Pfoh00] Pfohl, H.-C.: Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen, 6. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2000.

- [Puhr90] Puhr-Westerheide, J.: Beschaffung und Abwicklung komplexer Montageanlagen – ein Erfahrungsbericht, VDI Berichte Nr. 871, 1990, S. 15-41.
- [Rauc04] Rauch, T.: Inbetriebnahme einer Fertigungs- und Montagezelle mit Hilfe virtueller Tools, Diplomarbeit an der FH München, 2004.
- [REFA69] AWF/REFA: Handbuch der Arbeitsvorbereitung, Beuth Verlag, Berlin, 1969.
- [REFA85] N. N.: Methodenlehre der Planung und Steuerung, Teil 1: Grundbegriffe, Hrsg. REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. München, Carl Hanser Verlag, Wien, 1985.
- [ReGR99] Reinhart, G.; Grunwald, S.; Rick, F.: Virtuelle Produktion – Technologie für die Zukunft, VDI-Z, Special C-Techniken, 1999.
- [Reit02] Reithofer, N.: Interview in VDI nachrichten, Nr. 23, 2002, S. 11.
- [ReKo02] Reinfelder, K.; Kotz, A.: 40 Prozent weniger Planungszeit, in: Automobil-Produktion, 2002, S. 34-36.
- [Rola03] Roland Berger Strategy Consultants: Zu hohe Kosten bei Fahrzeuganläufen, in: Automobilwoche Nr. 25, 2003, S. 21.
- [Römb04] Römberg, S.: Die Virtuelle Inbetriebnahme – Innovative Entwicklungen im Bereich der Digitalen Fabrik, Vortrag im Rahmen des 2. Symposiums „Digitale Fabrik“, Leipzig, 2004.
- [Ropo79] Ropohl, G.: Eine Systemtheorie der Technik zur Grundlagen der allgemeinen Technologie, München, 1979.
- [Rose98] Rosenstiel, L. v.: Der Widerstand gegen Veränderung : Ein vielbeschriebenes Phänomen in psychologischer Perspektive, in: Innovationsforschung und Technologiemanagement, Springer-Verlag, Berlin, 1998, S. 33-45.
- [Same97] Sametinger, J.: Software Engineering with reusable components, Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- [Saue04] Sauer, O.: Einfluss der Digitalen Fabrik auf die Fabrikplanung, in: wt Werkstattstechnik 94 (2004) H. 1/2, S. 31-34.
- [Saue05] Sauer, O.: Trends bei Manufacturing Execution Systemen (MES) am Beispiel der Automobilindustrie, in: PPS Management, Heft 3, 2005, S. 42-45.

- [Schä06] Schäfer, K.: Digital Engineering for Module and Flexibility Strategies, Vortrag im Rahmen der DELMIA European User Conference, Fellbach, 2006.
- [Scha92] Schanz, G.: Organisation, in: Handwörterbuch der Organisation, 3. Auflage, Stuttgart, 1992.
- [Sche94] Schelberg, H.-J.: Objektorientierte Projektierung von SPS-Software, Dissertation am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe, 1994.
- [Sche97] Scheer, A.-W.: Wirtschaftsinformatik – Referenzmodelle für industrielle Geschäftsprozesse, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- [Schi02] Schiller, E.: Bis 2005 haben wir alle wesentlichen Eckpfeiler der Digitalen Fabrik, in: Pictures of the Future, Erlangen, 2002, S. 13-15.
- [Schl05] Schlögl, W.: Bringing the Digital Factory into Reality – Virtual Manufacturing with Real Automation Data, Proceedings of the CARV 05, Munich, Germany, 2005.
- [Schm95] Schmigalla, H.: Fabrikplanung – Begriffe und Zusammenhänge, Carl Hanser Verlag, München, 1995.
- [Schn06] Schneck, M.: Neue Ansätze zur digitalen Planung und Absicherung der Steuerungslogik, Vortrag im Rahmen des Karlsruher leittechnischen Kolloquiums „Ideen – Wege – Perspektiven“, 2006.
- [Scho06] Schoch, A.: Über die digitale Fabrik zur virtuellen Produktion, Vortrag im Rahmen des 3. Fachkongresses „Digitale Fabrik“, Ludwigsburg, 2006.
- [Schw01] Schwarze, J.: Projektmanagement mit Netzplantechnik, Neue Wirtschafts-Briefe, 8. Auflage, Herne-Verlag, 2001.
- [Schw89] Schweitzer, G.: Mechatronik – Aufgaben und Lösungen, in: VDI-Berichte 787, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989.
- [ScKB05] Schmidgall, G.; Kiefer, J.; Bär, T.: Objectives of Integrated Digital Production Engineering in the Automotive Industry, Proceedings of the 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, 2005.
- [ScKF05] Schuh, G.; Kampker, A.; Franzkoch, B.: Anlaufmanagement, in: wt Werkstattstechnik 95 (2005) H. 5, S. 405-409.

- [Seel99] Seel, U.: Robotergestützte Zellenkalibrierung als Basis einer feature-basierten Montageplanung, Dissertation am Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM der Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 1999.
- [Seit03] Seitz, M.: Speicherprogrammierbare Steuerungen – Von den Grundlagen der Prozessautomatisierung bis zur vertikalen Integration, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2003.
- [SGHV00] Spieckermann, S.; Gutenschwager, K.; Heinzl, H.; Voß, S.: Simulation-Based Optimization in the Automotive Industry: A Case Study on Body Shop Design, in: Simulation, 75. Jahrgang, Nr. 5, 2000, S. 276-286.
- [Spur94] Spur, G.: Fabrikbetrieb, Das System Planung – Steuerung – Organisation – Information – Qualität – Die Menschen, Fachbuchverlag Leipzig, 1994.
- [Stet06] Stetter, R.: Simulationsansätze und virtuelle Inbetriebnahme, in: Seminarberichte iwB, Nr. 84: Virtuelle Inbetriebnahme – Von der Kür zur Pflicht?, Herbert Utz Verlag, 2006.
- [Stie99] Stiegler, G.: Produktionsplanung und Produktionssysteme im Fahrzeugbau, Manz Verlag Schulbuch GmbH, Wien, 1999.
- [StUI97] Strohm, O.; Ulich, E.: Unternehmen arbeitspsychologisch bewerten – Ein Mehr-Ebenen-Ansatz unter besonderer Berücksichtigung von Mensch, Technik und Organisation, vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich, 1997.
- [TeKu92] Tempelmeier, H.; Kuhn, H.: Flexible Fertigungssysteme, Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [Vajn05] Vajna, S.: Informationsmanagement – Management der produkt- und prozessbezogenen Information in der integrierten Produktentwicklung, in: Handbuch der Produktentwicklung, Carl Hanser Verlag, München, 2005, S. 419-448.
- [VDA04] VDA: Auto Jahresbericht 2004, Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA), Frankfurt, 2004.
- [Wall01] Wallmüller, E.: Software-Qualitätsmanagement in der Praxis, Carl Hanser Verlag, München, 2001.
- [Webe02] Weber, K.-H.: Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen, 2. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002.

- [WeBK03] Westkämper, E.; Bierschenk, S.; Kuhlmann, T.: Digitale Fabrik – nur was für die Großen?, in: wt Werkstattstechnik 93 (2003) H. 1/2, S. 22-26.
- [Wemh05] Wemhöner, N.: Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau, Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2005.
- [West05] Westkämper, E.: Mächtige Hilfsmittel stehen bereit, in: Intelligenter produzieren, VDMA Verlag GmbH, 2005/1, S. 11-13.
- [Whit04] Whitney, D. E.: Mechanical Assemblies – Their Design, Manufacture, and Role in Product Development, Oxford University Press, 2004.
- [Wien97] Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure, 4. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 1997.
- [WiHH02] Wiendahl, H.-P.; Harms, T.; Heger, C.: Kontextsensitiver Einsatz von Virtual Reality im Rahmen der Digitalen Fabrik, Tagungsband zum 1. Paderborner Workshop Augmented Reality und Virtual Reality in der Produktentstehung, HNI-Verlagsschriftreihe, Bd. 107, Paderborn, 2002.
- [WiHW02] Wiendahl, H.-P.; Hegenscheidt, M.; Winkler, H.: Anlaufrobuste Produktionssysteme, in: wt Werkstattstechnik 92 (2002) H. 11/12, S. 650-655.
- [WiVo04] Witsch, D.; Vogel-Heuser, B.: Automatische Codegenerierung aus der UML für die IEC 61131-3, Fachtagung der GI-Fachgruppe REAL-TIME Echtzeitsysteme und PEARL, Boppard, 2004, S. 9-18.
- [Wöhe96] Wöhe, G.: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 19. Auflage, Vahlen Verlag, München, 1996.
- [Wöhl04] Wöhlke, G.: Digitale Fabrik bei DaimlerChrysler – Zusammenspiel von digitaler Planung und Entwicklung, Vortrag im Rahmen des 2. Symposiums „Digitale Fabrik“, Leipzig, 2004.
- [Woll05] Wollert, J. F.: Softwaretrends in der Automatisierungstechnik, in: etz – Elektrotechnik und Automation, Sonderausgabe S2/2005, S. 74-79.
- [Wutt00] Wuttke, C. C.: Mehrfachnutzung von Simulationsmodellen in der Produktionslogistik, Dissertation am Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM der Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2000.

- [ZäGW05] Zäh, M. F.; Grätz, F.; Wünsch, G.: Entwicklung mechatronischer Produktionssysteme, in: Seminarberichte iwB, Nr. 78: Mechatronik, Herbert Utz Verlag, 2005.
- [ZäWü05] Zäh, M. F.; Wünsch, G.: Schnelle Inbetriebnahme von Produktionssystemen, in: wt Werkstattstechnik 95 (2005) H. 9, S. 699-704.
- [Zenn06] Zenner, C.: Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung, Dissertation am Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM der Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2006.
- [Zeug98] Zeugträger, K.: Anlaufmanagement für Großanlagen, Dissertation am Institut für Fabrikanlagen (IFA) an der Universität Hannover, Hannover, 1998.
- [ZVWM04] Zäh, M. F.; Vogl, W.; Wünsch, G.; Munzert, U.: Virtuelle Inbetriebnahme im Regelkreis des Fabriklebenszyklus', in: Seminarberichte iwB, Nr. 74: Virtuelle Produktionssystemplanung, Herbert Utz Verlag, 2004.
- [ZwBa05] Zwemer, D.; Bajaj, M.: Standards-based Engineering Framework for Next Generation PLM, Proceedings of the 7th NASA-ESA Workshop on Product Data Exchange (PDE), Atlanta, USA, 2005.

Normen und Richtlinien

- [DIN19226] DIN 19226: Regelungstechnik und Steuerungstechnik, Teil 1: Allgemeine Grundbegriffe, 1994.
- [DIN19246] DIN 19246: Messen, Steuern, Regeln; Abwicklung von Projekten; Begriffe, 1991.
- [DIN199] DIN 199: Technische Produktdokumentationen – CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten, Teil 1: Begriffe, 2002.
- [IEC61131-3] IEC: IEC 61131-3 Speicherprogrammierbare Steuerungen, Teil 3: Programmiersprachen, Deutsche Fassung, 2003.
- [VDI2206] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2206, Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, Beuth Verlag, Berlin, 2004.
- [VDI2218] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2218, Feature-Technologie, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999.

- [VDI2219] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2219, Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Einführung und Wirtschaftlichkeit von EDM/PDM-Systemen, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002.
- [VDI2221] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2221, Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Beuth Verlag, Berlin, 1993.
- [VDI2223] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2223, Methodisches Entwerfen technischer Produkte, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004.
- [VDI2247] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2247, Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- [VDI2422] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2422, Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik, Beuth Verlag, Berlin, 1994.
- [VDI3600] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3600, Prozesse und Prozessorientierung in der Produktionslogistik am Beispiel der Automobilindustrie, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.
- [VDI3633a] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3633, Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000.
- [VDI3633b] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3633, Blatt 8 (Entwurf): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Maschinennahe Simulation, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005.
- [VDI4499] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4499, Blatt 1: Digitale Fabrik – Grundlagen, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2006.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Auswirkungen des Faktors „Zeit“ auf die Gesamtrentabilität nach [Puhr90] ..	2
Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit	6
Abbildung 2-1: Produktionsbezogene Eingliederung des Karosserierohbaus	8
Abbildung 2-2: Strukturierung eines Karosserierohbaus in der Automobilindustrie	9
Abbildung 2-3: 2D-Layout einer Fertigungszelle am Beispiel der Rohbaulinie Z2.1	11
Abbildung 2-4: Kosten- und Reifegradverläufe im Produktentstehungsprozess	13
Abbildung 2-5: Y-CIM-Modell nach [Sche97].....	15
Abbildung 2-6: Planungsphasen nach [Aggt87] (a) und [KeSG84] (b).....	17
Abbildung 2-7: SPS-Programmiersprachen nach IEC 61131-3.....	19
Abbildung 2-8: Wasserfallmodell nach [Same97]	21
Abbildung 2-9: Phasen und Eingliederung des Produktionsanlaufs nach [WiHW02]	23
Abbildung 2-10: Bedeutung der Steuerungstechnik bei der Inbetriebnahme nach [ZäWü05]	24
Abbildung 3-1: Die Digitale Fabrik als Schalenmodell	29
Abbildung 3-2: Fokus der Digitalen Fabrik nach [VDI4499].....	30
Abbildung 3-3: Ziel der Digitalen Fabrik: Beschleunigte Planungs- und Anlaufprozesse.....	32
Abbildung 3-4: 3D-orientierte Visualisierungs- und Simulationsmethoden auf Zellenebene .	38
Abbildung 3-5: Reality-Virtuality-Kontinuum nach [MTUK94]	41
Abbildung 3-6: Teilsysteme zur Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme.....	43
Abbildung 3-7: Einsatzmöglichkeiten von DELMIA Automation V5 nach [Schn06].....	46
Abbildung 3-8: Virtuelle Zelleninbetriebnahme mit WinMOD nach [Mewe05]	49
Abbildung 3-9: Unzureichende Integration zwischen den Planungsdomänen Mechanik und Steuerungstechnik	52
Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des werksbezogenen Produktionsablaufs.....	54
Abbildung 4-2: Vereinfachte Darstellung der Vorgaben für den Produktentstehungsprozess	55

Abbildung 4-3: Aufgaben und Abläufe in der Fertigungsplanung	57
Abbildung 4-4: Aufgaben und Abläufe in der Betriebsmittelkonstruktion.....	59
Abbildung 4-5: Aufgaben und Abläufe im Fachbereich Robotik/Simulation	60
Abbildung 4-6: Aufgaben und Abläufe in der Elektro-/Steuerungstechnik.....	61
Abbildung 4-7: Vereinfachte Darstellung des Planungsprozesses von Rohbau- Fertigungszellen.....	63
Abbildung 4-8: Informationsverluste an Prozessschnittstellen nach [BVDW04]	66
Abbildung 4-9: Kostenstruktur in der Steuerungstechnik nach [Hirz07]	67
Abbildung 4-10: IT-Infrastruktur zum unternehmensübergreifenden Datenaustausch	71
Abbildung 5-1: Mechatronikorientiertes Planungsvorgehen	77
Abbildung 5-2: Mechatronik – Funktionales Zusammenwirken verschiedener Disziplinen...	79
Abbildung 5-3: Aufbau mechatronischer Systeme nach [GaEK01]	81
Abbildung 5-4: V-Modell als Makrozyklus nach [VDI2206].....	83
Abbildung 5-5: Inhalte mechatronischer Ressourcenkomponenten.....	85
Abbildung 5-6: Aufbau und Strukturierung eines mechatronischen Ressourcenmodells.....	89
Abbildung 5-7: Heutige Dokumentationsformen zellenbezogener Prozessabläufe.....	90
Abbildung 5-8: Elemente des Prozessmodells	92
Abbildung 5-9: Beispiel eines interdisziplinären Prozessmodells	95
Abbildung 5-10: Wechselwirkungen im mechatronischen PPR-Datenmodell	97
Abbildung 5-11: Das PPR-Datenmodell als interdisziplinärer „Planungsmaster“	99
Abbildung 5-12: Virtuelle Inbetriebnahme als Übergang von der Digitalen in die reale Fabrik	102
Abbildung 5-13: Virtuelle Serienbetreuung im Regelkreis des Produktionslebenszyklus	104
Abbildung 6-1: IT-Unterstützung des integrierten Planungsansatzes.....	107
Abbildung 6-2: Informationstechnische Ausprägungen eines mechatronischen Spanners ...	109
Abbildung 6-3: Anpassen der spannerspezifischen Signalbezeichnungen	111
Abbildung 6-4: Automatisierte Generierung der Spanner-Ventil-Verschaltungen.....	111

Abbildung 6-5: Konfigurationsumgebung im DELMIA Process Engineer.....	113
Abbildung 6-6: Prozessbibliothek, Prozessmodell und Prozesseigenschaften im DPE.....	114
Abbildung 6-7: Automatisierte Erstellung von Signallisten und -zuweisungen.....	115
Abbildung 6-8: Planungsdaten zur automatisierten SPS-Programmgenerierung	116
Abbildung 6-9: Systemarchitektur zur Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme	118
Abbildung 6-10: Automatisierte Signalzuweisungen in DELMIA Automation V5 (Ausschnitt).....	119
Abbildung 7-1: Anwendungsszenario: MAG-Schweißzelle 6.....	121
Abbildung 7-2: Steuerungstechnische Integration der MAG-Schweißzelle 6.....	123
Abbildung 7-3: PPR-Datenmodell als Basis für SPS-Programmgenerierung und virtuelle Inbetriebnahme.....	125
Abbildung 8-1: Ganzheitliches MTO-Konzept nach [StU197]	130
Abbildung 8-2: Aufwandsreduzierung durch wieder verwendbare Ressourcenkomponenten	133
Abbildung 8-3: Vereinfachte Darstellung des mechatronikorientierten Planungsprozesses .	135
Abbildung 9-1: Auswirkungen des neuen Planungsansatzes auf den Produktionsentstehungsprozess	139

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Simulationsmethoden und ihre Anwendungsgebiete.....	37
Tabelle 3-2: Vergleich von Softwarelösungen zur Durchführung virtueller Zelleninbetriebnahmen.....	50
Tabelle 4-1: Methodische und informationstechnische Anforderungen	68
Tabelle 4-2: Vergleich der Ansätze zur automatisierten SPS-Programmgenerierung	75
Tabelle 6-1: Vergleich von IT-Systemen zur Verwaltung mechatronischer Komponenten..	110
Tabelle 6-2: Schnittstellen heute existierender SPS-Programmiersysteme	117
Tabelle 7-1: Matrix zur Anforderungs-Wirkungs-Analyse.....	128

Abkürzungsverzeichnis

AR	Augmented Reality (Erweiterte Realität)
AS	Ablaufsprache
AV	Augmented Virtuality (Erweiterte Virtualität)
AWL	Anweisungsliste
Bemi	Betriebsmittel
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAD	Computer Aided Design (Rechnerunterstütztes Konstruieren)
CAP	Computer Aided Planning (Rechnerunterstützte Planung)
CAX	Computer Aided X (Anything)
COM	Component Object Model
CPU	Central Processing Unit
CSV	Character/Comma/Colon Separated Values
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DFM	Design for Manufacturing
DL	Dienstleister
DMU	Digital Mock-Up
DPE	DELMIA Process Engineer
E/A	Ein-/Ausgangssignal (englisch: I/O)
E-CAD	Electrical CAD
EVA	Einlesen – Verarbeiten – Ausgeben
FBS	Funktionsbausteinsprache
GU	Generalunternehmer
HIL	Hardware-in-the-Loop
HMI	Human-Machine-Interface (Mensch-Maschine-Schnittstelle)

HW	Hardware
IBN	Inbetriebnahme
IEC	International Electrotechnical Commission
IT	Informationstechnologie
KMU	Klein- und mittelständische Unternehmen
KOP	Kontaktplan
LKW	Lastkraftwagen
MBOM	Manufacturing Bill of Material (Fertigungsstückliste)
M-CAD	Mechanical CAD
MR	Mixed Reality (Gemischte Realität)
MS	Microsoft
MTM	Mean Time Measurement
MTO	Mensch – Technik – Organisation
NC	Numerical Control
OEM	Original Equipment Manufacturer (Automobilhersteller)
OLP	Offline-Programmierung
OMB	Open Manufacturing Backbone
OPC	Object Linking and Embedding for Process Control
PA	Produktionsanlauf
PDM	Produktdatenmanagement (Product Data Management)
PKW	Personenkraftwagen
PLC	Programmable Logic Controller
PLS	Produktionsleitsystem
PPG	Produktionsgerechte Produktgestaltung
PPR	Produkt – Prozess – Ressource
PPS	Produktionsplanung und -steuerung

RAM	Random Access Memory
RC	Robot Control
RDF	Resource Description Framework
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung e.V.
RM	Referenzmodell
RRS	Realistic Robot Simulation (Realistische Robotersimulation)
SE	Simultaneous Engineering
SFK	Spann- und Fixierkonzept
SIPN	Steuerungstechnisch interpretierte/interpretierbare Petrinetze
SOP	Start of Production
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
ST	Strukturierter Text
STEP	– Standard for the Exchange of Product Data – SPS-Programmierungsumgebung der Firma Siemens
SW	Software
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
UGS	Unigraphics Solutions
UML	Unified Modeling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme
VR	Virtual Reality (Virtuelle Realität)
VRML	Virtual Reality Modeling Language
XML	Extensible Markup Language
ZB	Zusammenbau

Anhang A IT-gestützte Ressourcenplanung

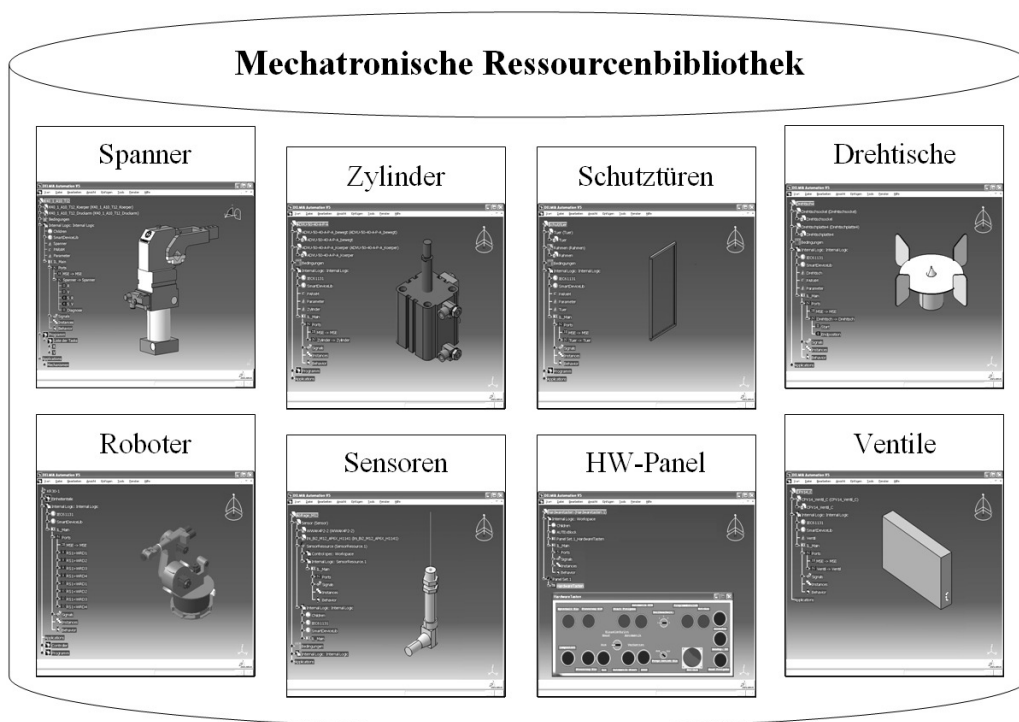


Abbildung A-1: „Mechatronisierte“ Ressourcenkomponenten (Gesamtübersicht)

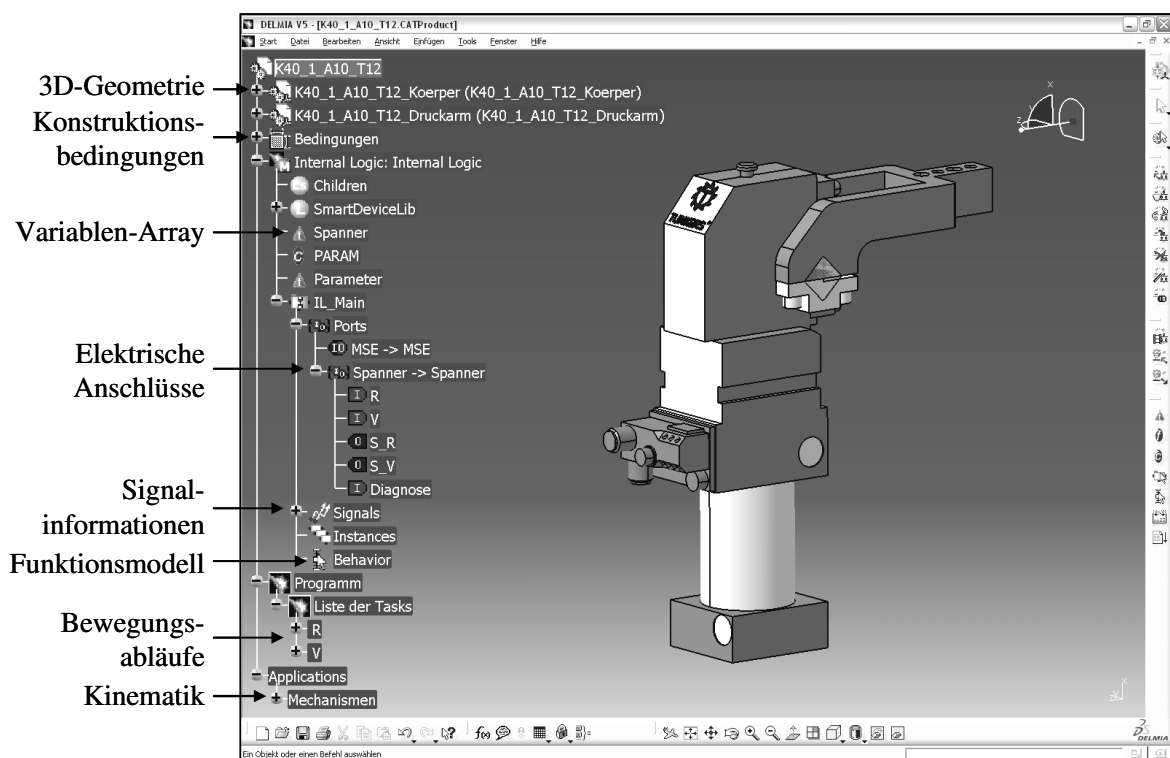


Abbildung A-2: Gesamtstruktur eines mechatronischen Spanners

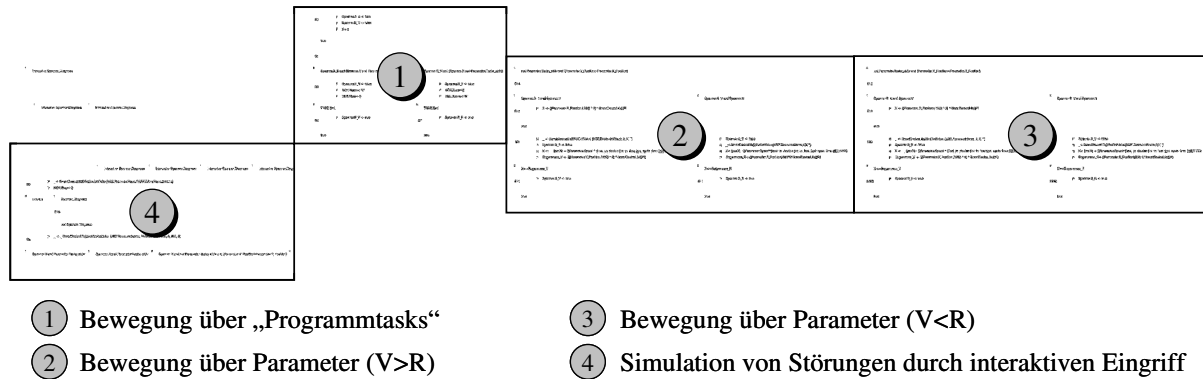


Abbildung A-3: Funktionsmodell eines mechatronischen Spanners (Gesamtübersicht)

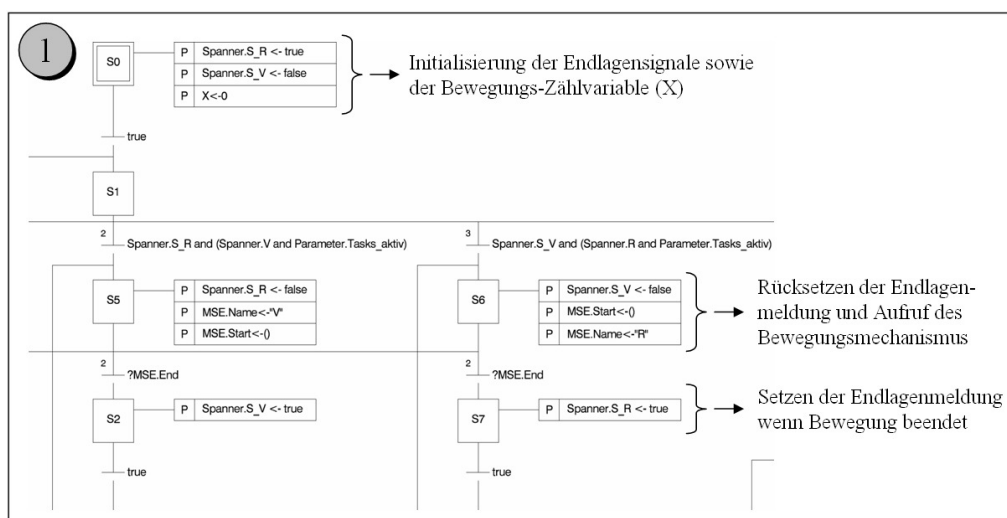


Abbildung A-4: Funktionsmodell eines mechatronischen Spanners (Ausschnitt 1)

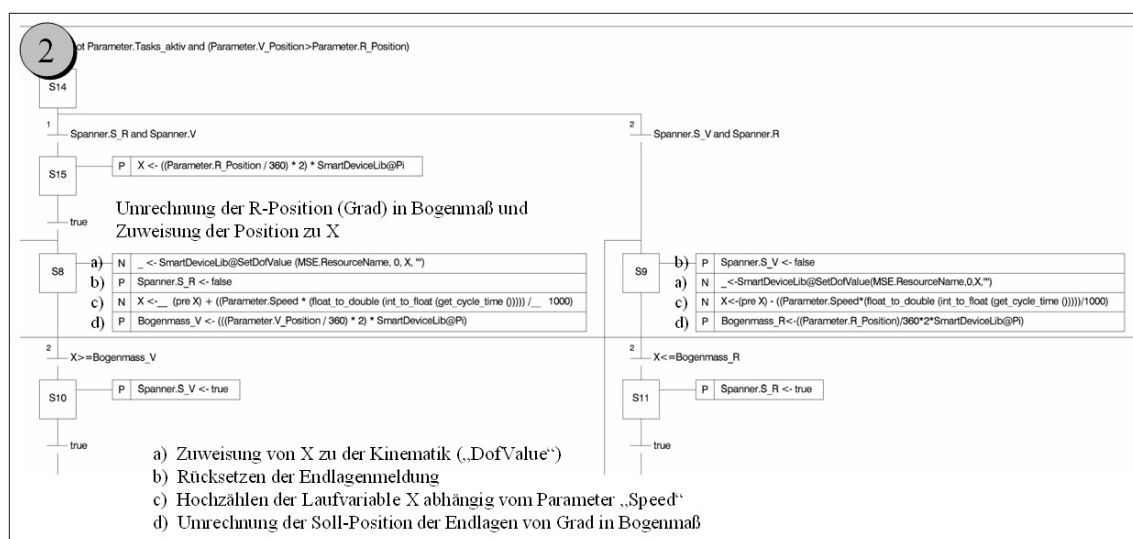


Abbildung A-5: Funktionsmodell eines mechatronischen Spanners (Ausschnitt 2)

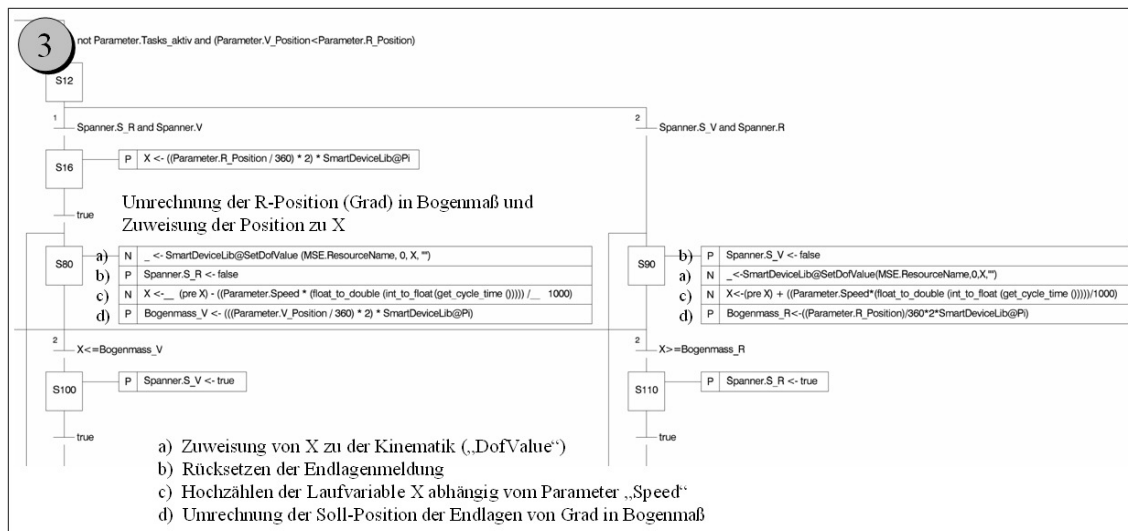


Abbildung A-6: Funktionsmodell eines mechatronischen Spanners (Ausschnitt 3)

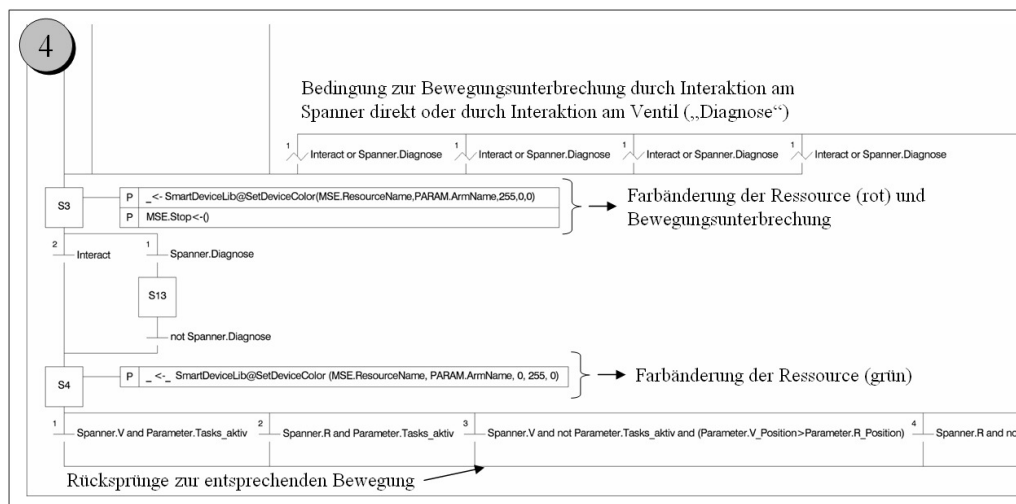


Abbildung A-7: Funktionsmodell eines mechatronischen Spanners (Ausschnitt 4)

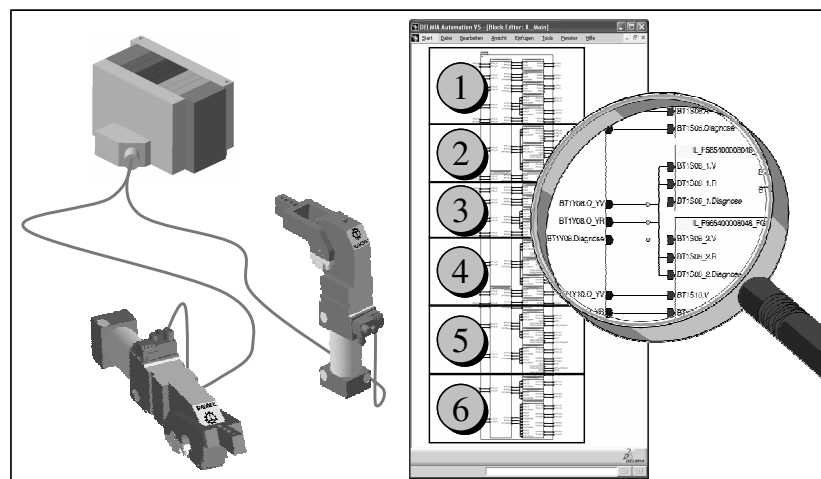


Abbildung A-8: Spanner-Ventil-Verschaltungen der MAG-Schweißzelle 6 (Gesamtübersicht)

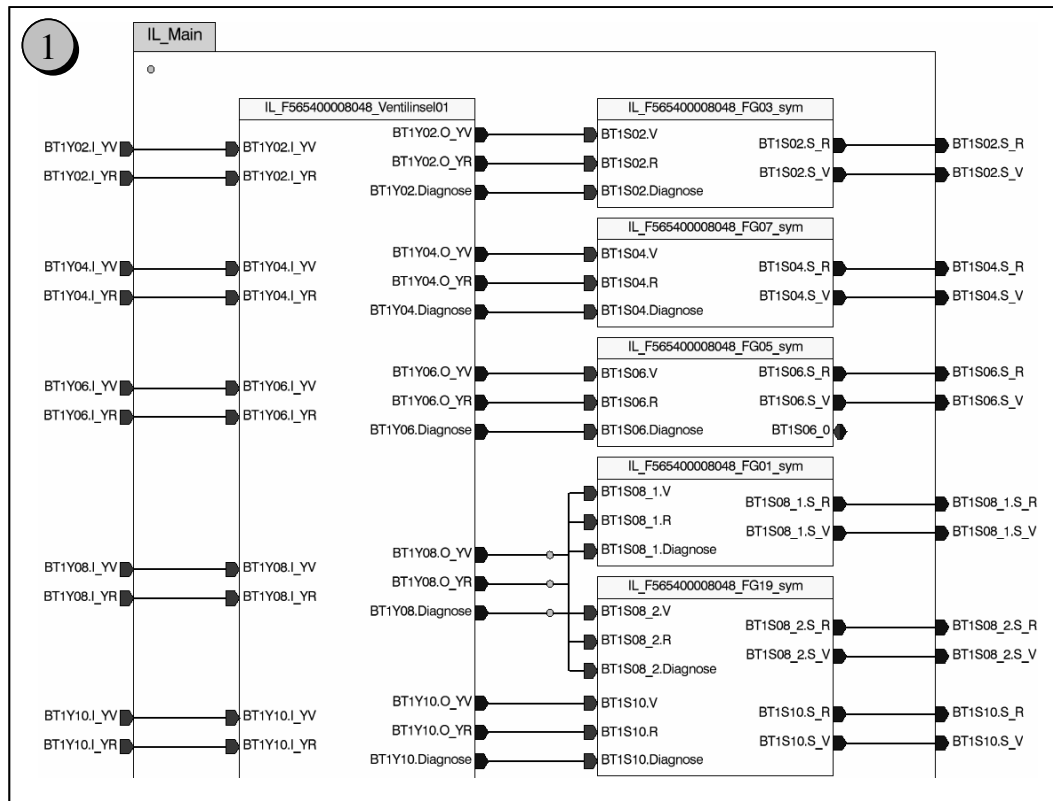


Abbildung A-9: Spanner-Ventil-Verschaltungen der MAG-Schweißzelle 6 (Ausschnitt 1)

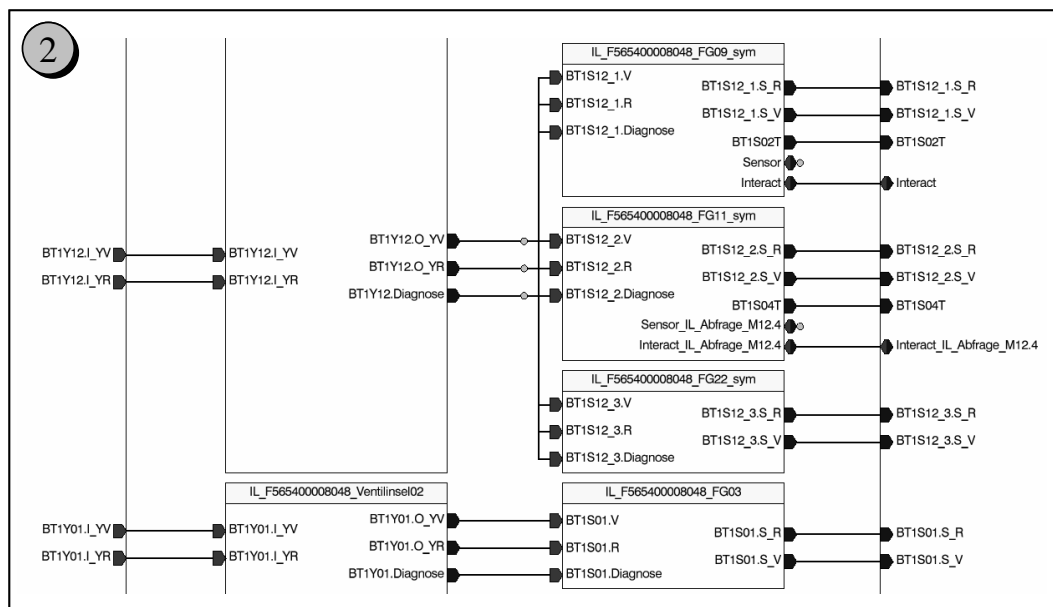


Abbildung A-10: Spanner-Ventil-Verschaltungen der MAG-Schweißzelle 6 (Ausschnitt 2)

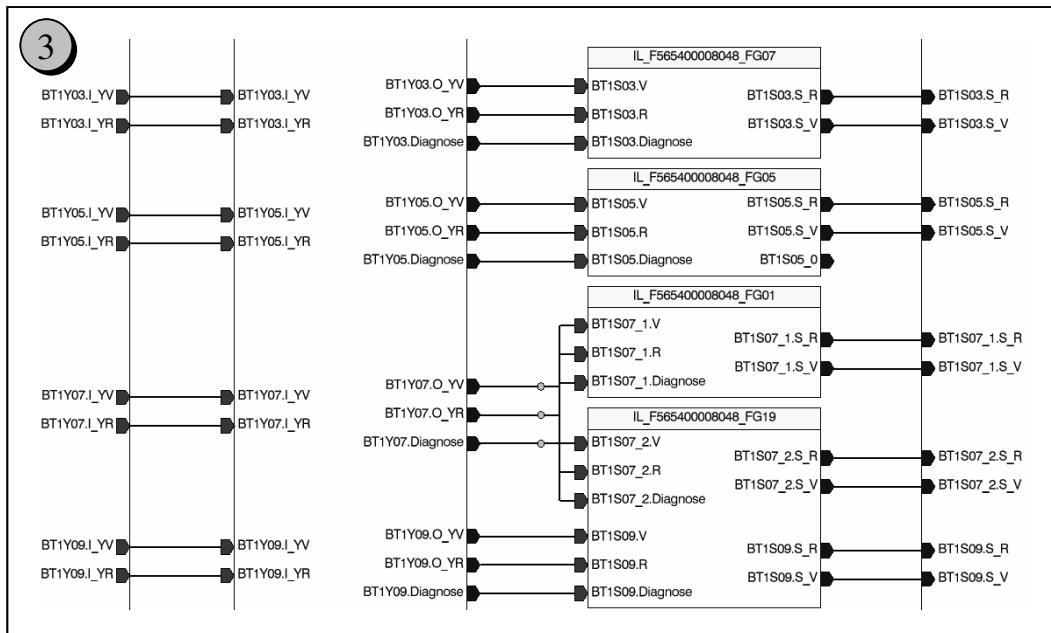


Abbildung A-11: Spanner-Ventil-Verschaltungen der MAG-Schweißzelle 6 (Ausschnitt 3)

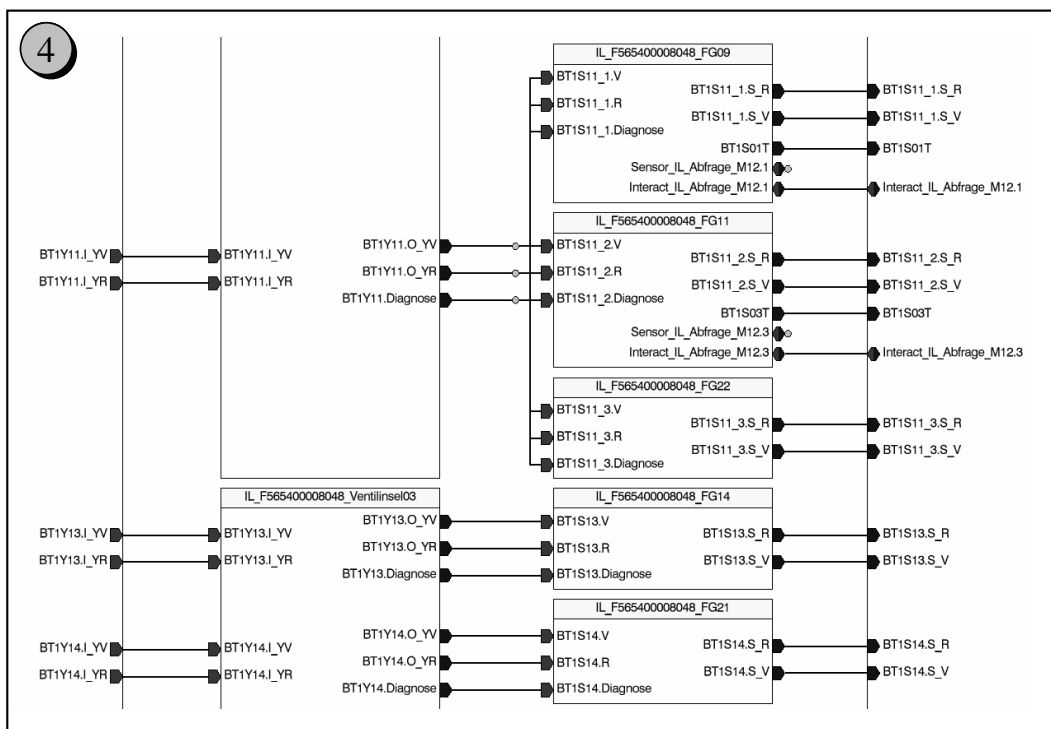


Abbildung A-12: Spanner-Ventil-Verschaltungen der MAG-Schweißzelle 6 (Ausschnitt 4)

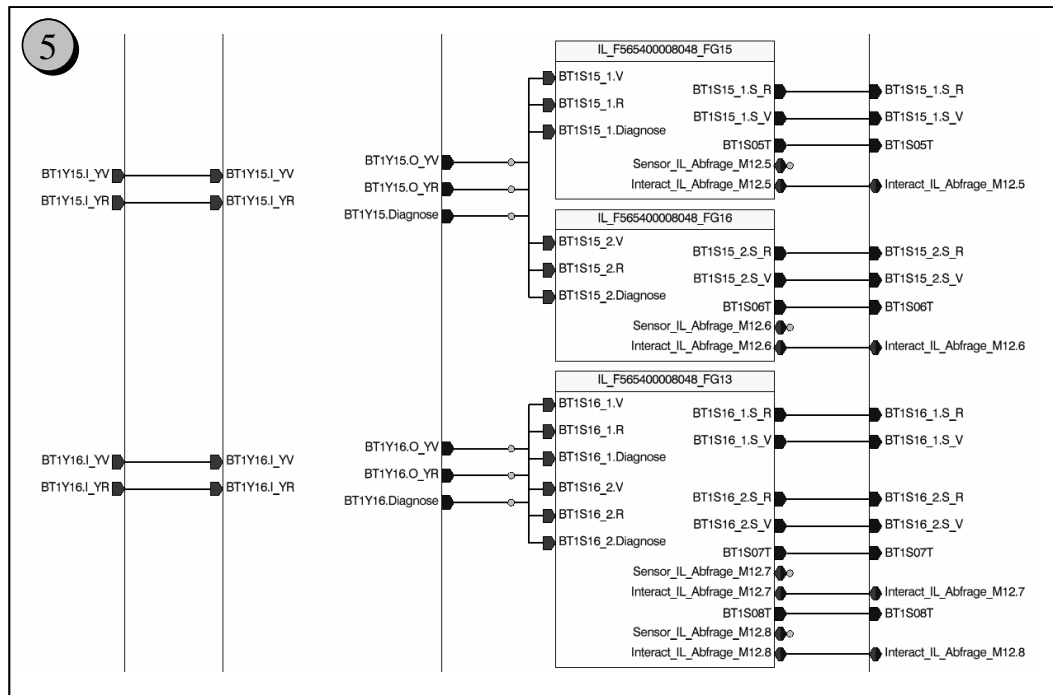


Abbildung A-13: Spanner-Ventil-Verschaltungen der MAG-Schweißzelle 6 (Ausschnitt 5)

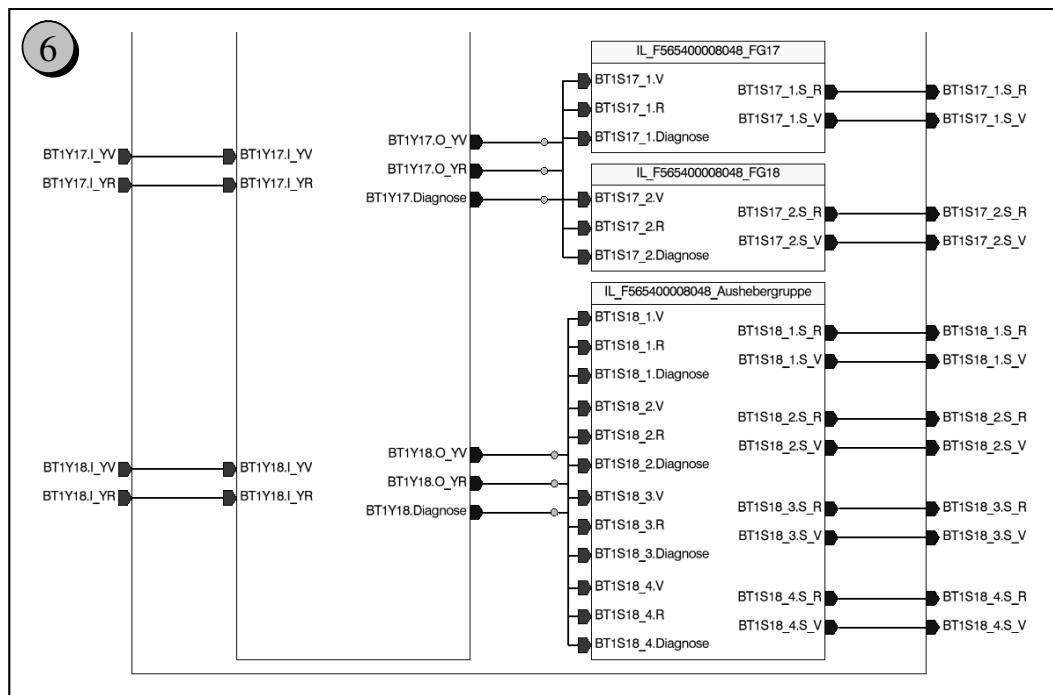


Abbildung A-14: Spanner-Ventil-Verschaltungen der MAG-Schweißzelle 6 (Ausschnitt 6)

Anhang B IT-gestützte Prozessmodellierung

Technische Prozesselemente	Aktivitäten	Name	Icon	Beispiel
		Beladen		Teil einlegen (Werker, Roboter)
		Entladen		Teil entnehmen (Werker, Roboter)
		Klemmen/Spannen		Ventil XY in V-Stellung
		Lösen/Entspannen		Ventil XY in R-Stellung
		Punktschweißen		Schweißpunkt setzen
		Transportieren		Drehtisch in 180°-Position
		Kommunizieren		Signalaustausch zwischen SPS und Roboter
		Prüfen manuell		Sichtprüfung durch Werker
		Prüfen autom. (optisch)		Teileerkennung durch Kamera
		Prüfen autom. (kap./ind.)		Teileerkennung durch Sensoren
Verknüpfungselemente	Transition			Weiterschaltbedingung zwischen Prozessen
	Alternativverknüpfung			Start oder Ende einer Alternativverzweigung
	Parallelverknüpfung			Start oder Ende einer Parallelverzweigung
	Sprung			Verknüpfung zweier SPS-Prozessabläufe

Abbildung B-1: Übersicht Prozesselemente (Auswahl)

Fenster mit erweiterten Eigenschaften

Balancing | Simulation | Analysis Lines | Notes | Version Information | Value Added | Effectivity | Steuerungstechnik | Leer

Startschritt
Startschritt ☐ Ja ☒ Nein

Steuerungsrelevanz
Steuerungsrelevanz ☒ Ja ☐ Nein

Überwachungszeit
Überwachungszeit 5 s

Steuerungsart
PLS ☐
RC ☐
SPS ☒
NC ☐

Steuerungsbeschreibung
Steuerungsidentifikation 57-416F-2
Kommentar Zellen-SPS 01

Aktionsblock 01
Aktiv ☒ Ja ☐ Nein
Aktionstyp ☒ BOOL ☐ Lupe
Name BT1Y07V
Bestimmungszeichen (Qualifier) N
Zeit (nur bei L, D, SD, DS, SL)
Hardwareadresse (nur bei BOOL) A 60.3
Kommentar Ventil 07 in V-Stellung

Beziehung >> OK Anwenden Abbrechen

Abbildung B-2: Aktivitäten – Eigenschaften Steuerungstechnik (Beispiel)

Fenster mit erweiterten Eigenschaften

Time | Balancing | Simulation | Analysis Lines | Notes | Version Information | Value Added | Effectivity | **Steuerungstechnik** | Leer

Steuerungsrelevanz
 Steuerungsrelevanz ☒ Ja
☐ Nein

Steuerungsart
 PLS ☐
 RC ☐
 NC ☐
 SPS ☒

Steuerungsbeschreibung
 Steuerungsidentifikation: S7-416F-2
 Kommentar: Zellen-SPS 01

Bitweise logische Funktion
 Bitweise logische Funktion ☒ AND
☐ NOT
☐ OR
☐ XOR

Variable 01
 Aktiv ☒ Ja
☐ Nein
 Name: BT1S07V1
 Negiert ☐ Ja
☒ Nein
 Hardwareadresse: E 60.0
 Kommentar: Spanner 07_1 in V-Stellung

Variable 02
 Aktiv ☒ Ja
☐ Nein
 Name: BT1S07V2
 Hardwareadresse: E 60.1
 Negiert ☐ Ja
☒ Nein
 Kommentar: Spanner 07_2 in V-Stellung

Beziehung >> OK Anwenden Abbrechen

Abbildung B-3: Transitionen – Eigenschaften Steuerungstechnik (Beispiel)

Fenster mit erweiterten Eigenschaften

Time | Balancing | Simulation | Analysis Lines | Notes | Version Information | Value Added | Effectivity | **Steuerungstechnik** | Leer

Steuerungsrelevanz
 Steuerungsrelevanz ☒ Ja
☐ Nein

Steuerungsart
 PLS ☐
 RC ☐
 SPS ☒
 NC ☐

Steuerungsbeschreibung
 Steuerungsidentifikation: S7-416F-2
 Kommentar: Zellen-SPS 01

Verknuepfungsbeschreibung
 Start-/Endknoten ☐ Ende
☒ Start
 Anzahl der Verzweigungen: 2
 Kommentar: Variantenauswahl A-B

Beziehung >> OK Anwenden Abbrechen

Abbildung B-4: Parallel-/Alternativverknüpfungen – Eigenschaften Steuerungstechnik (Beispiel)

Fenster mit erweiterten Eigenschaften

Time | Balancing | Simulation | Analysis Lines | Notes | Version Information | Value Added | Effectivity | **Steuerungstechnik** | Leer

Sprungziel
Sprungziel (Prozess) Initialschritt

Steuerungsrelevanz
☒ Ja
☐ Nein

Steuerungsart
PLS ☐
RC ☐
SPS ☒
NC ☐

Steuerungsbeschreibung
Steuerungsidentifikation S7-416F-2
Kommentar Zellen-SPS 01

Beziehung >> OK Anwenden Abbrechen

Abbildung B-5: Sprungprozess – Eigenschaften Steuerungstechnik (Beispiel)

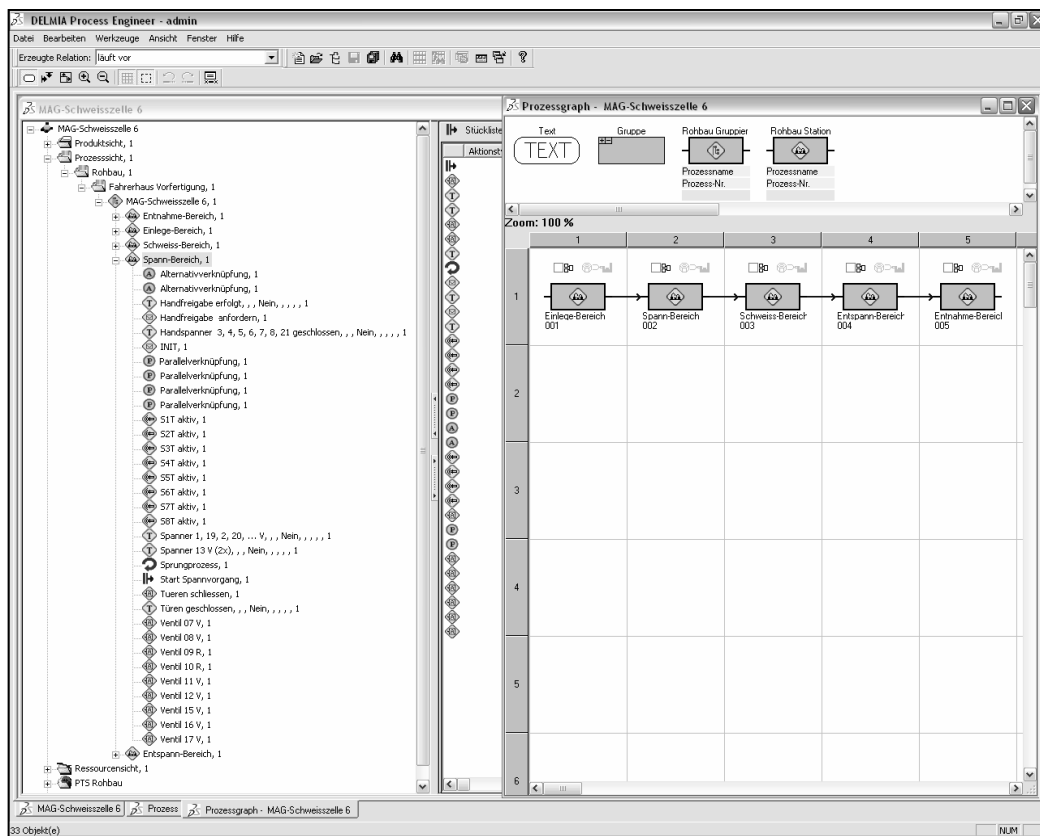


Abbildung B-6: Prozessmodell der MAG-Schweißzelle 6 (Gesamtübersicht)

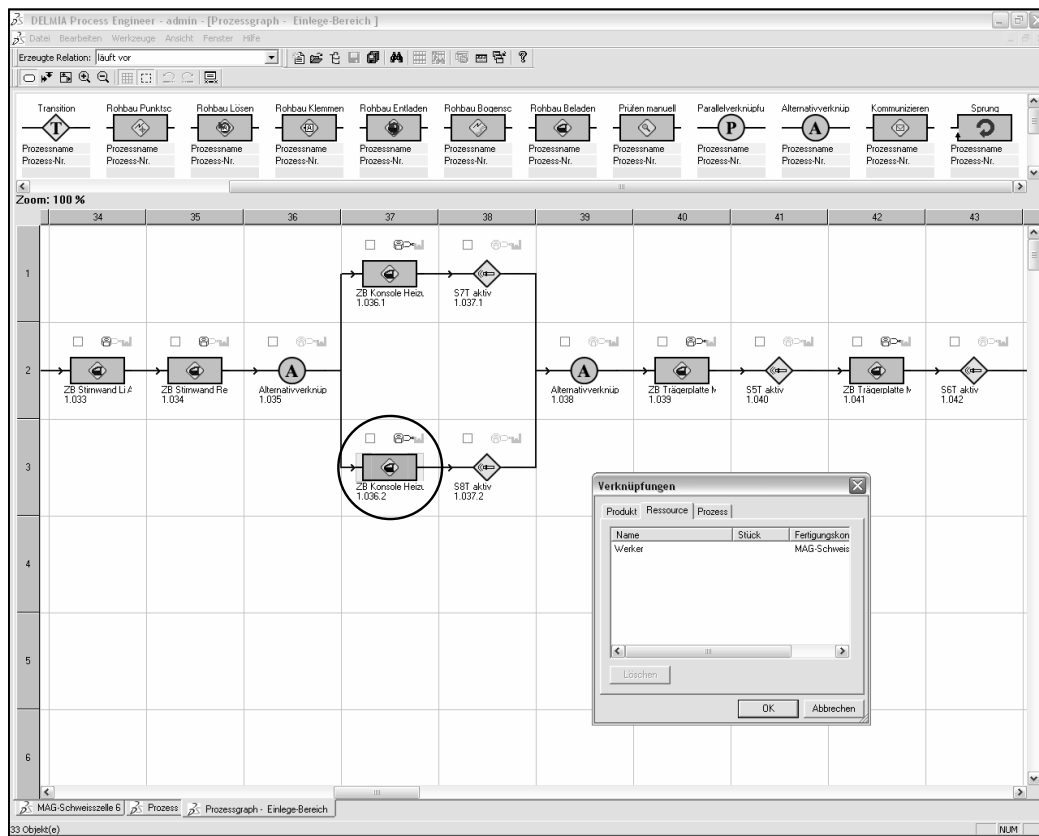


Abbildung B-7: Prozessmodell der MAG-Schweißzelle 6 (Einlegebereich)

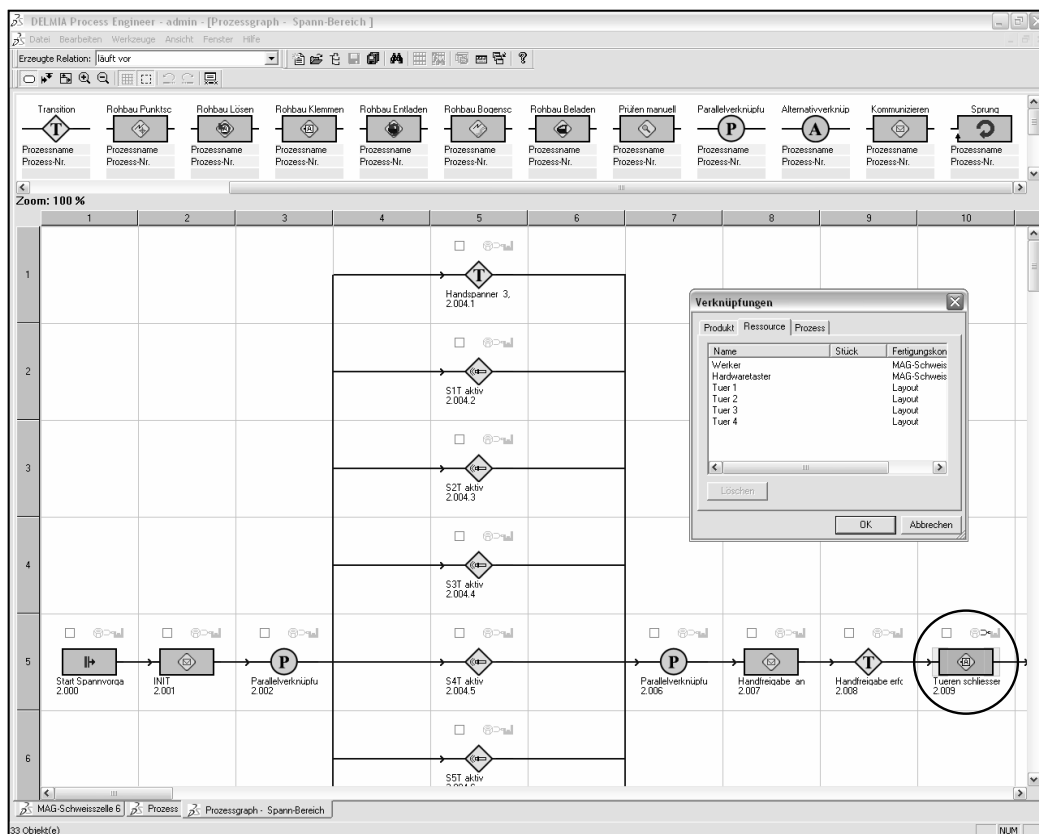


Abbildung B-8: Prozessmodell der MAG-Schweißzelle 6 (Spannbereich)

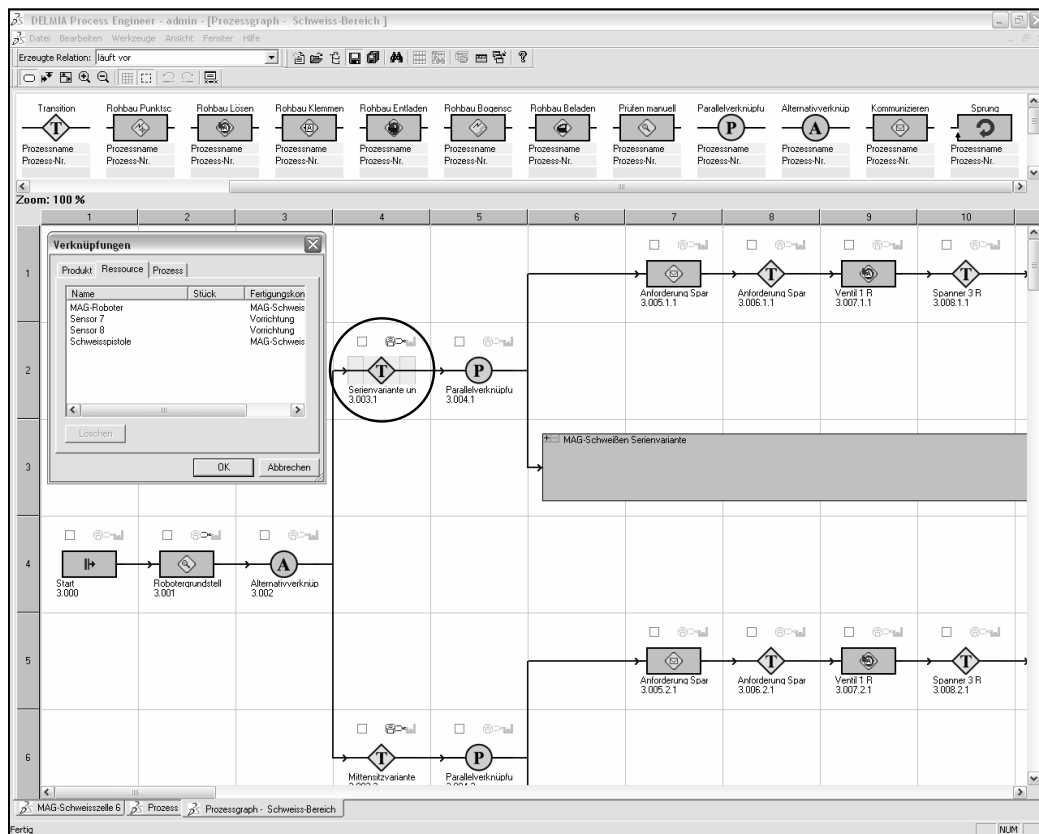


Abbildung B-9: Prozessmodell der MAG-Schweißzelle 6 (Schweißbereich)

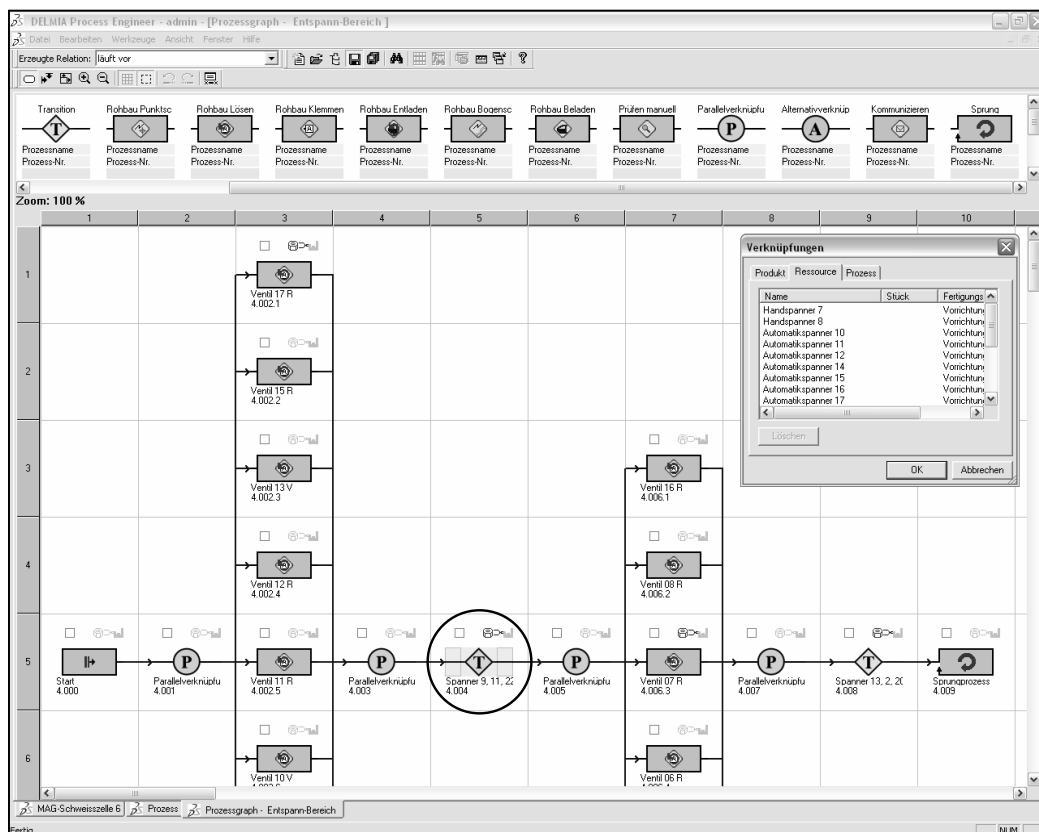


Abbildung B-10: Prozessmodell der MAG-Schweißzelle 6 (Entspannbereich)

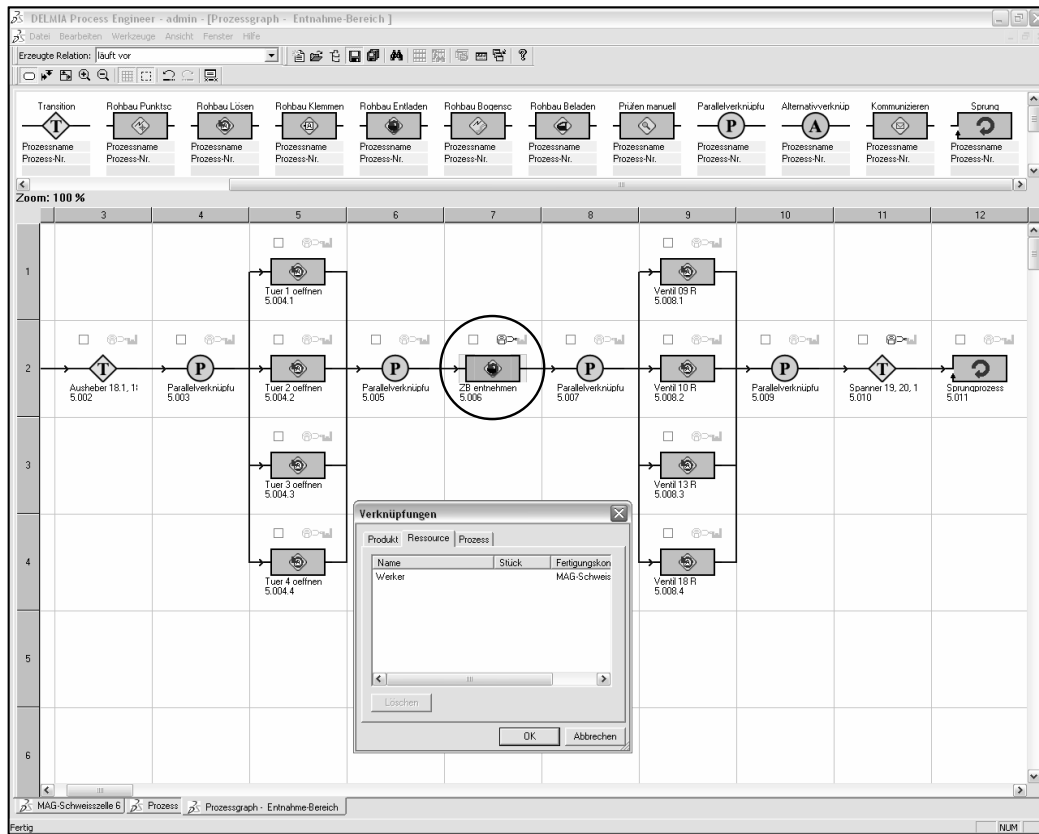
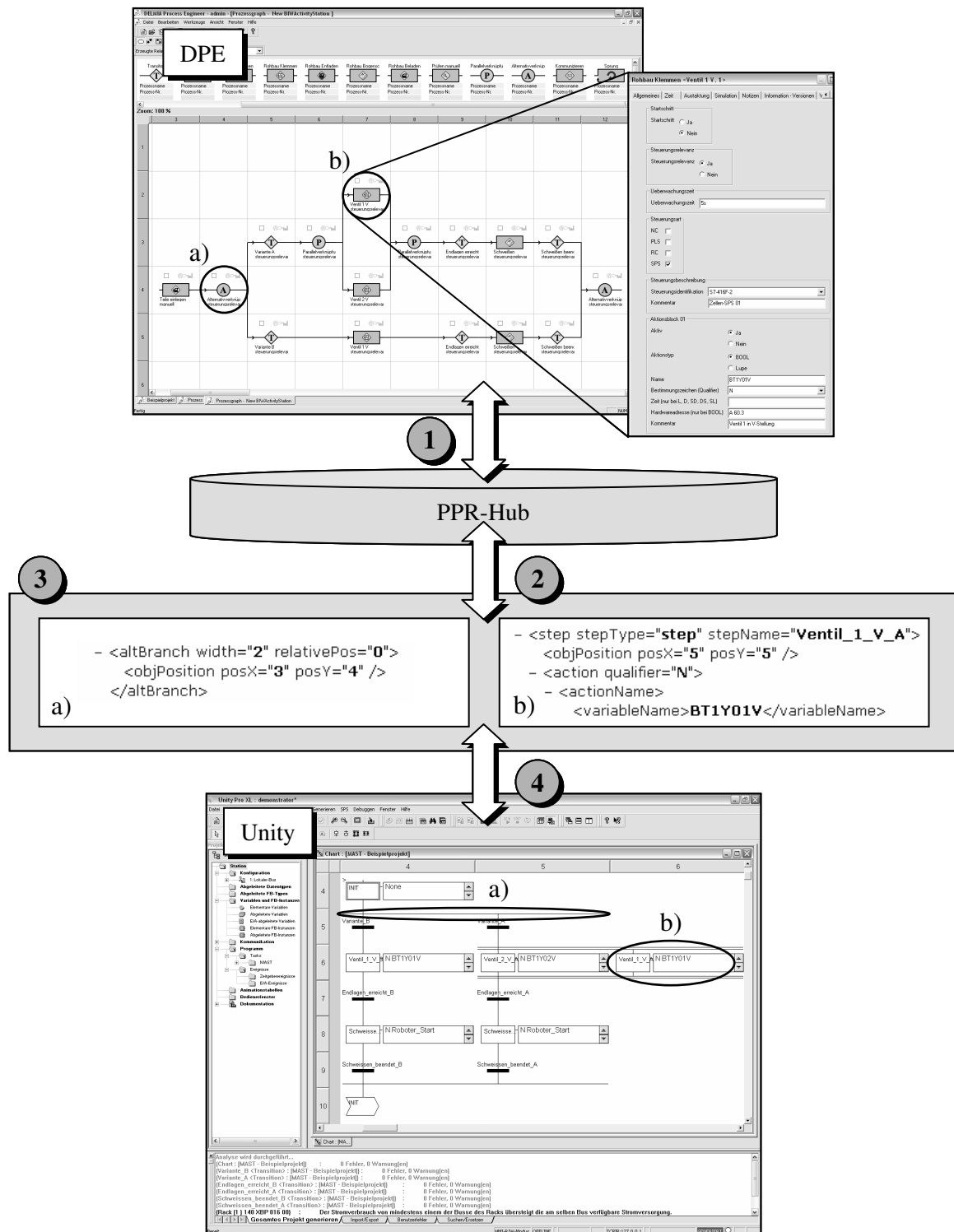


Abbildung B-11: Prozessmodell der MAG-Schweißzelle 6 (Entnahmebereich)

Anhang C IT-gestützte SPS-Programmgenerierung



- | | |
|--|------------------------------|
| ① DELMIA-spezifisches Datenformat (*.CATProcess) | ③ XML-Struktur (Ausschnitte) |
| ② Skript (für Datenimport und -export) | ④ Projektimport/-export |

Abbildung C-1: Automatisierte Generierung einer SPS-Schrittfolge mit DPE und Unity

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Jens Kiefer
Geburtsdatum: 16.06.1978
Geburtsort: Wadern
Familienstand: verheiratet seit dem 28.12.2006

Schulische Ausbildung

09/84 – 07/88 Grundschule Bardenbach
09/88 – 06/97 Hochwaldgymnasium Wadern mit Abschluss der
„Allgemeinen Hochschulreife“

Wehrdienst

09/97 – 07/98 Grundwehrdienst in der Luftlandemörserkompanie Saarlouis

Studium

10/98 – 12/00 Grundstudium der Konstruktions- und Fertigungstechnik
an der Universität des Saarlandes
01/01 – 12/03 Hauptstudium der Produktionstechnik an der Universität des Saarlandes,
Abschluss zum Diplom-Ingenieur am 11.12.2003

Berufliche Tätigkeit

04/99 – 04/03 Wissenschaftliche Hilfskraft am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD
an der Universität des Saarlandes
01/04 – 03/07 Industriepromotion am DaimlerChrysler Forschungszentrum Ulm in der
Abteilung „Integrierte Produkt- und Produktionsmodellierung“ (GR/EPP)
04/07 – dato Mitarbeiter am DaimlerChrysler Forschungszentrum Ulm in der Abteilung
„Integrierte Produkt- und Produktionsmodellierung“ (GR/EPP)

Universität des Saarlandes

Schriftenreihe Produktionstechnik
Herausgeber: H. Bley und C. Weber

ISSN 0945-6244

Verzeichnis der bisher erschienenen Bände (Stand: November 2007)

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

- Band 10** Müller, Andreas: *Leitlinie zur Problemdefinition bei der Entwicklung von komplexen Montagesystemen.*
ISBN 3-930429-39-X (1994)
- Band 11** Labisch, Susanna: *Untersuchung des Kaltpressens pulverförmiger Stoffe mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung der Trockenpressung von Sekundärkornmassen.*
ISBN 3-930429-40-3 (1995)
- Band 12** Schmidt, Jürgen: *Untersuchung zur Reinheit spanend bearbeiteter Oberflächen unter besonderer Berücksichtigung des erzeugenden Prozesses.*
ISBN 3-930429-41-1 (1996)
- Band 13** Cuber, Michael: *Entwicklung einer Strategie zur qualitätsgerechten Modellierung des Entwicklungs-/Konstruktionsprozesses.*
ISBN 3-930429-42-X (1996)
- Band 14** Avgoustinov, Nicolay: *Minimizing the Labour for Exchange of Product Definition Data Among N CAX-Systems.*
ISBN 3-930429-43-8 (1997)
- Band 15** Bär, Thomas: *Einsatz der Feature-Technologie für die Integration von Berechnungen in die frühen Phasen des Konstruktionsprozesses.*
ISBN 3-930429-44-6 (1998)
- Band 16** Seel, Uwe: *Robotergetriebene Zellenkalibrierung als Basis einer Feature-basierten Montageplanung.*
ISBN 3-930429-45-4 (1999)
- Band 17** Britten, Werner: *CAD-basierte Übersetzung geometrischer Toleranzen in vektorielle Darstellungen.*
ISBN 3-930429-46-2 (1999)
- Band 18** Jung, Dieter: *Praxis- und Prozessnahes Optimierungsmodell (PPO-Modell) zur systematischen, kontinuierlichen Verbesserung komplexer industrieller Prozesse.*
ISBN 3-930429-47-0 (2000)
- Band 19** Muth, Michael: *CAD-M(COMPUTER AIDED DESIGN using MULTIMEDIA)-Repräsentation und Nutzung von Konstruktionswissen in verteilten Entwicklungsumgebungen.*
ISBN 3-903429-48-9 (2000)
- Band 20** Wuttke, Claas Christian: *Mehrfachnutzung von Simulationsmodellen in der Produktionslogistik.*
ISBN 3-930429-49-7 (2000)

- Band 21** Oltermann, Ralf: *Systematik zur Abschätzung von Fertigungstoleranzen auf Grundlage einer Auswertung der laufenden Fertigung.*
ISBN 3-93042-50-0 (2000)
- Band 22** Werner, Horst: *Integration von CAX-Funktionalitäten in einem neuartigen Konstruktionssystem.*
ISBN 3-930429-51-9 (2001)
- Band 23** Behrning, Stefan: *Messungen von Belegungen durch Fertigungshilfsstoffe auf metallenen Werkstücken mittels mIR-Fasersonde.*
ISBN 3-930429-52-7 (2001)
- Band 24** Thome, Oliver: *Durchgängige Erfassung und Verarbeitung von Toleranzinformationen.*
ISBN 3-930429-53-5 (2001)
- Band 25** Junk, Stefan: *Inkrementelle Blechumformung mit CNC-Werkzeugmaschinen: Verfahrensgrenzen und Umformstrategien.*
ISBN 3-930429-54-3 (2003)
- Band 26** Braun, Peter: *Entwicklung einer Methodik zur Untersuchung des Einflusses von Kühlschmierstoffen auf das Härteverhalten von Einsatzstählen am Beispiel des Kühlschmierstoffs ARAL Sarol 470 EP und der Einsatzstähle C15, 16MnCr5, 9SMnPb28.*
ISBN 3-930429-55-1 (2003)
- Band 27** Rattay, Bernd: *Untersuchung der Einflußgrößen auf die Formfüllung und die Werkzeugbelastungen beim Prägen von Mikrokanalstrukturen in Metallische Bleche.*
ISBN 3-930429-56-X (2003)
- Band 28** Franke, Christina: *Feature-basierte Prozesskettenplanung in der Montage als Basis für die Integration von Simulationswerkzeugen in der Digitalen Fabrik.*
ISBN 3-930429-57-8 (2003)
- Band 29** 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems
ISBN 3-930429-58-6 (2003)
- Band 30** Korne, Thomas: *Fertigungsorientierte Analyse und Optimierung von Gruppenarbeit in der Automobil-Endmontage unter besonderer Berücksichtigung von Informationstechnologie und Digitaler Fabrik.*
ISBN 3-930429-59-4 (2004)
- Band 31** Fischer, Nikolaus: *Messungen geringster organischer Belegungen auf diffus reflektierenden Oberflächen mit einem mIR-faseroptischen Prüfkopf.*
ISBN: 3-930429-60-8 (2005)

- Band 32** Bernardi, Markus: *Gestaltung eines mechatronikorientierten Entwicklungsprozesses für mobile Arbeitsmaschinen und des dazugehörigen Entwicklungsumfeldes.*
ISBN 3-930429-61-6 (2005)
- Band 33** Ryu, Shi-Bok: *Development of a Microklystrode Vacuum Tube: A Focus on the Improvement of Modeling and Manufacturing Processes.*
ISBN 3-930429-62-4 (2005)
- Band 34** Vielhaber, Michael: *Zusammenbauorientiertes Konstruieren im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie am besonderen Beispiel des Karosserierohbaus.*
ISBN 3-930429-63-2 (2005)
- Band 35** Steinbach, Michael: *Systematische Gestaltung von Product-Service Systems.*
ISBN 3-930429-64-0 (2005)
- Band 36** Blumenau, Jean-Claude: *Lean Planning unter besonderer Berücksichtigung der Skalierung wandlungsfähiger Produktionssysteme.*
ISBN 3-930429-65-9 (2006)
- Band 37** Zenner, Christian: *Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung.*
ISBN 3-930429-66-7 (2006)
- Band 38** Bossmann, Marc: *Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung.*
ISBN 978-3-930429-67-7 (2007)
- Band 39** Deubel, Till: *Anforderungs-, Kosten- und wertgetriebene Steuerung des Produktentwicklungsprozesses.*
ISBN 978-3-930429-68-4 (2007)
- Band 40** Oberhausen, Michael: *Der Einsatz laserinduzierter Fluoreszenzmessungen zu Detektion geringster organischer Belegungen auf Oberflächen.*
ISBN 978-3-930429-69-1 (2007)
- Band 41** Fritz, Jürgen Ulrich: *Zielführende Modellierung und Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der Digitalen Fabrik.*
ISBN 978-3-930429-70-7 (2007)
- Band 42** Müller, Marco: *Reifegradbasierte Optimierung von Entwicklungsprozessen am besonderen Beispiel der produktionsbezogenen Produktabsicherung in der Automobilindustrie.*
ISBN 978-3-930429-71-4 (2008)
- Band 43** Kiefer, Jens: *Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau.*
ISBN 978-3-930429-72-1 (2007)