





Lehrstuhl für  
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik  
der Technischen Universität München

## **Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme auto- matisierter Produktionssysteme**

Georg Wunsch

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Bender

Die Dissertation wurde am 18.09.2007 bei der Technischen Universität  
München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am  
07.12.2007 angenommen.



Georg Wünsch

**Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme  
automatisierter Produktionssysteme**



Herbert Utz Verlag · München

## **Forschungsberichte IWB**

Band 215

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2007

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2008

ISBN 978-3-8316-0795-2

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utz.de](http://www.utz.de)

# Geleitwort der Herausgeber

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

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

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

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

*Gunther Reinhart*

*Michael Zäh*





## Vorwort

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern des Instituts und meinen betreuenden Doktorvätern gilt mein besonderer Dank für die Förderung, die Unterstützung meiner Arbeit und ihre Hinweise und Anregungen.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Bender möchte ich mich für die Übernahme des Koreferats und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken. Ebenfalls gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Darüber hinaus bedanke ich mich recht herzlich bei allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des Instituts sowie allen Studenten, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Dabei möchte ich meine Kollegen Michael Ehrenstrasser, Clemens Pörnbacher, Ulrich Munzert, Thomas Hensel, Michael Spitzweg und Nils Müller hervorheben, deren fachliche Hinweise für mich sehr wertvoll waren. Ich möchte ihnen für die gemeinsame Projektarbeit danken, die als Grundlage in die Arbeit eingeflossen ist. Außerdem möchte ich mich bei meinen ehemaligen Studenten Erwin Smit Wiesner, Florian Hasieber, Michael Potuschnik, Florian Karl, Laura Krauch, Sebastian Ulrich, Klaudio Hegedusic, Wolfgang Aumer und Martin Henger bedanken, die mich durch konzeptionelle bzw. konstruktive Tätigkeiten sowie in der Programmierung und Modellbildung unterstützt haben. Mareike Isabelle Bähr, Nina Morawietz, Klaus-Dieter Wunsch, Veronika Wunsch und Beate Maria Freyer, die alle die Arbeit aus Ihrem Blickwinkel gelesen haben, gebührt mein aufrichtiger Dank.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, die mein ständiger Rückhalt im Leben ist. Meinen Eltern Klaus-Dieter und Veronika, sowie meinen Bruder Moritz und meiner Lebensgefährtin Beate Maria Freyer danke ich, dass sie mich stets uneingeschränkt unterstützt und gefördert haben.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>XV</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>XV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XVII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XVII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Handlungsbedarf.....	4
1.3 Ziel der Arbeit.....	6
1.4 Vorgehensweise und Gliederung .....	8
<b>2 Grundlagen .....</b>	<b>11</b>
2.1 Begriffsdefinition.....	11
2.1.1 Lebenszyklus von Produktionssystemen.....	11
2.1.2 Produktionsanlauf.....	12
2.1.3 Inbetriebnahme.....	12
2.1.4 Hochlauf .....	14
2.2 Qualitätssicherung in der Inbetriebnahme .....	14
2.2.1 Organisatorische Maßnahmen .....	14
2.2.2 Standardisierung.....	15
2.2.3 Vorabinbetriebnahme von Teilsystemen .....	20
2.2.4 Test von Steuerungssoftware.....	22
2.3 Steuerungstechnische Grundlagen .....	25
2.3.1 Virtuelle Zeitachse.....	25
2.3.2 Minimale Abtastrate .....	25

2.3.3	Echtzeitfähigkeit.....	26
<b>3</b>	<b>Stand der Technik .....</b>	<b>29</b>
3.1	Grundprinzip .....	29
3.2	Einordnung in die Digitale Fabrik .....	30
3.3	Begriffsabgrenzung.....	32
3.4	Untersuchte Merkmale.....	33
3.5	Ansätze mit virtueller Zeitachse.....	36
3.5.1	Osmers 1998 .....	36
3.5.2	Baudisch und Denkena 2001 .....	37
3.5.3	Dietrich 2002 .....	38
3.6	Echtzeitansätze auf Prozessebene.....	38
3.6.1	Meier und Kreuzsch 2000 .....	39
3.6.2	Bender et al. 1995-2003 .....	40
3.6.3	Scheifele und Röck 2004.....	42
3.7	Echtzeitansätze auf Maschinenebene .....	43
3.7.1	Qin 2005.....	43
3.7.2	Dierßen 2002.....	44
3.7.3	Hamm und Menzel 2004 .....	45
3.7.4	Mewes 2004 .....	46
3.7.5	Zäh et al. 2005.....	47
3.7.6	Spath und Landwehr 2000 .....	48
3.7.7	Min et al. 2002 .....	50
3.7.8	Tecnomatix 2003.....	50
3.7.9	Dassault Systèmes 2005.....	51
3.7.10	Rockwell Automation 2005 .....	52
3.7.11	Stetter 2005.....	53

---

3.7.12	Cuiper 2000 .....	54
3.8	Echtzeitansätze auf Zellen- und Anlagenebene.....	55
3.8.1	Freund 2000.....	55
3.8.2	Rücker 2005 .....	56
3.8.3	Milberg und Amann 1996 .....	57
3.8.4	Strassacker 1997.....	58
3.8.5	Heinrich und Wortmann 2004.....	59
3.8.6	Römberg 2004.....	60
3.8.7	Schlögl 2005.....	61
3.9	Zusammenfassung.....	62
<b>4</b>	<b>Einführung in eine Organisation .....</b>	<b>69</b>
4.1	Anforderungen .....	69
4.2	Einführungsfahrplan.....	70
4.3	Organisatorische Umsetzungsformen .....	75
<b>5</b>	<b>Wirtschaftliche Skalierung.....</b>	<b>79</b>
5.1	Bestimmung des Aufwands.....	79
5.2	Bestimmung des Nutzens.....	82
5.3	Entwickelte Methode.....	87
5.3.1	Klassifikation der Steuerungssysteme.....	89
5.3.2	Bildung von Automatisierungsgruppen .....	89
5.3.3	Bildung von Materialflussgruppen .....	90
5.3.4	Wirtschaftlichkeitsbewertung.....	91
<b>6</b>	<b>Technologien für die Modellbildung .....</b>	<b>93</b>
6.1	Anforderungen .....	93
6.2	Generische Funktionsstruktur .....	96
6.3	Ausprägungen.....	98

6.3.1	Automatisierungstechnik.....	98
6.3.2	Schnittstellen .....	99
6.3.3	Simulationssystem .....	101
6.3.4	Modell .....	106
6.3.5	Modellerstellungsprozess.....	115
6.3.6	Inbetriebnahmeprozess.....	130
6.4	Lösungsbaukasten .....	142
<b>7</b>	<b>Anwendung auf Projektbeispiele.....</b>	<b>143</b>
7.1	Werkzeugmaschine.....	143
7.1.1	Beschreibung .....	143
7.1.2	Steuerungs- und Automatisierungstechnik.....	144
7.1.3	Eingesetzte VIBN-Technologie .....	144
7.1.4	Umfang der durchgeführten VIBN .....	145
7.1.5	Qualitative Aufwand-Nutzenbewertung.....	146
7.2	Komplexe Großanlage .....	147
7.2.1	Beschreibung .....	147
7.2.2	Steuerungs- und Automatisierungstechnik.....	148
7.2.3	VIBN-Technologiekonzept.....	150
7.2.4	Umfang der VIBN.....	151
7.2.5	Qualitative Aufwand-Nutzen-Bewertung .....	152
7.3	Sondermaschinenbau .....	152
7.3.1	Beschreibung .....	153
7.3.2	Steuerungs- und Automatisierungstechnik.....	154
7.3.3	Eingesetzte VIBN-Technologie .....	155
7.3.4	Umfang der durchgeführten VIBN .....	156
7.3.5	Qualitative Aufwand-Nutzen-Bewertung .....	156

---

7.4	Umsetzer in der Endmontage .....	159
7.4.1	Beschreibung .....	159
7.4.2	Steuerungs- und Automatisierungstechnik.....	161
7.4.3	Eingesetzte VIBN-Technologie .....	161
7.4.4	Umfang der durchgeführten VIBN .....	162
7.4.5	Qualitative Aufwand-Nutzen-Bewertung.....	162
7.5	Zusammenfassende Bewertung .....	163
<b>8</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>165</b>
8.1	Zusammenfassung.....	165
8.2	Ausblick .....	168
<b>9</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>171</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>187</b>
10.1	Lösungsbaukasten für die VIBN Teil 1 von 4 .....	188
10.2	Lösungsbaukasten für die VIBN Teil 2 von 4.....	189
10.3	Lösungsbaukasten für die VIBN Teil 3 von 4.....	190
10.4	Lösungsbaukasten für die VIBN Teil 4 von 4.....	191
10.5	Genannte Firmen.....	192
10.6	Genutzte Software .....	193





---

## Symbolverzeichnis

<b>Größe</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
$a$	€	Proportionalitätskonstante für den Aufwand
$\underline{A}_{Grenz}$	1	Spezifischer Aufwand an der Komplexitätsgrenze
$A_i$	€	Aufwand
$\underline{A}_i$	1	Spezifischer Aufwand
$\underline{A}_{Referenz}$ ( $\underline{A}_{Ref.}$ )	1	Spezifischer Aufwand eines Referenzprojektes
$B_i$	%	Bedeutung des Subsystems für die IBN des Gesamtsystems
$G_i$	€	Projektgröße
$K_i$	1	Komplexität
$n$	1	Proportionalitätskonstante für den Nutzen
$N_i$	€	Nutzen
$\underline{N}_i$	1	Spezifischer Nutzen
$\underline{N}_{Referenz}$	1	Spezifischer Nutzen eines Referenzprojektes
$r$	1/€	Rentabilitätskoeffizient
$R_i$	1	Absolute Rentabilität eines VIBN-Projektes
$\underline{R}_i$	1	Spezifische Rentabilität eines VIBN-Projektes
$S_i$	%	Anteil der Steuerungstechnik an der Gesamtfunktionalität eines Subsystems
$Z_{E/A,i}$	1	Zahl der abzubildenden Ein- und Ausgänge
$Z_{M,i}$	1	Zahl der abzubildenden Materialflussbewegungen
$Z_{P,i}$	1	Zahl der abzubildenden Fertigungs- und Montageprozesse
<b>Index</b>	<b>Bedeutung</b>	
$E/A$	Ein- und Ausgänge der Steuerungsperipherie	
$Grenz$	Die indizierte Größe stellt einen Grenzwert dar.	
$i$	Die indizierte Größe wird auf das Subsystem bzw. VIBN-Projekt $i$ bezogen.	
$M$	Materialfluss	
$P$	Prozess	
$Referenz$ ( $Ref.$ )	Die Indizierte Größe gehört zu einem Referenzprojekt.	



---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zeitanteile bei der Inbetriebnahme (Quelle: VDW 1997) ...	2
Abbildung 2:	Zeitlicher Verlauf der Anteile von Mechanik, Elektronik und Software am Entwicklungsaufwand (Quelle: KOHEN 1990, S. 265, RAITH & AMMAN 1992, GLAS 1993) .....	2
Abbildung 3:	Lebenszyklus eines Produktionssystems in Anlehnung an Wiendahl (WIENDAHL et al. 2002, S. 651) .....	11
Abbildung 4:	Zusammenstellung von Projekten aus einer Bibliothek mit Standards .....	16
Abbildung 5:	Teilautomatisierte Ableitung von Entwicklungsunterlagen und der Steuerungsprogramme mittels einer mechatronischen Standardbibliothek .....	20
Abbildung 6:	Verlagerung von Inbetriebnahmetätigkeiten in die Entwicklung, die Fertigung und die Montage .....	21
Abbildung 7:	Betrachtung der Abtastrate bei der Erfassung von Steuerungsreaktionen .....	26
Abbildung 8:	Grundidee der virtuellen Inbetriebnahme nach Wünsch & Zäh 2005 .....	29
Abbildung 9:	Virtuelle Inbetriebnahme als schnelle Rückkopplung im Regelkreis der Digitalen Fabrik nach ZÄH & REINHART (2004) .....	31
Abbildung 10:	Matrix des Standes der Technik .....	63
Abbildung 11:	Portfolio ausgewählter Ansätze der virtuellen Inbetriebnahme .....	65
Abbildung 12:	Einführungsfahrplan für eine wirksame virtuelle Inbetriebnahme .....	71
Abbildung 13:	Sicherung der Inbetriebnahme-Erfahrung durch gezielte Einführung von Übergabegesprächen .....	72
Abbildung 14:	Organisatorische Eingliederung einer Virtuelle-Inbetriebnahme-Abteilung nach ZÄH & REINHART (2004b)	76
Abbildung 15:	Vergleich des Vorgehens bei der Maschinenentwicklung mit und ohne virtueller Inbetriebnahme .....	78
Abbildung 16:	Elemente eines Subsystems <b>i</b> mit den Messgrößen „Zahl der Ein- und Ausgänge“ $Z_{E/A,i}$ , „Zahl der Prozesse“ $Z_{P,i}$ und	

	„Zahl der Materialflussverbindungen“ $Z_{M,i}$ für die Bestimmung des Aufwands $A_i$ bei der VIBN: Steuerung und Modell mit Peripherieverhalten sowie Prozess- und Materialflussverhalten .....	81
Abbildung 17:	Qualitätssteigerung durch virtuelle Inbetriebnahme einer Beispielanlage (ZÄH et al. 2006a) .....	83
Abbildung 18:	Zeitgewinn durch virtuelle Inbetriebnahme einer Beispielanlage (ZÄH et al. 2006a) .....	84
Abbildung 19:	Methode für die wirtschaftliche Optimierung des Einsatzes der virtuellen Inbetriebnahme komplexer Produktionssysteme .....	88
Abbildung 20:	Exemplarisches Anlagenlayout .....	88
Abbildung 21:	Exemplarisches Anlagenlayout mit eingezeichneten Steuerungssystemen.....	89
Abbildung 22:	Bildung von Automatisierungsgruppen.....	90
Abbildung 23:	Bildung von Materialflussgruppen .....	90
Abbildung 24:	Beispiel eines Wirtschaftlichkeitsportfolios für die Beurteilung von Nutzen und Aufwand für die VIBN-Projekte P1 bis P4; der Aufwand mit der Zahl der Ein- und Ausgänge des Subsystems abgeschätzt.....	91
Abbildung 25:	Anforderungen an die Ausrüstung eines VIBN-Labors ....	96
Abbildung 26:	Generische Funktionsstruktur des VIBN-Labors, bestehend aus den Systemen „Automatisierungstechnik“, „Schnittstelle“, „Simulationssystem“, „Modell“ und den Prozessen „Inbetriebnahme“ und „Modellerstellung“; je nach Ausprägung des Testobjektes mit mehr oder weniger realen Komponenten verschiebt sich die Grenze auf den verschränkten Keilen von „Testbett“ und „Testobjekt“ ....	97
Abbildung 27:	Teil des Lösungsbaukastens für die Verfügbarkeit der Automatisierungstechnik .....	98
Abbildung 28:	Ansätze der Vollsimulation und der Hardware-in-the-Loop-Simulation.....	100
Abbildung 29:	Teil des Lösungsbaukastens für die Abdeckung der Schnittstellentechnik.....	101
Abbildung 30:	Gekoppelte Simulation eines Kreuztisches für die Durchführung eines virtuellen Kreisformtest .....	101

---

Abbildung 31: Hardware-in-the-Loop-Ansatz mit virtueller Werkzeugmaschine, bestehend aus Verhaltens- und Kinematikmodell, verbunden über ein Feldbussystem mit einer vollwertigen CNC-Steuerung, bestehend aus NC, PLC, Steuertafel und HMI .....	103
Abbildung 32: Systemaufbau für die Integration einer Materialfluss-Simulation .....	104
Abbildung 33: Teil des Lösungsbaukastens für die Funktionalität des Simulationssystems.....	106
Abbildung 34: Peripheriemodell eines geschwindigkeitsgeregelten Antriebs .....	109
Abbildung 35: Zweidimensionales Materialflussmodell mit Elementen der Fördertechnik .....	110
Abbildung 36: Zusammenspiel und funktionale Aufteilung von Peripherie- und Materialflussmodell am Beispiel eines drehzahlgeregelten Antriebs für einen Förderriemen .....	111
Abbildung 37:Zweidimensionale Darstellung des Materialflusses durch eine Transferpresse nach SIEVERDINGBECK (2006).....	112
Abbildung 38: Dreidimensionale Darstellung einer Maschine mit Kinematik .....	112
Abbildung 39: Konzept der skalierbaren VIBN als „Vergrößerungsglas“ an einem Beispiel: Die Zellen Z <sub>1</sub> bis Z <sub>6</sub> auf Anlagenebene werden mit Hilfe skalierbarer Modelle auf Zellenebene in ein System von Maschinen M <sub>1</sub> bis M <sub>5</sub> aufgelöst, die auf der Maschinenebene jeweils detailliert simuliert werden können .....	113
Abbildung 40: Beispiel einer HIL-Systemarchitektur für eine skalierbare virtuelle Inbetriebnahme .....	114
Abbildung 41: Teil des Lösungsbaukastens für den Modellumfang.....	115
Abbildung 42: Auszug aus der Funktionsliste einer Maschine.....	117
Abbildung 43: Klassifizierung von Störungen nach zugeordneten, steuerungstechnischen Maßnahmen.....	118
Abbildung 44: Klassifizierung von Störungen .....	119
Abbildung 45: Störungen an Kommunikationssystemen .....	119
Abbildung 46: Hydraulische Steuerkette (in der Mitte) mit einem Vergleich der funktionalen (linke Seite) mit der	

komponentenorientierten Modellierungsstrategie (rechte Seite) .....	120
Abbildung 47: Parametrische Modellierung eines Hydraulikzylinders...	121
Abbildung 48: Aufbau von Verhaltensmodellen.....	122
Abbildung 49: Komponentenorientierter Modellierungsansatz einer pneumatischen Steuerkette mit Störungszuständen .....	123
Abbildung 50: Bedeutung des Störungssignals an einer Komponente....	124
Abbildung 51: Aufbau von Kinematikmodellen .....	125
Abbildung 52: Innerer und äußerer Materialfluss am Beispiel einer Montagezelle.....	126
Abbildung 53: Dienst zum Datenaustausch zwischen Teilmodellen .....	128
Abbildung 54: Teil des Lösungsbaukastens für den Modellerstellungsprozess.....	130
Abbildung 55: Gliederung eines Testprotokolls nach Komponenten bzw. Maschinenfunktionen .....	131
Abbildung 56: Gliederung eines Testprotokolls nach Zielsystemen.....	132
Abbildung 57: Abaufplan für die manuelle Vorgehensweise beim Störungstest von Werkzeugmaschinen mittels einer Hardware-in-the-Loop-Simulationsumgebung .....	136
Abbildung 58: Modulbauweise und Modularchitektur in der Steuerungssoftware .....	137
Abbildung 59: Ablauf eines automatisierten Softwaretests .....	138
Abbildung 60: Zeitskalabasierter automatisierter Steuerungstest .....	140
Abbildung 61: Testautomaten-Konzept für Werkzeugmaschinen.....	141
Abbildung 62: Teil des Lösungsbaukastens für die Effektivität des Inbetriebnahmeprozesses .....	141
Abbildung 63: Teilsysteme eines Simulationslabors nach ZÄH & REINHART (2004b).....	142
Abbildung 64: Hardware-in-the-Loop-Simulation eines Bearbeitungszentrums .....	145
Abbildung 65: Seitenansicht einer sechsstufigen Transferpresse mit schematischem Kontrollraum.....	148
Abbildung 66: Vereinfachte Darstellung der Steuerungstechnik einer Transferpresse .....	149

---

Abbildung 67: Reale Steuerungstechnik, gekoppelt mit einer Echtzeit- Prozess-Simulation .....	150
Abbildung 68: Pilot- und Testcenter für die virtuelle Inbetriebnahme...	151
Abbildung 69: Schematische Darstellung einer Fördertechnikzelle in einer Ziegelei.....	153
Abbildung 70: Schematische Darstellung des Materialflusses in der Ziegelei.....	155
Abbildung 71: Ergebnis des IBN-Code-Reviews durch den Inbetriebnehmer auf der Baustelle einer Ziegelei (Quelle: APPEL 2006) .....	158
Abbildung 72: Modell des Umsetzers mit Elektrohängebahn und Plattenband in der Endmontage eines Automobilwerkes 160	
Abbildung 73: Wirtschaftlichkeitsportfolio für die Anwendungsbeispiele der Arbeit mit der angedeuteten Rentabilitäts- und der Komplexitätsgrenze (basierend auf Erfahrungswerten)..	164





---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Definition des Begriffes virtuelle Inbetriebsetzung .....	32
Tabelle 2:	Definition des Begriffes „virtuelle Inbetriebnahme“ .....	33
Tabelle 3:	Merkmale des Ansatzes von Osmers 1998 .....	36
Tabelle 4:	Merkmale des Ansatzes von Baudisch und Denkena 2001	37
Tabelle 5:	Merkmale des Ansatzes von Dietrich 2002 .....	38
Tabelle 6:	Merkmale des Ansatzes von Meier und Kreusch 2000 ....	40
Tabelle 7:	Merkmale des Ansatzes von Bender et al. 1995-2003 .....	42
Tabelle 8:	Merkmale des Ansatzes von Scheifele, Röck und Broos 2004 .....	43
Tabelle 9:	Merkmale des Ansatzes von Qin 2005 .....	44
Tabelle 10:	Merkmale des Ansatzes von DIERSSEN 2002 .....	45
Tabelle 11:	Merkmale des Ansatzes von Hamm und Menzel 2004 ....	46
Tabelle 12:	Merkmale des Ansatzes von Mewes 2004 .....	47
Tabelle 13:	Merkmale des Ansatzes von Zäh et al. 2005 .....	48
Tabelle 14:	Merkmale des Ansatzes von Spath und Landwehr 2000 .	49
Tabelle 15:	Merkmale des Ansatzes von Min et al. 2002 .....	50
Tabelle 16:	Merkmale des Ansatzes von Tecnomatix 2003 .....	51
Tabelle 17:	Merkmale des Ansatzes von Dassault Systèmes 2005 .....	52
Tabelle 18:	Merkmale des Ansatzes von Rockwell Automation 2005.	53
Tabelle 19:	Merkmale des Ansatzes von Stetter 2005 .....	54
Tabelle 20:	Merkmale des Ansatzes von Cuiper 2000 .....	55
Tabelle 21:	Merkmale des Ansatzes von Freund 2000 .....	56
Tabelle 22:	Merkmale des Ansatzes von Rücker 2005 .....	57
Tabelle 23:	Merkmale des Ansatzes von Milberg und Amman 1996...	58
Tabelle 24:	Merkmale des Ansatzes von Strassacker 1997 .....	59
Tabelle 25:	Merkmale des Ansatzes von Heinrich und Wortmann 2004 60	
Tabelle 26:	Merkmale des Ansatzes von Römberg 2004 .....	61

## Abkürzungsverzeichnis

---

Tabelle 27:	Merkmale des Ansatzes von Schlögl 2005 .....	62
Tabelle 28:	Messgrößen für die Anwendungsbeispiele der Arbeit .....	163
Tabelle 29:	Kenngrößen spezifischer Aufwand, spezifischer Nutzen und spezifische Rentabilität für die Anwendungsbeispiele.....	164

---

## Abkürzungsverzeichnis

Anm.	Anmerkung
BAZ	Bearbeitungszentrum
BDE	Betriebsdatenerfassung
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design (engl. für rechnergestützte Konstruktion)
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CNC	Computerized Numerical Control (NC-Steuerung); bestehend aus NC, PLC und HMI
d.h.	das heißt
DDE	Dynamic Data Exchange
DIN	Deutsche Industrienorm
DLZ	Durchlaufzeit
e.V.	eingetragener Verein
E/A	Ein- und Ausgabeschnittstellen von Rechnersystemen
engl.	englisch
ERP	Enterprise Resource Planning
et al.	et alii (und andere)
etc.	et cetera (und weitere)
f.	folgende
FEM	Finite Element Method (Methode der finiten Elemente)
ff.	fortfolgende
FMEA	Fehler-Möglichkeiten- und -Einfluss-Analyse
GU	Generalunternehmer
HIL	Hardware-in-the-Loop
HMI	Human Machine Interface (Mensch-Maschine-Schnittstelle,

## Abkürzungsverzeichnis

---

	vgl. MMS)
HSC	High Speed Cutting (Hochgeschwindigkeitszerspanen)
i.d.R.	in der Regel
IBN	Inbetriebnahme
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
MC	Motion Control (Bewegungssteuerung, meist integriert in SPS)
MES	Manufacturing Execution System (Leitstand)
MKS	Mehr-Körper-Systeme, Mehr-Körper-Simulation
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle (vgl. HMI)
NC	Numerical Control (Numerische Steuerung); Kern der mehr-achsigen Bewegungssteuerung einer CNC
OPC	Open Process Communication
PDF	Print Document File
PLC	Programmable Logic Control (vgl. SPS)
PPS	Produktionsplanung und –steuerung
RC	Robot Control (Robotersteuerung)
REFA	REFA – Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.
S.	Seite
SEMI	Simultaneous Engineering zur Entwicklung von Maschinen mit Mikrosystemen (Forschungsprojekt)
sog.	so genannte
SOP	Start-of-Production (Serienstart)
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung (vgl. PLC)
SQL	Structured Query Language
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
u.a.	und andere
usw.	und so weiter
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDW	Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e. V.

---

Verf.	Verfasser
vgl.	vergleiche
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme
VIBS	Virtuelle Inbetriebsetzung
VPLC	Virtual PLC (Virtuelle SPS)
VR	Virtual Reality (Virtuelle Realität)
VRML	Virtual Reality Modelling Language
WSG	Winkelschrittgeber
WZM	Werkzeugmaschine
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil



# 1 Einleitung

Wie immer man es ausdrückt, mit Gorbatschows diplomatisch formulierter Kritik, „*Wer zu spät kommt, den bestraft das Leben!*“ (GORBATSCHOW 1989), mit Benjamin Franklins väterlichem Rat, „*Remember that time is money!*“ (FRANKLIN 1748) oder ob man sportlich einfach eine Nasenlänge voraus sein will: Der wirtschaftliche Erfolg eines Produktes hängt entscheidend vom Zeitpunkt der Serienreife ab. Die Bedeutung eines optimalen Zeitmanagements in der Massenproduktion bringt Reithofer konkreter auf den Punkt: „*Wenn wir ein Produkt statt in neun Monaten vielleicht in drei Monaten auf volle Produktionskapazität fahren, dann bedeutet das bares Geld für das Unternehmen*“ (REITHOFER 2002).

Aus der Forderung nach einer Zeitverkürzung des Produktionsanlaufes wird in Abschnitt 1.1 *Motivation* die Notwendigkeit abgeleitet, sich mit der Beschleunigung des Anlaufs von Produktionssystemen und im Einzelnen mit den Phasen Inbetriebnahme (IBN) und Hochlauf zu beschäftigen. Im darauf folgenden Abschnitt wird ein konkreter *Handlungsbedarf* für die IBN mechatronischer Produktionsmaschinen dargestellt. Daraus wird das generelle *Ziel* der vorliegenden Forschungsarbeit entwickelt, nämlich durch Simulation bei der IBN Zeit und Sicherheit zu gewinnen. Die Einleitung schließt mit dem Abschnitt *Vorgehensweise*, der den in diesem Forschungsbericht beschriebenen Weg zum Ziel skizziert.

## 1.1 Motivation

Der Produktionsanlauf besteht aus den beiden Phasen IBN und Hochlauf (WIENDAHL et al. 2002, S. 650). Zwischen den Phasen erfolgt der Gefahrenübergang vom Hersteller der Produktionsanlage an den Betreiber. Die Anteile der IBN an der Durchlaufzeit bei der Auftragsabwicklung im Maschinenbau werden laut Sossenheimer bereits in den 90er Jahren durchschnittlich mit 13% bei einem Schwankungsbereich von 7 bis 20% genannt (SOSSENHEIMER 1989, S. 3). In der IBN stehende Maschinen erzeugen zusätzlich erhebliche Kapitalbindungskosten und Flächenengpässe (EVERSHEIM & SOSSENHEIMER 1987). Damit und als erste Phase des Anlaufs eines Produktionssystems stellt die IBN einen wichtigen Engpass der Auftragsabwicklung dar.

Die IBN macht anteilig 15 bis 25% der Gesamtdurchlaufzeit eines Anlagenprojektes aus. Davon ist 90% der Zeit für die IBN von Elektrik und Steuerungstechnik aufzuwenden, wovon 70% auf Softwarefehlern beruhen (siehe Abbildung 1 und VDW 1997).

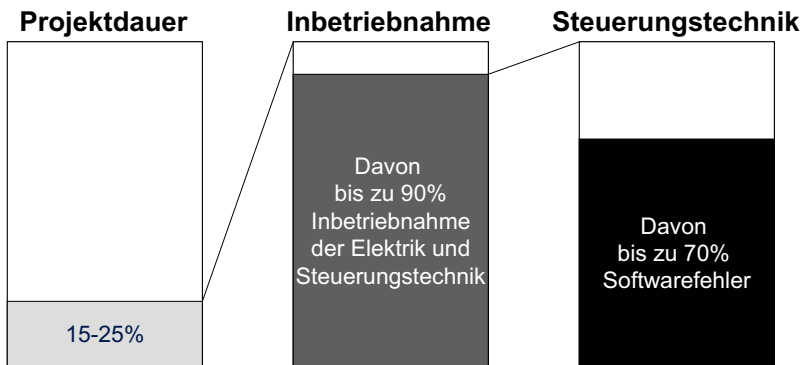


Abbildung 1: Zeitanteile bei der Inbetriebnahme (Quelle: VDW 1997)

Im Maschinenbau zeichnet sich die Tendenz ab, dass Funktionsabläufe komplexer werden und immer häufiger ein koordiniertes Zusammenwirken von Mechanik, Hydraulik, Pneumatik und Elektrik erfordern. Moderne Produktionssysteme sind demnach mechatronische Systeme, die in Synergie der unterschiedlichen Disziplinen entstehen. Betrachtet man den historischen Verlauf der Kostenanteile bei der Entwicklung von Produktionssystemen seit den 70er Jahren, so haben sich diese von ihrem ursprünglichen Schwerpunkt in der Mechanik über die Elektronik hin zur Software verschoben (KOHEN 1990, S. 265, RAITH & AMMAN 1992, siehe auch Abbildung 2).

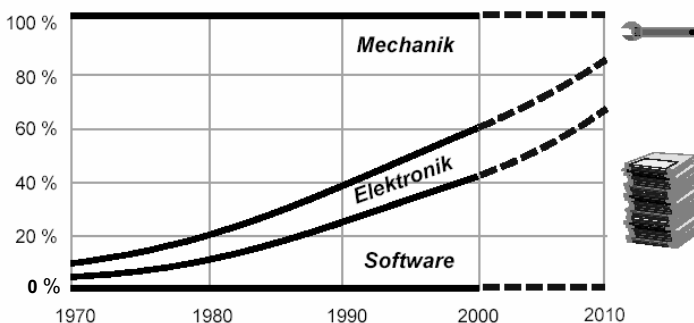


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf der Anteile von Mechanik, Elektronik und Software am Entwicklungsaufwand (Quelle: KOHEN 1990, S. 265, RAITH & AMMAN 1992, GLAS 1993)



Die steigende Komplexität der Produktionstechnik rückt die Informations- und Automatisierungstechnik in den Vordergrund. Damit gewinnt das Testen und Optimieren von Steuerungssoft- und -hardware in der IBN immer mehr an Bedeutung - eine Entwicklung, die sich im Anstieg der IBN-Zeiten manifestiert (WALENTA 1990).

Eine Qualitätsprüfungen der Steuerungssoftware zu einem derart späten Zeitpunkt führt zu Anlaufverlusten von 20% des Investitionsvolumens (MILBERG et al. 1992b). Rechnet man Wartungs- und Reparaturaufwände über den Lebenszyklus hinzu, so betragen die Kosten für Software und Elektronik bis zu zwei Drittel der Gesamtkosten eines Betriebsmittels (MAUDERER 1996).

Aus organisatorischer Sicht müssen bei der IBN auf der Anlagenbaustelle - meist weit entfernt vom Stammhaus - eine Vielzahl mechatronischer Komponenten funktional integriert werden, wobei sich zu diesem Zeitpunkt erst zeigt, ob das Gesamtsystem tatsächlich funktioniert. Zusätzlich wird die Koordination mehrerer Projektpartner notwendig, nämlich von Zulieferern, Kunden und eigener Organisation. So erfolgt in der IBN die Aufdeckung technischer und organisatorischer Fehler und Versäumnisse vorgelagerter Phasen mit einem hohen Anteil nicht planbarer, ereignisgesteuerter Tätigkeiten zur Problembehebung. Neben dem Zeitdruck sowie den Mentalitäts- und Sprachschwierigkeiten kommt auch die unangenehme Situation des Arbeitens unter den Augen des Kunden hinzu. Dies bedeutet, dass der Kunde direkt Kenntnis von Problemen erhält, womit ein Renomeeverlust oder sogar rechtliche Konsequenzen für den Systemlieferanten einhergehen können (ZEUGTRÄGER 1998). Weitere Einflüsse resultieren direkt aus der Inbetriebnahme selbst, bei der unter hohem Zeitdruck zahlreiche Nebenaufgaben für alle Beteiligten anfallen, wie z.B. Angebotserstellung sowie Inbetriebnahme- und Serviceunterstützung.

Zusammenfassend ergeben sich verschärfte Anforderungen an Maschinenbauunternehmen und Anlagenlieferanten: Auf der einen Seite steigen mit dem Automatisierungsgrad die Komplexität mechatronischer Maschinen und damit der Aufwand bzw. das Risiko einer IBN sowie der dazugehörigen Hochlaufphase (Wiendahl et al. 2002, S. 652). Auf der anderen Seite verkürzt sich in zunehmendem Maße die dafür zur Verfügung stehende Zeit (LANZA 2005). Dieser Sachverhalt birgt eine hohe Motivation, sich mit einer systematischen Verkürzung und Verbesserung des Anlaufs, insbesondere der Inbetriebnahme und des Hochlaufs zu beschäftigen. Daraus wird im folgenden Abschnitt der Handlungsbedarf mit Fokus auf der Inbetriebnahme herausgearbeitet.

### 1.2 Handlungsbedarf

Die häufigsten Störungen bei der IBN stellen Fehler in der Steuerungssoftware dar. Sie gehen im Wesentlichen auf fehlerhafte Programme und unzureichende Strukturierung zurück. Des Weiteren entstehen Schwierigkeiten durch einen erstmaligen Test und die Optimierung komplexer Funktionsabläufe (EVERSHEIM et al. 1990a, S. 3). Dabei findet insbesondere eine vollständige Prüfung und Optimierung der Steuerungshard- und -software statt.

Die Maschinensoftware stellt auch eine wesentliche Schwachstelle im Hochlauf dar, bei dem meist neu entwickelte Steuerungstechnik nicht voll ausgetestet ist und sich die Monitoring- und Diagnosewerkzeuge noch in der Entwicklungs- bzw. Testphase befinden (FRITSCH 1998, S. 57). Darüber hinaus wird häufig eine neue Kommunikationstechnik eingesetzt, so dass eine automatisierte Fehlerfassung nicht möglich ist.

Eine weitere, bedeutende Problemquelle im Hochlauf besteht in der mangelhaften Kompatibilität der Subsysteme einer Produktionsanlage. Hierbei wird deutlich, dass die häufig von mehreren unterschiedlichen Ausüstern gelieferten Maschinen nicht immer optimal aufeinander abgestimmt sind. Dieses gilt zum einen für die Leistungsdaten der Maschinen, zum anderen aber auch für die Schnittstellen in der Steuerung oder die verbindende Fördertechnik (Wiendahl et al. 2002, S. 653). Fehlerhaft programmierte Steuerungssoftware führt besonders bei hochautomatisierten Stationen und Roboterzellen zu verlängerten Taktzeiten oder Störungen aufgrund unvorhergesehener Kollisionen (Wiendahl et al. 2002, S. 654).

Der aus dieser Situation rührende Aufwand in IBN und Hochlauf hat sich innerhalb der letzten Jahrzehnte mehr als verdoppelt. Stillstandszeiten von mehreren Wochen bis hin zu mehreren Monaten sind aufgrund einer grundlegenden Überarbeitung der Software üblich geworden. Auf der Baustelle wird in der Eile häufig auf die Wiederverwendung und Anpassung von alten Programmteilen aus anderen Maschinen zurückgegriffen. Damit sind bei der IBN mehr als 85% der Störungen und Schäden durch Mängel aus der Entwicklung verursacht (WEBER 1996).

Der Grund liegt in der Tatsache, dass während der Entwicklung durch eine hohe Änderungshäufigkeit und eine unzureichende Beschreibung von Funktionen ein hohes Maß an Kommunikation zwischen den Disziplinen notwendig wird. Findet diese nicht frühzeitig und während der Entwicklung statt, so erfolgt sie verdichtet bei der Inbetriebnahme auf der Baustelle (SPATH & LANDWEHR).

Die Kommunikationsschwierigkeiten zwischen den mechanischen, elektrischen und steuerungstechnischen Konstruktionsabteilungen entstehen aufgrund der organisatorischen und räumlichen Trennung sowie unterschiedlicher Ausbildung, Denkweise und Begrifflichkeit. Durch unzureichende Koordination der Teilprojekte und überwiegend sequentielle Vorgehensweise arbeiten die Disziplinen zum Teil aneinander vorbei (OSMERS 1998, SPATH & LANDWEHR 2000a). Mangelhafte Einbeziehung der Elektrokonstruktion und der Softwareentwicklung in die Konzeptphase führt im weiteren Verlauf zu suboptimalen Lösungen, die häufig durch Überdimensionierung von Antrieben oder Sensorik sowie komplexe Steuerungsprogramme ausgeglichen werden müssen.

Die Summe der Tätigkeiten in der IBN können aufgeteilt werden in vorab zu erledigende und in der IBN selbst durchzuführende. Damit bleibt ein nicht vermeidbarer Rest an IBN-Tätigkeiten, die vor allem die Einstellung von Antrieben und die Justage von Sensorik betreffen (EVERSHEIM et al. 1990a). Mittels Simulation kann die Ablauffähigkeit der Software auf den Steuerungen vorab getestet werden, wobei sich erfahrungsgemäß 80% der Funktionen vorprüfen lassen (EVERSHEIM et al. 1990a).

Betrachtet man auch hierarchische Abhängigkeiten innerhalb der Steuerungstechnik, so ergeben sich für übergeordnete Leitsteuerungen folgende Probleme in der IBN-Praxis: Durch die parallele Entwicklung von Systemkomponenten kann das Gesamtsystem erst am Ende getestet werden. Zudem sind die Produktionseinrichtungen nur begrenzt für den Software-Test verfügbar. Insbesondere sind häufig einzelne Komponenten zum Termin noch nicht funktionsfähig, wodurch sich entweder die Zeitspanne für Tests verkürzt oder der Termin für die Endabnahme verschiebt. Die Folge des Ersteren, nämlich Software mit niedrigerer Qualität, kann den Ausfall von Einzelkomponenten mit Stillstand und Verzögerung der Produktion bedeuten. Außerdem können manche Betriebszustände mit einem hohen Risiko von Unfällen für Maschine und Bediener verbunden sein. Häufig sind Tests von Änderungen an bereits genutzten Systemen nicht möglich, da diese zur Produktion eingesetzt werden (AMANN 1994, S. 23 f., STRASSACKER 1997).

Die parallelisierte Entwicklung von Softwaremodulen erfordert Software-Werkzeuge zur durchgängigen virtuellen Projektierung, Montage und Inbetriebnahme sowie ein frühzeitiges Risiko- und Störungsmanagement z.B. mittels Simulation (KUHNS 2002, S. 22 f.).

ZÄH et al. (2004) verfolgen in ihrem Lösungsansatz eine Parallelisierung von Fertigung und Montage des Produktionssystems und seiner Inbetriebnahme mittels virtueller Prototypen mit folgenden Zielen:

- Verkürzung der Durchlaufzeiten

- Erhöhung der Transparenz, Beherrschung von Komplexität
- Frühzeitige Beseitigung steuerungstechnischer bzw. konstruktiver Fehler
- Steigerung der Softwarequalität bei der Erstinbetriebnahme
- Test von Störungssituationen mit hohem Risiko für Mensch und Maschine

Durch eine Parallelisierung von Realisierung und Schulung auf Basis derselben Systeme entstehen alternative Schulungskonzepte, die dem Kunden helfen, Zeit zu sparen (KUHNS 2002, S.24 u. 33 und ZÄH et al. 2004a). Dabei kann das Betreiber- und Instandhaltungspersonal mittels virtueller Schulungsumgebungen in kritischen Szenarien das Verhalten und die Beherrschung ihres Produktionssystems ohne Risiko studieren.

### 1.3 Ziel der Arbeit

In diesem Forschungsbericht werden Methoden für die simulationsgestützte Inbetriebnahme von Steuerungssoftware entwickelt. Die so genannte virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) verbessert die Qualität der Maschinen im Zusammenspiel von Software, Elektrik und Mechanik deutlich. Neben der Inbetriebnahme kann damit auch die Hochlaufphase beschleunigt werden, da weniger Ausfälle und Stillstandszeiten zu erwarten sind. Letztendlich soll die Arbeit einen Beitrag zur Verkürzung der Inbetriebnahmezeit und zur Verbesserung der Softwarequalität leisten. Zusätzlich sollen durch den Wegfall von Testaufbauten beim Anlagenhersteller und durch Einsparung von Prozessgut Kosten in der Inbetriebnahme eingespart werden.

Es gelten für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau folgende Randbedingungen bei der Projektabwicklung:

- Die Unternehmen sind in der Anwendung der Werkzeuge und Methoden der Digitalen Fabrik bzw. der Virtuellen Produktion, insbesondere von virtuellen Prototypen und der Simulation unterschiedlich weit fortgeschritten.
- Die Maschinen- und Anlagenhersteller sind zu mehr als 80% kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) mit weniger als 500 Mitarbeitern. Dies bedeutet, dass aufgrund von Kapazitätsengpässen eine virtuelle Inbetriebnahme nicht für jedes Projekt möglich ist.

- Die Ausprägung der Steuerungs- und Automatisierungstechnik in der Produktion, also Fertigung und Montage, ist äußerst heterogen in Bezug auf die Zahl der Gerätehersteller und die Art der Geräte.

Vor diesem Hintergrund lässt sich das allgemeine Ziel in drei Teilziele aufgliedern, die im Rahmen dieser Arbeit erreicht werden sollen.

Die VIBN wird deutlich erleichtert und wirksamer, wenn gewisse Vorbedingungen erfüllt sind. Daraus ergibt sich das erste Teilziel:

#### **Teilziel 1 - Einführung in eine Organisation**

Es soll ein methodisches Vorgehen erarbeitet werden, das ausgehend von einer einfachen und schnellen Überprüfung des Reifegrades eines Unternehmens im digitalen Engineering die notwendigen Schritte auf dem Weg zu einer effizienten und effektiven virtuellen Inbetriebnahme ermöglicht.

Dem Nutzen der virtuellen Inbetriebnahme steht ein projektabhängiger Aufwand für die Modellierung und die Tests gegenüber. Es ist daher wichtig, dass ein systematisches Vorgehen zur Definition und Auswahl von Teilsystemen erarbeitet wird, die sich aus wirtschaftlich-technischer Sicht für eine virtuelle Inbetriebnahme eignen. Dem widmet sich das zweite Teilziel:

#### **Teilziel 2 – Wirtschaftliche Skalierung der VIBN**

Es soll eine Projektmanagementmethode entwickelt werden, die es erlaubt, die Anwendung der virtuellen Inbetriebnahme derart zu skalieren, dass sie nur auf wichtige Anlagenteile begrenzt wird. Mit Hilfe der Methode muss eine Projektleitung ohne hohen Aufwand diejenigen Anlagenteile herausfinden können, bei denen sich eine virtuelle Inbetriebnahme am meisten lohnt.

Die äußerst heterogene Landschaft sowohl im Bereich der Steuerungs- und Automatisierungstechnik als auch bei den zu steuernden mechanischen Systemen erfordert eine mit der Anlagentechnik individualisierbare Modellierung und Simulation. Dies wird mit dem dritten Teilziel verfolgt:

### **Teilziel 3 – Modellbildung**

Es soll eine Methode für die Modellbildung entwickelt werden, mit deren Hilfe ein Hersteller für ein bekanntes Maschinen- und Anlagenspektrum Virtuelle-Inbetriebnahme-Modelle aufbauen kann. Diese muss die Steuerungstechnik ebenso abdecken wie die in den Maschinen verbaute Automatisierungsperipherie und die mechanischen und materialflusstechnischen Prozesse. Zudem muss die verfügbare Rechenleistung bei der Modellbildung berücksichtigt werden.

## **1.4 Vorgehensweise und Gliederung**

Das Vorgehen zur Zielerreichung orientiert sich an den Teilzielen. Damit ergibt sich die Gliederung der Arbeit in sechs Hauptkapitel:

- Kapitel 2: Grundlagen
- Kapitel 3: Stand der Technik
- Kapitel 4: Einführung in eine Organisation
- Kapitel 5: Wirtschaftliche Skalierung
- Kapitel 6: Technologien für die Modellbildung
- Kapitel 7: Anwendungsbeispiele

Im Kapitel 2 werden für das weitere Verständnis wichtige Grundlagen erläutert. Dazu widmet sich der Abschnitt 2.1 der Begriffsklärung rund um die Begriffe *Produktionsanlauf*, *Inbetriebnahme* und *Hochlauf*. In Abschnitt 2.2 werden bekannte Maßnahmen zur Qualitätssicherung in der Inbetriebnahme dargestellt. Diese umfassen organisatorische Maßnahmen, Standardisierung, Vorabinbetriebnahme von Teilsystemen und den Test von Steuerungssoftware. Im Abschnitt 2.3 werden theoretische Grundlagen wie der Begriff der virtuellen Zeitachse, die minimale Abtastrate und die Echtzeitfähigkeit erörtert.

In Kapitel 3 erfolgt die Darstellung des Standes der Technik für die virtuelle Inbetriebnahme, gegliedert nach den Produktionsebenen der betrachteten Ansätze.

Das Kapitel 4 beleuchtet die Einführung der virtuellen Inbetriebnahme in ein Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus. Dazu werden zunächst die organisatorischen Anforderungen an die virtuelle Inbetriebnahme dargestellt. Mit Hilfe einer schnellen Analyse anhand einfacher Kenngrößen kann für das betrachtete Unternehmen der Reifegrad und damit die Erfüllung der Anforderungen bestimmt werden. Daraus werden

die weiteren Schritte auf dem Weg zum wirtschaftlichen Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme entwickelt.

Kapitel 5 erläutert die Methode für das Projektmanagement zur wirtschaftlichen Skalierung der virtuellen Inbetriebnahme im Projektgeschäft. Im ersten Abschnitt wird das Vorgehen zur Einteilung eines geplanten Produktionssystems in Subsysteme dargestellt, die unabhängig voneinander virtuell in Betrieb genommen werden können. Im folgenden Abschnitt wird ein einfaches Kennzahlensystem entwickelt, anhand dessen die Projekt-Einteilung bewertet und optimiert werden kann. Mit demselben Kennzahlensystem werden für jedes Teilprojekt Aufwand und Nutzen gegenübergestellt, mit dem Ziel, eine Entscheidung für oder gegen die Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme treffen zu können.

Basierend auf dem Stand der Technik erfolgt in Kapitel 6 die Darstellung geeigneter Modellierungstechnologien für eine virtuelle Inbetriebnahme. Die Ausführungen können als Richtlinie für die Auslegung und Ausstattung einer Virtuelle-Inbetriebnahme-Abteilung dienen. Das Kapitel gliedert sich in die Abschnitte 6.1 mit der Anforderungsdefinition, 6.2 mit der Entwicklung einer generischen Funktionsstruktur, 6.3 mit der Ausprägung der Einzelfunktionen und den Abschnitt 6.4 mit einer Zusammenfassung in einem Lösungsbaukasten.

Konkrete Ausprägungen einer Simulationsumgebung werden anhand von Anwendungsbeispielen in Kapitel 7 beschrieben. Es werden die benötigten Werkzeuge für die virtuelle Inbetriebnahme einer Werkzeugmaschine, einer komplexen Großanlage, einer Fördertechnikzelle und einer Logistikzelle in der Montage dargestellt.

Im Fazit (Kapitel 8) wird die Arbeit zusammengefasst und mit einem Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten im Themenfeld der virtuellen Inbetriebnahme geschlossen.





## 2 Grundlagen

Dieses Kapitel definiert für das weitere Verständnis wichtige Begriffe. Im ersten Abschnitt wird Grundlegendes rund um die Inbetriebnahme eingeführt, im zweiten Abschnitt werden Maßnahmen zur Qualitätssicherung in der Inbetriebnahme dargestellt und im letzten Abschnitt erfolgt die Definition wichtiger steuerungstechnischer Grundlagen, die zum Verständnis der virtuellen Inbetriebnahme notwendig sind.

### 2.1 Begriffsdefinition

In diesem Abschnitt werden die Begriffe *Lebenszyklus von Produktionssystemen*, *Produktionsanlauf*, *Inbetriebnahme* und *Hochlauf* definiert und zueinander in Beziehung gesetzt.

#### 2.1.1 Lebenszyklus von Produktionssystemen

Der Lebenszyklus von Produktionssystemen setzt sich aus folgenden drei Hauptphasen zusammen: Der *Planungs- und Realisierungsphase*, der *Betriebsphase* und der *Redistributionsphase* (siehe Abbildung 3 bzw. WIENDAHL et al. 2002, S. 651).

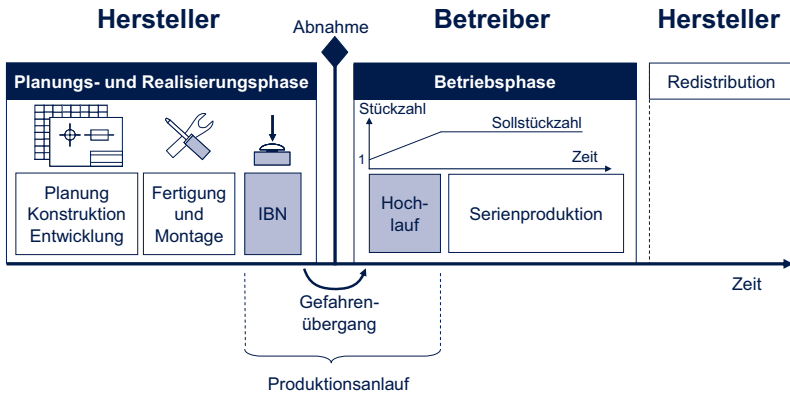


Abbildung 3: Lebenszyklus eines Produktionssystems in Anlehnung an Wiendahl (WIENDAHL et al. 2002, S. 651)

Die Verantwortung liegt jeweils in der ersten und letzten Phase beim Hersteller, in der Betriebsphase beim Betreiber.

### 2.1.2 Produktionsanlauf

Mit dem Begriff *Produktionsanlauf* wird sowohl der Anlauf einer Einzelmaschine verbunden als auch der verkettete Anlauf des gesamten Produktionssystems für ein Produkt (WIENDAHL et al. 2002, LANZA 2005). Im Lebenszyklus ist der Produktionsanlauf im Übergang zwischen der Planungs- und Realisierungsphase zur Betriebsphase angesiedelt (siehe Abbildung 3). Dabei setzt sich ein Produktionsanlauf jeweils aus einer Inbetriebnahmephase im Verantwortungsbereich des Herstellers und einer Hochlaufphase im Verantwortungsbereich des Betreibers zusammen. Zwischen Inbetriebnahme und Hochlauf liegt die Abnahme mit dem Gefahrenübergang vom Hersteller an den Betreiber (WIENDAHL et al. 2002, S. 650).

### 2.1.3 Inbetriebnahme

Die früheste Definition des Begriffes *Inbetriebnahme (IBN)* findet sich in der DIN 32541 mit dem Titel *Betreiben von Maschinen und vergleichbaren technischen Arbeitsmitteln: Begriffe*. Hier wird die Tätigkeit des Inbetriebnehmers definiert als das Bereitstellen einer Maschine oder eines vergleichbaren technischen Arbeitsmittels zur Nutzung (DIN 32541 1977).

Eine umfangreichere Definition geben BAUMANN & LOOSCHELDERS (1982): *Die Inbetriebnahme eines technischen Systems erfolgt nach Abschluss der Montage und erfolgreichen Betriebsfunktionsprüfungen [...]. Während der Inbetriebnahmezeit, die sich, je nach Erfordernissen und Vereinbarungen, über einen mehr oder weniger langen Zeitraum hinziehen kann, werden verschiedenartige Betriebsprüfungen bei unterschiedlichen Nennbelastungen durchgeführt. Dabei wird auch die Leistungsfähigkeit des technischen Systems geprüft. Nach geprüfter Leistungsfähigkeit wird der Leistungsnachweis erbracht. Dieser Nachweis bezieht sich einerseits auf das technische System und andererseits auf die Produktion. Mit erfolgreicher Beendigung des Leistungsnachweises geht im Allgemeinen die Verantwortlichkeit für das technische System vom Hersteller auf den Kunden über. Dieser Vorgang wird auch Gefahrenübergang genannt. Danach beginnt der Betrieb des technischen Systems.*

Eversheim definiert die IBN als den Vorgang des termingerechten Versetzens der montierten Produkte in Funktionsbereitschaft mit einer anschließenden Überprüfung dieser Funktionsbereitschaft (EVERSHEIM et al. 1990a, S. 9). Gegebenenfalls ist es erforderlich, die Funktionsbereitschaft herzustellen; in diesem Fall umfasst die IBN auch alle notwendigen Tätigkeiten, die zum Ingangsetzen und für die Herstellung der korrekten Funktion von vorschrittmäßig montierten und kontrollierten Baugrup-

pen, Maschinen und komplexen Anlagen erforderlich sind. Dabei stehen insbesondere die Steuerung und Teile der Steuerung wie Hardware, Software und Module im Vordergrund.

Die DIN 19246 definiert unter dem Titel *Abwicklung von Projekten, Begriffe* die Begriffe IBN oder auch Inbetriebsetzung (IBS) als funktionsgerechtes Einschalten des Systems in Verbindung mit dem Prozess (DIN 19246 1991).

Bei Zeugträger liest sich die Definition der Inbetriebnahme dann folgendermaßen: „*Inbetriebnahme: Funktionsgerechtes Einschalten der Anlage in Verbindung mit dem Prozess und Hochfahren der Leistung auf das geforderte Niveau. Die Inbetriebnahme stellt die Funktionsbereitschaft und das funktionale Zusammenwirken der zuvor montierten Einzelkomponenten her und prüft die Korrektheit der Einzelfunktionen sowie deren funktionales Zusammenwirken. Das Ergebnis der Inbetriebnahme ist eine abnahmefertige, technisch funktionsfähige Anlage*“ (ZEUGTRÄGER 1998). Zeugträger nennt als Ziele der IBN das Herstellen der Funktionsfähigkeit, den Nachweis der Leistungsfähigkeit und die Qualifizierung des Bedienpersonals (ZEUGTRÄGER 1998, S. 29). Die Aufgaben der IBN sind nach Zeugträger die Komplettierung der Anlagendokumentation, die Schulung und Einweisung des Bedienpersonals, die Beseitigung von Fehlern und Mängeln aus Vorphasen, die Einstellung und Optimierung von Betriebsparametern, das Einschalten von Steuerungshard- und -softwarekomponenten und das Einschalten von Funktionseinheiten (ZEUGTRÄGER 1998, S. 29).

In Anlehnung an die Zieldefinition von Zeugträger gliedert Wiendahl die Inbetriebnahme in den Probetrieb, die Abnahme und die Übernahme durch den Kunden (WIENDAHL et al. 2002).

Eversheim stellt fest, dass eine Abgrenzung der Inbetriebnahme in der Realität wegen der Natur des Projektgeschäftes schwierig ist. So lassen sich Montage und Inbetriebnahme nicht klar trennen, da Inbetriebnahmetätigkeiten in den Phasen der Baugruppenvorprüfung in der Montage, der Inbetriebnahme beim Hersteller und der Kundeninbetriebnahme durchgeführt werden. Neben diesen Zuordnungsschwierigkeiten der IBN-Tätigkeiten beschreibt Eversheim die Zielkonflikte in der IBN (EVERSHEIM et al. 1990a, S. 9 f., insbesondere Abb. S. 10). Auf die Inbetriebnahme wirken zum einen unternehmensexterne Einflüsse durch einen hohen Termindruck von Seiten des Kunden, verbunden mit einem hohem Anteil kundenspezifischer Neu- und Änderungskonstruktionen sowie einer späten Festlegung von Kundenwünschen. Zum anderen wirken unternehmensinterne Einflüsse in Form von Störzeiten durch Fehlteile, unvollständige oder fehlende Arbeitsunterlagen und Störzeiten durch unzulängliche Terminkoordination zwischen den Unternehmens-

bereichen. Neben externen und internen spielen auch inbetriebnahme-spezifische Einflüsse eine Rolle, die Eversheim mit dem verlustreichen Einsatz hochqualifizierten Personals für Nebentätigkeiten, fehlender Personal- und Betriebsmittelkoordination mit der Folge langer Durchlaufzeiten sowie Flächenengpässen beschreibt.

### 2.1.4 Hochlauf

Zeugträger und Wiendahl definieren den Hochlauf folgendermaßen: Der Hochlauf bezeichnet die *„Phase im Anschluss an die Abnahme, in der die Anlage beim Nutzer unter ihren nominellen, personellen, organisatorischen und technischen Randbedingungen auf dauerhafte Nennleistung gebracht wird. [...] Während der Hochlaufphase 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“* (ZEUGTRÄGER 1998, WIENDAHL et al. 2002).

Zeugträger nennt außerdem als Hauptziele des Hochlaufs das Erreichen und Sichern eines stabilen Betriebszustands auf hohem Leistungsniveau. Damit sind die Aufgaben des Hochlaufs umfangreich und umfassen neben der Behebung von Frühausfällen die Verbesserung der technisch noch suboptimalen Systeme, eine technologische Prozessoptimierung, die Optimierung der Betriebsstrategien sowie eine Qualifizierung des Bedien- und Instandhaltungspersonals (ZEUGTRÄGER 1998). In dieser Phase zeigt sich die Störsicherheit von Maschinen und insbesondere der Steuerungen.

## 2.2 Qualitätssicherung in der Inbetriebnahme

Dieser Abschnitt beschreibt Maßnahmen zur Qualitätssicherung in der Inbetriebnahme. Dazu zählen organisatorische Maßnahmen, Standardisierung, Vorabinbetriebnahme und Tests der Steuerungstechnik.

### 2.2.1 Organisatorische Maßnahmen

Sossenheimer führt in seinem organisatorischen Ansatz zur Bewältigung der Inbetriebnahme aus, wie durch konstruktive Maßnahmen im Vorfeld und durch Nutzung der Erfahrungen aus der Inbetriebnahme gleicher Maschinen um bis zu 87,5% verkürzte Inbetriebnahmezeiten erreicht werden können (Sossenheimer 1989). Eine weitere Maßnahme nach Sossenheimer ist die Einführung eines systematischen Software-Engineerings, das in der Softwarekrise der späten 60er Jahre entstanden

ist und auf die Entwicklung von Maschinensoftware übertragen werden kann. Laut Sossenheimer konnte dadurch die Inbetriebnahmezeit der Steuerungssoftware komplexer Maschinen um bis zu 90% reduziert werden. Er skizziert eine Richtlinie für das Software-Engineering bestehend aus den Elementen Entwicklung, Management, Wartung und Pflege sowie einem Phasenkonzept und insbesondere einer Steuerungsinbetriebnahme mittels Simulation.

Eversheim et al. stellen ebenfalls ein erhebliches Rationalisierungspotential in der Inbetriebnahme komplexer Maschinen und Anlagen fest (EVERSHEIM et al. 1990a). Zu dessen Ausschöpfung schlagen sie eine Reihe von organisatorischen Maßnahmen wie beispielsweise den Einsatz von Planungs- und Steuerungssystemen vor. Bei den Maßnahmen geht es im Wesentlichen um die Bewältigung der in der Inbetriebnahme anfallenden Störungen durch ein konsequentes Wissens- und Änderungsmanagement. Es werden keine expliziten Maßnahmen zur Verlagerung von Tätigkeiten in die Bereiche vor der IBN aufgeführt.

Nach Eversheim ist ein Schwerpunkt die Steuerungsentwicklung in der Elektrokonstruktion. Beispielsweise kann Abhilfe durch eine Reorganisation der Softwareerstellung erreicht werden. Die Maßnahmen sind eine Erhöhung der Softwarequalität durch Standardisierung der Softwaremodule und -schnittstellen sowie eine Prüfung der Software durch organisatorische Maßnahmen bei der Auftragsabwicklung. Eversheim beschreibt den Ist-Zustand in der Inbetriebnahme von Steuerungen und stellt fest, dass in diesem Bereich eine geringe Anwendung organisatorischer und technischer Hilfsmittel des Projektmanagements vorliegt. Ein Grund für den mangelhaften Erfahrungsrückfluss von der Inbetriebnahme in die Softwareentwicklung liegt in der Tatsache begründet, dass neben kurzfristigen auch lang- und mittelfristige Maßnahmen von Inbetriebnahme-Technikern getroffen werden, die die sich stets wandelnde Produktstruktur nicht in genügendem Maße überblicken (EVERSHEIM et al. 1990a).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es aus organisatorischer Sicht zwei Stoßrichtungen zur Entlastung der Inbetriebnahme gibt. Zum einen kann das Zusammenspiel aus Mechanik und Software durch eine systematische Entwicklung und zum anderen durch einen Einzel- und Gesamtsystemtest der Software vor der Inbetriebnahme verbessert werden. Die beiden Stoßrichtungen werden durch Standardisierung einerseits und durch Vorabinbetriebnahme andererseits verfolgt.

### **2.2.2 Standardisierung**

Mit dem Ziel, die Inbetriebnahme planbar zu machen, fordert Walenta eine konsequente Strukturierung und Modularisierung der Steuerungs-

software und führt in einem Beispiel eine Reduktion von 20% der Konstruktionszeiten und einen Rückgang der Inbetriebnahmezeiten von 30% an (WALENTA 1990).

Eine gesamtheitliche Betrachtung von Produktionsanlagen hat für Maunderer eine mechanische und softwaretechnische Modularisierung der Anlagen zu Folge. Dies ermöglicht es, die Entwicklung von Mechanik und Software zu parallelisieren und damit die Durchlaufzeit zu verkürzen (MAUDERER 1996).

Abbildung 4 zeigt vereinfacht, wie mit Hilfe einer Bibliothek von standardisierten Elementen schnell Anwendungen für unterschiedliche Projekte zusammengestellt werden können.

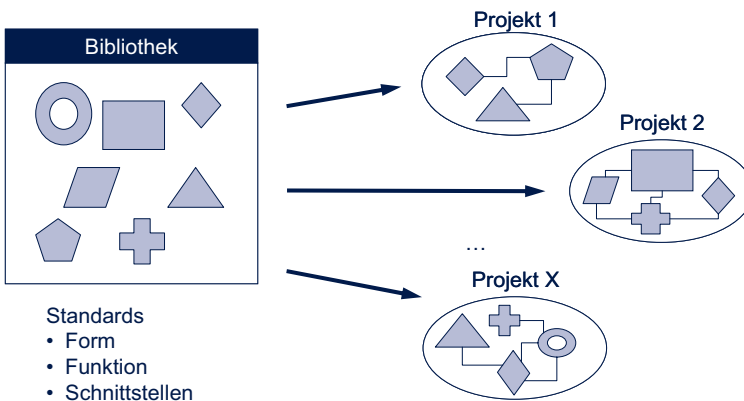


Abbildung 4: Zusammenstellung von Projekten aus einer Bibliothek mit Standards

### 2.2.2.1 Leit- und Zellrechnerebene

Glas beschreibt sein Ziel einer standardisierten Zellrechnersoftware für Montagesysteme unter dem Stichwort der Flexibilität hinsichtlich des Einsatzes, der Anpassbarkeit an neue Produkte, der Stückzahlen, der Redundanz und der Integration. Er teilt dazu die Aufgaben der Informationsverarbeitung in der Zellebene für die Steuerung und Überwachung des Produktionsablaufes in die fünf Funktionsgruppen der dispositiven Funktionen, der operativen Funktionen, der Diagnosefunktionen, der Verwaltungsfunktionen sowie der Kommunikationsfunktionen ein (GLAS 1993, S. 17f). Basierend auf dieser Einteilung hält er die Standardisierung von Zellrechnerfunktionen bei operativen Funktionen für gut möglich, bei dispositiven Funktionen hingegen für kaum möglich, da starke Abhängigkeiten vom betrachteten System vorliegen. Für Diagnose-, Verwaltungs-

und Kommunikationsfunktionen ist eine Standardisierung teilweise sinnvoll, da Abhängigkeiten vorhanden sind (GLAS 1993, S. 56).

### 2.2.2.2 Installationsplanung

Kohring stellt im Rahmen seines Lösungsansatzes die Forderung nach einer systematischen Spezifikation der Steuerungstechnik mit dem Ergebnis eines Pflichtenhefts. Darüber hinaus fordert er einen Leitfaden für das Pflichtenheft eines über Abteilungsgrenzen von Mechanik- und Elektrotechnik konsistenten Entwicklungsprozesses. Dafür schlägt er eine Rechnerunterstützung mit einer serverbasierten Datenbank für die Unterlagenverwaltung vor (KOHRING 1993, S. 56 f.). Diese umfasst eine einheitliche Nummerierung der Komponenten und Baugruppen im mechanischen CAD und den Stromlaufplänen.

Die Ideen von Kohring und anderen in den 90er Jahren wurden erst um die Jahrtausendwende in diversen Projekten umgesetzt. So wurde beispielsweise im Forschungsprojekt *Förderal* eine Methodik und eine Systemplattform für die Standardisierung im Maschinen- und Anlagenbau entwickelt (LITTO 2004). Ziel ist es, die Wiederverwendung von Entwurfsunterlagen, die häufig durch das Kopieren von Dateien aus alten Projekten erfolgt, in eine mechatronische, baukastenbasierte Wiederverwendung zu überführen (siehe Abbildung 5). Dazu ist eine Systemarchitektur entwickelt worden, die es ermöglicht, unterschiedlichste Entwicklungswerkzeuge der verschiedenen Disziplinen der Mechatronik miteinander zu vernetzen. Ein Vorteil dieser Form der Standardisierung liegt in der Vermeidung von Routine-Tätigkeiten, insbesondere von Datenmehrfacheingaben. Außerdem werden eine übersichtliche Strukturierung von Anlagen in einer Datenbasis und die einfache Wiederverwendung von Komponenten ermöglicht. Durch die Ableitung von neuen Lösungen als Rekombination der Elemente bekannter Lösungen wird die Variantenentwicklung effizienter; eine Neuentwicklung wird allerdings durch die Technologie weniger gut unterstützt. Weitere Nachteile sind die langsam voranschreitende Standardisierung und die Generierung redundanter Steuerungsprogrammteile, die zu einer Überdimensionierung der Hardware führt. Mit diesem Ansatz kann die Leistungsfähigkeit der verfügbaren Steuerungstechnik nicht voll ausgereizt werden. Auch die Integration neuartiger Steuerungskonzepte dürfte jeweils Anpassungen des Entwicklungssystems notwendig machen.

Grätz schildert eine Vorgehensweise zur teilautomatischen Ableitung von Stromlauf- und Fluidplänen aus einer funktionalen Beschreibung des mechatronischen Systems (GRÄTZ 2006). Diese beinhaltet die wesentlichen Informationen, die für die Konstruktion von Mechanik, Elektrik und Flu-

idtechnik sowie die Entwicklung von Software benötigt werden. Dadurch werden die inhaltlichen Abhängigkeiten zwischen den Fachbereichen aufgelöst und so die verschiedenen Entwicklungstätigkeiten weitgehend parallelisiert und teilweise automatisiert. Ferner wird über ein Pilotprojekt und einem Softwareprototyp berichtet, in dessen Rahmen die geschilderten Theorien und Vorgehensweisen bei einem Hersteller von Fräsmaschinen in der Praxis der industriellen Anwendung evaluiert wurden.

### 2.2.2.3 Beschleunigung des Produktionsanlaufs

Ziel des Verbundprojektes Ramp-Up/2 ist die Beschleunigung und Verbesserung des Produktionsanlaufs neuer oder rekonfigurierter Fertigungsanlagen im Anwenderwerk ebenso wie beim Anlagenhersteller. Unsicherheiten der Planung werden durch simulative Absicherung und Verifikation der Funktions- und Leistungsfähigkeit der entwickelten Anlage in erforderlichem Maße reduziert. Dabei werden die drei Ebenen Anlage, Maschine und Prozess betrachtet. Auf der Anlagenebene wird die Kopplung von Leittechnik und Simulation vorangetrieben, um komplexe Anlagenabläufe beschleunigen und absichern zu können. Für die Verbesserung der Maschinenebene wird eine leistungsfähige PLC-Simulation (Programmable Logic Controller) entwickelt, welche die systematische Optimierung der PLC-gesteuerten Funktionen an Werkzeugmaschinen ermöglicht. Die abgesicherten Steuerungskonzepte im automatisierten Fertigungsverbund zielen auf eine Senkung der Anlaufkosten und gesteigerte Prozessqualität. Die Arbeitspakete des Forschungsverbunds, die im Bereich der virtuellen Inbetriebnahme bearbeitet werden, sollen eine vollständig virtuelle Abbildung der Maschine bzw. Anlage ermöglichen. Sie umfassen die Kopplung von virtuellem NC-Kern und PLC-Simulation sowie die Entwicklung eines virtuellen Maschinenbedienfeldes (DENKENA et al. 2005).

### 2.2.2.4 Automatisierungstechnik

Schlögl beschreibt den geplanten Ansatz des so genannten *Automation Designer*, mit Hilfe dessen die Aufgaben des Anlagenlieferanten beim Übergang von der digitalen in die reale Fabrik unterstützt werden sollen (SCHLÖGL 2005). Besonders betrachtete Aufgabengebiete umfassen das Engineering und die Konstruktion sowie die Inbetriebnahme der Anlagen, jeweils aus Sicht der Automatisierungstechnik.

Der Übergang von der digitalen Fabrik zur realen Fabrik soll über die virtuelle Inbetriebsetzung (VIBS) in drei Stufen erfolgen: Zunächst sollen in der digitalen Fabrik Geometrie und Abläufe digital abgelegt werden. In



einem zweiten Schritt soll mit Hilfe der VIBS eine virtuelle Absicherung mit digitalen Geometrien und realen Abläufen auf emulierten oder realen Steuerungen erfolgen. Im letzten Schritt wird die Realisierung in Form einer klassischen Inbetriebnahme in der realen Fabrik durchgeführt, bei der die Geometrie und die Abläufe in den realen Systemen vorliegen.

Der Automation Designer besteht aus dem 3D-Layout, dem so genannten *Automation Integrated Layout* sowie der Schaltplan- und SPS-Codegenerierung und der anschließenden virtuellen Inbetriebsetzung der Liniensteuerung mit HMI und MES.

### 2.2.2.5 Automatische Steuerungscodegenerierung

Die Ansätze der beiden vorhergehenden Unterabschnitte streben eine automatische Codegenerierung an. In diesem Unterabschnitt soll auf die Vor- und Nachteile dieser Ansätze eingegangen werden. Die automatische Codegenerierung basiert auf der Standardisierung und Modularisierung von Steuerungssoftware, passend zu einer Gliederung nach mechatronischen Automatisierungskomponenten. Dies bedeutet, dass jeweils mechanischen Elementen, wie beispielsweise einem Förderband, standardisierte Softwarebausteine zur Seite gestellt werden. In diesen ist die immer gleiche Grundfunktionalität, wie beispielsweise für Hand- und Automatikbetrieb bereitgestellte Funktionen sowie grundlegende Routinen zur Störungsbehandlung, integriert. Die Vorteile sind die einheitliche Gestaltung von Steuerungssoftware-Modulen und damit die Generierbarkeit eines Grundgerüsts der Software aus der Anlagenstruktur.

Die Nachteile liegen darin, dass Funktionalität insbesondere im Zusammenspiel von mechanischen Automatisierungskomponenten entsteht und dass diese nicht vollständig durch standardisierte Komponenten abgebildet werden kann (siehe auch Abbildung 5). Im Einzelfall kann das einen erheblichen Änderungsaufwand bedeuten. Ein weiterer Nachteil besteht in der Tatsache, dass der automatisch generierte Code nicht mehr ohne die originale Entwicklungsplattform mit den ursprünglich zur Programmierung verwendeten Modellen verstanden werden kann.

## 2 Grundlagen

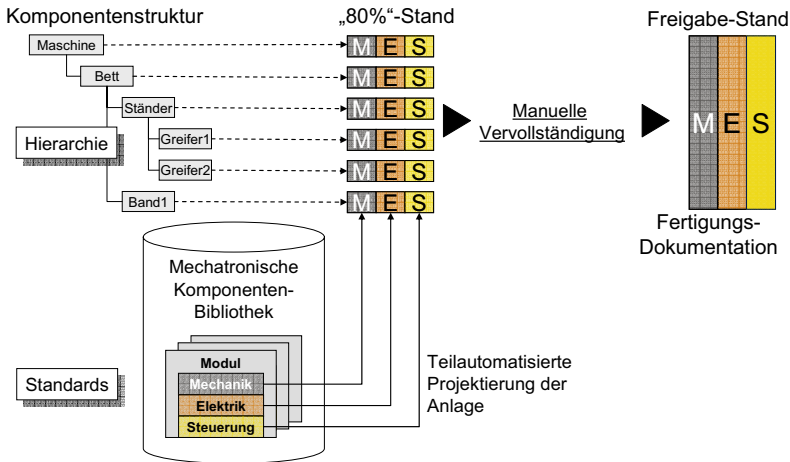


Abbildung 5: Teilautomatisierte Ableitung von Entwicklungsunterlagen und der Steuerungsprogramme mittels einer mechatronischen Standardbibliothek

Damit bleibt eine Reihe von Aufgabenstellungen ungeklärt. Insbesondere müssen für die Instandhaltung die Maschinenmodelle über den Lebenszyklus gepflegt und für jeden Instandhalter derartige Entwicklungsumgebungen in mobiler Form vorgehalten werden.

Ein nicht unwesentlicher Nachteil dürfte in der Überdimensionierung der Steuerungsressourcen durch automatisch aus standardisierten Elementen generierte Software bestehen. Dieser Nachteil wird insbesondere im Serienmaschinenbau bei höherer Stückzahl ins Gewicht fallen, während beim Sondermaschinenbau möglicherweise die erhöhten Hardwarekosten durch verringerte Entwicklungskosten aufgehoben werden.

Einen weiteren Nachteil insbesondere für kleine Unternehmen stellt die Tatsache dar, dass die Entwicklung mechatronischer Standards in einer kontinuierlich gepflegten Bibliothek einen erheblichen Aufwand mit sich bringt und sich nur bei einer hohen Anwenderzahl amortisiert.

### 2.2.3 Vorabinbetriebnahme von Teilsystemen

Koerth teilt den Inbetriebnahmeaufwand bei einer Stückzahl größer als eins in zu wiederholende und nicht zu wiederholende Tätigkeiten ein. Letztere umfassen einen vermeidbaren Teil wie Test und Optimierung von Einzelkomponenten und deren Schnittstellen, während die zu wiederholenden Tätigkeiten einen nicht vermeidbaren Rest an Einstell- und

Justagearbeiten ausmachen (KOERTH 1990). Beim Übergang zu Stückzahl eins könnte der vermeidbare Teil nach Koerth in Form von Vorabprüfungen und der Vorabinbetriebnahme von Baugruppen aus dem kritischen Pfad entfernt werden. Dabei entwickelt er das Rationalisierungspotential aus der geringeren Kapitalbindung des zu prüfenden Objektes im Vergleich zur gesamten Maschine und aus der Vorprüfung von unbekanntem Funktionen, also Neu- und Anpasskonstruktionen.

Das Grundprinzip der Vorabinbetriebnahme oder auch Vorabprüfung lautet nach Gentszke: „Ersetze knappe Ressourcen durch weniger knappe“ (GENTZCKE 1990, siehe auch Abbildung 6). Die Ziele der Vorabinbetriebnahme einzelner Baugruppen sind frühzeitige Fehlererkennung, Vorverlagerung von möglichst vielen Tätigkeiten aus der Endinbetriebnahme, Reduktion des Störungsanteils in der Inbetriebnahme, Verkürzung der Gesamtdurchlaufzeit, Kostensenkung, kürzere Lieferfristen und nicht zuletzt geringere Auslastung des hochqualifizierten und erfahrenen Inbetriebnahme-Personals.

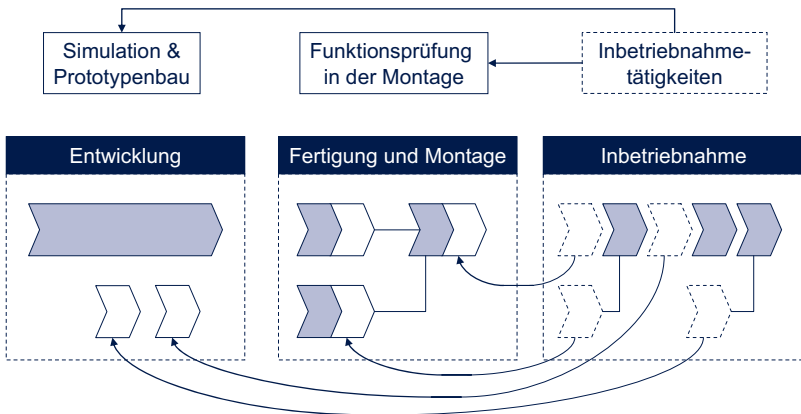


Abbildung 6: Verlagerung von Inbetriebnahmetätigkeiten in die Entwicklung, die Fertigung und die Montage

Für die Vorabinbetriebnahme von Baugruppen ist die Mechanik der zu testenden Baugruppen erforderlich, während restliche Maschinenteile, wie beispielsweise das Bett und die Werkstücke, durch zusätzliche Apparate in einem Prüfstand simuliert werden. Die Kosten für diesen Prüfstand müssen gegen das Risiko abgewogen werden, das ohne Vorabinbetriebnahme besteht. Der Vorteil des Vorgehens der Vorabinbetriebnahme ist eine schnellere Endinbetriebnahme durch getestete Teilmodu-

le, die Nachteile liegen eben im erforderlichen Hardwareaufbau des Teilsystems und an den Schnittstellentests der Teilsysteme, die problematisch oder aufwändig sein können. Ein Gesamtsystemtest ist auf diesem Weg im Vorfeld nicht möglich. Gentzcke stellt hierzu zahlreiche Praxisbeispiele für die Vorabinbetriebnahme von Baugruppen vor, die eine Steigerung der Softwarequalität und eine Einsparung von bis zu 4 Wochen oder 15% der Inbetriebnahmezeiten zum Ergebnis haben.

### **2.2.4 Test von Steuerungssoftware**

In diesem Unterabschnitt werden Möglichkeiten zum Test von Steuerungssoftware beschrieben. Dazu wird zunächst ein Überblick über die Prinzipien des Softwaretests gegeben und im Anschluss weiter auf die einzelnen Vorgehensweisen eingegangen.

#### **2.2.4.1 Grundprinzipien**

Kohring, Grimm und Strassacker teilen die Testverfahren ein in einen Black- und einen White-Box-Test (KOHRING 1993, S. 62, GRIMM 1995, S. 38 ff., STRASSACKER 1997, S. 37 ff.). Diese unterscheiden sich im Wesentlichen darin, dass beim Black-Box-Test die Struktur und Ausführung der Software unbekannt ist, während beim White-Box-Test die Struktur und die Software selbst die Testgrundlage darstellen. Die Unterscheidung kann demnach auch nach der herangezogenen Informationsquelle getroffen werden, und zwar in Funktionstests und Strukturtests von Teilprogrammen und des gesamten Programms.

Beim Black-Box-Test erfolgt die Überprüfung der geforderten Programmfunktionen anhand der Spezifikation aus Benutzersicht. Die Vorteile bestehen in der Ableitung der Testfälle aus der Spezifikation, die Nachteile darin, dass der Programmaufbau nicht berücksichtigt wird und damit nicht alle erreichbaren Programmteile geprüft werden. Außerdem gibt der Black-Box-Test keinen Hinweis auf eine mögliche Fehlerursache. Black-Box-Werkzeuge führen lediglich durch die Einzeltestschritte, also beispielsweise durch die Anforderungsliste oder unterstützen bei der Protokollierung (KOHRING 1993, GRIMM 1995, STRASSACKER 1997).

Im White-Box-Test erfolgt die Auswahl der Testfälle auf Grundlage der Programmstruktur mit dem Ziel, alle Programmzweige zu durchlaufen. Die Vorteile liegen im Erkennen von Implementierungsfehlern, die Nachteile darin, dass nicht feststellbar ist, ob ein Programm alle Anforderungen erfüllt. Falls keine Debugging-Werkzeuge für die Zielplattform existieren, ist eine Instrumentierung des zu testenden Programms mit Debugginganweisungen notwendig. Dies erfolgt zum Beispiel durch Ein-

fügen von Zählern, Ausgaben in Programmschleifen etc. und ist bei der SPS-Programmierung nicht üblich, da die Programmstruktur zu komplex ist.

Kohring schlägt ein Testvorgehen nach dem Black-Box-Test vor, wobei zunächst eine möglichst vollständige Kombination aller möglichen Eingabedaten mit einer Priorisierung nach der 80/20-Regel geprüft wird. Dieser Regel folgend werden nur so viele Kombinationen getestet, dass mit 20% des Gesamtaufwandes 80% des Effektes erreicht werden. Dazu dient das Pflichtenheft als Grundlage für die Testfallgenerierung des simulationsgestützten Softwaretests (KOHRING 1993, S.66 ff.). Aus diesem wird eine Liste der Baugruppenfunktionen und der Maschinenfunktionen mit den Fehlerzuständen erstellt.

Die Auswahl der Testfälle erfolgt nach repräsentativen, schwachstellenorientierten und sicherheitsgerichteten Kriterien. Zu den Testfällen werden jeweils Testdaten ermittelt (KOHRING 1993, S.69), die sich aus Normalwerten mit Grenz- und Falschwerten zusammensetzen. Kohring nimmt dazu eine weitere Einteilung der Testdaten nach Normalablauf und Verhalten im Fehlerfall vor.

Das Ergebnis ist eine Testfall-Checkliste, die bei der Testdurchführung und Testauswertung, analog zur realen Inbetriebnahme, nach der Bottom-up-Strategie durchlaufen wird. Dabei wird das SPS-Programm durch den Benutzer mit Testdaten beaufschlagt und das Steuerungsverhalten protokolliert.

### 2.2.4.2 Syntaxüberprüfung und Kode-Inspektionen

Ein einfaches Beispiel eines White-Box-Tests stellt nach Sossenheimer das Kompilieren und die dabei erfolgende Überprüfung der Syntax dar. Außerdem kann bei der SPS-Programmierung auch eine Simulation im Programmiergerät für den White-Box-Test genutzt werden (SOSSENHEIMER 1989).

Nach Frühauf kann die Behebung von Kodierfehlern, welche erst zum Schluss entdeckt werden, um den Faktor zwei bis drei teurer sein als die Behebung zu Anfang des Entwicklungsprozesses. Aus diesem Grund schlägt er eine Prüfung von SPS-Programmen vor der Inbetriebnahme mit Hilfe von analytischen Methoden vor. Diese sind so genannte Code-Reviews oder auch Kode-Inspektionen und Walkthroughs, mit deren Hilfe bis zu 80% der Fehler bei ca. 25% der Fehlerbehebungskosten aufgedeckt werden können (FRÜHAUF 1990). Da die Überprüfung in diesem Fall manuell erfolgt, ist ein Erfolg wesentlich von der Konzentration und Disziplin der Inspektoren abhängig.

### 2.2.4.3 Knipskasten

Sossenheimer und Kohring beschreiben das Konzept des so genannten Knipskastens, bei dem ein Schaltpult mit Lampen, Tastern, Schaltern, Potentiometern und Analoganzeigen dem Bediener dazu dient, das Maschinenverhalten gegenüber der Steuerung zu simulieren (SOSSENHEIMER 1989, KOHRING 1993). Der Knipskasten wird an die Prozessschnittstelle der Steuerung gekoppelt und visualisiert die Steuerungsbefehle anhand der Lampen und Analoganzeigen, während der Benutzer mit Hilfe der Schalter und Potentiometer Prozessrückmeldungen an die Steuerung simuliert. Die Testintensität ist von der Reaktionsfähigkeit, Konzentration und Geschicklichkeit des Bedieners abhängig. Daher ist der Aufbau stör anfällig und eher für einfache und langsam ablaufende Prozesse geeignet. Auch Walenta fordert mit dem Ziel, die Inbetriebnahme planbar zu machen, eine Prüfung durch Simulation auf einem Prüfstand. Es werden keine weiteren Angaben zur technischen Umsetzung gemacht, die Abbildungen deuten auf den Knipskasten hin (WALENTA 1990). Ein Knipskasten kann als Testbett je nach gewähltem Vorgehen für Black- und White-Box-Tests gleichermaßen genutzt werden.

### 2.2.4.4 Simulation auf dem Zielsystem

Mit Hilfe von Simulation kann der Bediener am Knipskasten durch ein Modell ersetzt werden, das das Maschinenverhalten an der Prozessschnittstelle abbildet. Damit können je nach Leistungsfähigkeit der Simulation auch schnelle und komplexe Prozesse getestet werden.

Bei der Verwendung eines Simulators auf dem Zielsystem erfolgt eine Rückkopplung der zu testenden Software über weitere Programme, die als so genanntes Testbett fungieren. Die zu testende Software läuft in diesem Fall nicht im Zusammenspiel mit der Maschine, sondern in einem durch die Steuerung selbst ausgeführten Software-Testbett. Dabei handelt es sich um ein in der Industrie häufig eingesetztes Mittel, da keine zusätzliche Hard- und Software notwendig ist und außerdem das Simulationsmodell mit dem Zielsystem ins Feld ausgeliefert werden kann. So können Servicetechniker die Simulation bei der Instandhaltung im Feld ohne hohen Zusatzaufwand nutzen.

Chmielnicki beschreibt ein derartiges Vorgehen als eine Variante des Integrationstests, bei dem die Darstellung von Prozessen und Steuerungen in einem Rechner ohne parallelisierte Struktur erfolgt (CHMIELNICKI 1985). Als Beispiel führt er den Fall der Modellierung eines flexiblen Fertigungssystems auf dem Zielsystem an.

## 2.3 Steuerungstechnische Grundlagen

In diesem Abschnitt werden Begriffe definiert, die für das Verständnis und die Beurteilung der Technologien der virtuellen Inbetriebnahme notwendig sind. Dazu zählen die Begriffe *virtuelle Zeitachse*, die *Abtastung* und *Echtzeitfähigkeit*.

### 2.3.1 Virtuelle Zeitachse

Eine so genannte virtuelle Zeitachse kommt bei einem gekoppelten Simulationsmodell zum Einsatz, das aus mehreren Simulationsmodellen zusammengesetzt ist und bei dem die Simulationszeit nicht synchron zur Realzeit des Rechnersystems verläuft (AMANN 1994, STRASSACKER 1997, BAUDISCH 2001). Es gibt verschiedene Ausprägungen einer virtuellen Zeitachse. Diese kann einfach mit einem fixen Faktor gegenüber der Realzeit skaliert sein (STRASSACKER 1997) oder auch eine veränderlich skalierbare Achse darstellen. Die Anwendung ist bei rechenzeitintensiven Simulationsmodellen gegeben, für die die Simulationszeit je nach Rechenaufwand in den gekoppelten Simulationsmodellen verlangsamt werden muss (BAUDISCH 2001). Um die gekoppelten Simulationsmodelle zeitlich zu synchronisieren, wird eine virtuelle Zeitachse eingeführt, anhand derer Modellzustände ausgetauscht werden.

Eine weitere Anwendung sind abstrahierte Modelle, wie beispielsweise Ablaufsimulationsmodelle, bei denen aufgrund des hohen Abstraktionsniveaus abgebildeter Prozesse die Simulationszeit beschleunigt wird. Damit können zur Entscheidungsfindung Simulationsläufe wesentlich schneller als in Realzeit durchgeführt werden.

### 2.3.2 Minimale Abtastrate

Nach Schrüfer muss ein Signal mit mindestens dem Doppelten der höchsten zu beobachtenden Frequenz erfasst werden, um dasselbe nachzuweisen (SCHRÜFER 1992). Für die Beurteilung einer binären Steuerungsreaktion liegt die maximale gesuchte Frequenz bei der halben Steuerungsfrequenz (siehe Abbildung 7, *Wellenlänge*). Kombiniert man beides, so ergibt sich für die Erfassung einer Steuerungsreaktion, dass das Steuerungssignal mindestens mit der Steuerungsfrequenz abgetastet werden muss, um beurteilen zu können, ob die Reaktion der Steuerung korrekt erfolgt ist. Zur Verdeutlichung dieses Zusammenhangs sind in Abbildung 7 für ein binäres Steuerungssignal die drei Fälle einer Abtastung mit jeweils einer Frequenz über der minimalen Abtastfrequenz, einer genau ausreichenden Frequenz und einer ungenügenden Frequenz dargestellt.

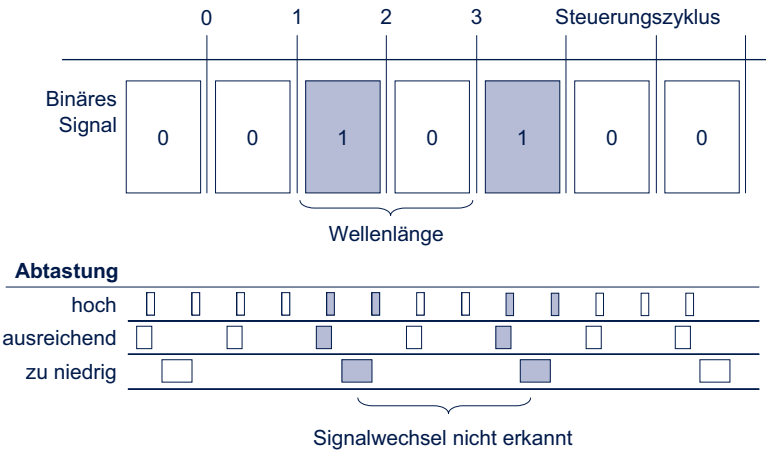


Abbildung 7: Betrachtung der Abtastrate bei der Erfassung von Steuerungsreaktionen

### 2.3.3 Echtzeitfähigkeit

Nach Schnieder liegt bei einem Rechnersystem Echtzeit vor, wenn für alle seine Prozesse die Bedingungen der Gleichzeitigkeit, Rechtzeitigkeit und Vollständigkeit erfüllt sind. Gleichzeitigkeit bedeutet, dass alle Prozesse zumindest aus Sicht einer erforderlichen Abtastrate im Rechner gleichzeitig ablaufen. Rechtzeitigkeit liegt vor, wenn die maximal zulässigen Antwortzeiten der Prozesse nicht überschritten werden. Vollständigkeit liegt vor, wenn alle Prozesse zu jeder Zeit bearbeitet werden, insbesondere unter Einhaltung des Kriteriums der Rechtzeitigkeit (SCHNIEDER 1993).

Engesser und Claus definieren den Begriff Realzeitbetrieb als Alternative zum Begriff Echtzeitbetrieb. „Beim Realzeitbetrieb sind mit der Verarbeitung eines Auftrags strenge Zeitbedingungen verbunden, d. h. die Berechnung der Ergebnisse muss sofort, spätestens innerhalb einer vorgegebenen Zeitschranke, die im Millisekundenbereich liegen kann, abgeschlossen sein“ (ENGESSER & CLAUS 1993).

Kaiser trifft die Feststellung, dass Echtzeitsimulatoren Ergebnisse rechtzeitig, aber nicht zu früh, also in einem Zeitfenster, liefern müssen, was zu unwirtschaftlich hohem Aufwand bei der Modellierung und dem Simulationssystem führen kann (KAISER 1999). Chancen bestehen in der Abtastung des Prozesses durch die Steuerung. Damit ist ein Spielraum zwischen hinreichendem und notwendigem funktionalem Maschinenabbild



gegeben. In diesem Zusammenhang wird eine Differenzierung in weiche und harte Realzeit vorgenommen:

**Harte Echtzeitbedingung:** Die harte Zeitbedingung ist eine Zeitbedingung, bei der ab einem definierten Zeitpunkt die Wahrscheinlichkeit gleich eins ist, dass ein von einem Rechner system berechneter Wert vorliegt. In diesem Zusammenhang liegt harte Echtzeit vor, wenn ein Echtzeitsystem immer alle harten Zeitbedingungen einhält.

**Weiche Echtzeitbedingung:** Eine weiche Zeitbedingung ist eine Zeitbedingung, bei der für einen definierten Zeitraum die Wahrscheinlichkeit nicht gleich eins ist, dass ein von einem Rechner system berechneter Wert vorliegt. Weiche Echtzeit liegt vor, wenn ein Echtzeitsystem alle weichen Zeitbedingungen gemäß den Wahrscheinlichkeiten einhält.

Die Sicherstellung einer harten Echtzeit kann auf zwei Arten erfolgen: Vor dem Entwurf kann ein Rechnersystem derart konstruiert werden, dass das Modell mit einer maximalen Zykluszeit berechnet werden kann. Die Einhaltung der harten Echtzeit kann auch nach dem Entwurf des Systems auf analytischem Weg durch das Messen von Zykluszeiten nachgewiesen werden (KAISER 1999).



### 3 Stand der Technik

Der Begriff *virtuelle Inbetriebnahme* hat sich im Forschungsumfeld der Digitalen Fabrik etwa zur Jahrtausendwende entwickelt und beschreibt ein Vorgehen, das auch in älteren Forschungsansätzen angewandt worden ist. Aus diesem Grund wurden alle Ansätze zum simulationsgestützten Test der Automatisierungstechnik unter diesem Begriff eingeordnet.

#### 3.1 Grundprinzip

Das Grundprinzip der virtuellen Inbetriebnahme von Steuerungssoftware umfasst nach Zäh und Wünsch den Einsatz von Simulation als Testbett mit einer Kopplung an ein Steuerungsmodell oder an die reale Steuerung über das Prozessdatenabbild (ZÄH et al. 2005a, WÜNSCH & ZÄH 2005). Man verfolgt dabei die Vorwegnahme der Steuerungsinbetriebnahme an einem virtuellen Modell der mechanischen, hydraulischen, pneumatischen und elektrischen Bestandteile einer Maschine. An dem Modell können verschiedene Simulationsstudien durchgeführt werden. Wird die virtuelle Inbetriebnahme der Steuerungstechnik parallel zur Fertigung und Montage von Maschinen durchgeführt, können zahlreiche Fehler in der Steuerungssoftware vorab erkannt und beseitigt werden (siehe Abbildung 8).

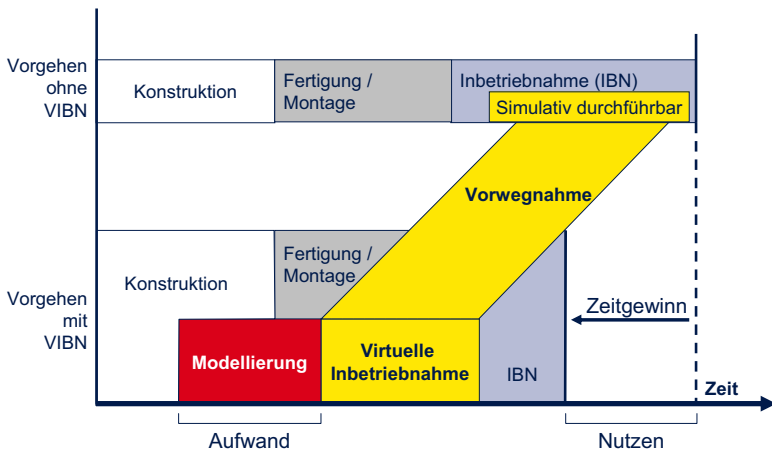


Abbildung 8: Grundidee der virtuellen Inbetriebnahme nach Wünsch & Zäh 2005

Die reale Inbetriebnahme kann daher mit einer qualitativ wesentlich hochwertigeren Steuerungssoftware erfolgen. Das Vorgehen gliedert sich nach Zäh et al. allgemein in drei Schritte,

- den Aufbau eines Maschinenmodells aus den Dokumenten von Mechanik- und Elektrokonstruktion,
- die Abbildung von Steuerketten ausgehend von Steuerungsausgängen über das elektro-mechanische und materialflusstechnische Verhalten bis hin zur Sensorik
- und die Kopplung von Modell und simulierter bzw. realer Steuerungshardware über die Prozessdatenschnittstellen für die VIBN.

Das Grundprinzip lässt sich nach Zäh et al. weiter unterteilen in Ansätze mit virtueller Zeitachse, bei der eine Simulation der Steuerung zum Einsatz kommt, und die Echtzeitansätze, bei denen eine reale Steuerung in einer *Hardware-in-the-Loop-Simulation (HIL-Simulation)* mit einem echtzeitfähigen Modell gekoppelt wird (ZÄH et al. 2005a).

Grundvoraussetzung ist die ganzheitliche Modellierung von Maschine und Prozess. Während der Fertigung und der Inbetriebnahme kann die HIL-Simulation durch die Verifizierung und Validierung realer steuerungstechnischer Komponenten, nämlich von NC und PLC, zur frühzeitigen Fehlererkennung und Optimierung genutzt werden (PRITSCHOW 2002a).

Nach Wagner verändern das 3D-CAD und die Simulation die Konstruktion von Maschinen und erfordern eine neue Prozesskette, bestehend aus den Methoden der Ablaufsimulation von Produktionssystemen, der Offline-NC-Programmierung mit Steuerungsimulatoren oder originalem NC-Kern sowie der Kopplung virtueller Maschinen an die reale Steuerung. Dadurch können letztendlich unnötige Verzögerungen in der Inbetriebnahme mit einer Maschinenablaufsimulation und Störungstests im Labor vermieden werden (WAGNER 2003).

Laut Pfisterer läuft die Steuerungssoftware nach einer virtuellen Inbetriebnahme zu ca. 95% fehlerfrei. Dadurch verkürzen sich die Inbetriebnahmezeiten für eine Blechbearbeitungsmaschine von sechs auf zwei Wochen (PFISTERER 2003).

## 3.2 Einordnung in die Digitale Fabrik

Der Fabrikplanungszyklus nach Westkämper setzt sich aus den Phasen Planung, Umsetzung, Betrieb in der realen Fabrik und anschließender Bewertung zusammen (WESTKÄMPER 2003). Mit den Erkenntnissen aus

dieser Bewertung und möglicherweise geänderten Produktionsprogrammvorgaben wird der Regelkreis anschließend erneut durchlaufen. Da der Regelkreis stets über die reale Fabrik verläuft, ergeben sich hier Zykluszeiten im Bereich von mehreren Jahren, bis Erkenntnisse aus Anlagenrealisierungen in der Neuplanung oder Umplanung Einzug halten.

Um in dem globalisierten und damit turbulenten Umfeld der weltweiten Produktion am Standort Deutschland Schritt halten zu können, wird als Ziel eine schnellere Reaktion der Produktionsplanung auf technische Entwicklungen gefordert. Daraus ergibt sich für Zäh und Reinhart als Teilziel die Nutzung von Methoden und Werkzeugen der virtuellen Produktion für eine virtuelle Inbetriebnahme auf Anlagenebene. Durch die Einführung einer skalierbar detaillierten Realisierung der Produktion im Rechner, also einer virtuellen Inbetriebnahme bis hinunter auf Anlagen-, Zellen- und Maschinenebene, lassen sich Erkenntnisse aus der Inbetriebnahme im Labor vorwegnehmen und in einem schnelleren Regelkreis direkt der Planung zuführen (siehe Abbildung 9, ZÄH & REINHART 2004).

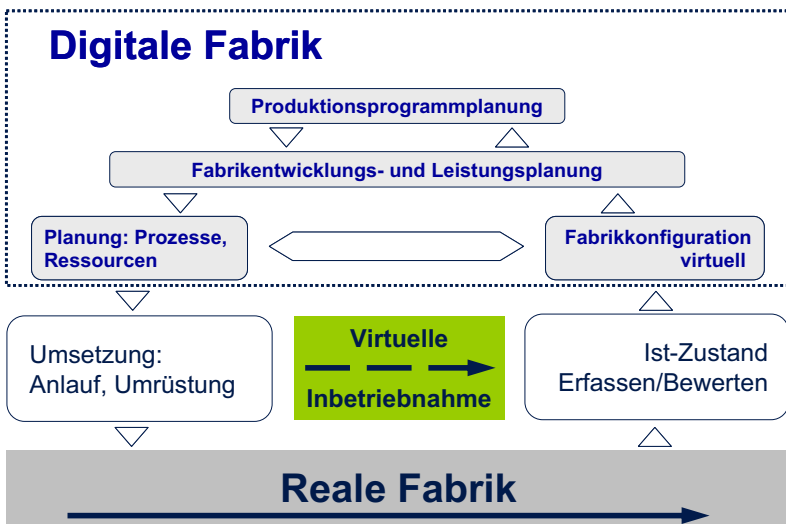


Abbildung 9: Virtuelle Inbetriebnahme als schnelle Rückkopplung im Regelkreis der Digitalen Fabrik nach ZÄH & REINHART (2004)

Breitenbach und Schwab sehen in der virtuellen Inbetriebnahme ein Mittel zur Entschärfung des Risikofaktors Software im Produktionsanlauf (BREITENBACH & SCHWAB 2004). Sie skizzieren die Vision eines funktions- und unternehmensübergreifenden Vorgehens zur Synchronisation eines Produktionsanlaufs. Mit Hilfe des so genannten virtuellen Start-of-

Production (SOP) und der virtuellen Inbetriebnahme werden die beteiligten Partner synchronisiert und ihre Beiträge zum Gelingen eines Projektes validiert.

### 3.3 Begriffsabgrenzung

Aus der Betrachtung der erforderlichen Abtastrate muss beim Steuerungstest die maximale Zykluszeit kleiner als die niedrigste Zykluszeit der zu testenden Steuerung sein, damit die Konsistenz des Gesamtsystems gewahrt wird. Dies gilt für Systeme mit virtueller Zeitachse (siehe Unterabschnitt 2.3.1) in gleichem Maße, wie für den Steuerungstest mit einem echtzeitfähigen Testbett.

Für die Praxis der virtuellen Inbetriebnahme bedeutet die Verletzung der minimalen Abtastbedingung, dass bei einem gestörten Funktionsablauf in der virtuellen Maschine unklar ist, ob der Fehler an einer mangelhaften Modellzykluszeit oder im fehlerhaften Steuerungsprogrammen liegt. Erfahrungsgemäß geht dies mit einer umfangreichen und wenig zielführenden Suche nach der Fehlerursache einher.

Aus diesem Grund wird für diese Arbeit zwischen den Begriffen der virtuellen Inbetriebsetzung und der virtuellen Inbetriebnahme unterschieden. In Tabelle 1 wird der Begriff der virtuellen Inbetriebsetzung definiert:

**Definition: Virtuelle Inbetriebsetzung (VIBS)**

Der Begriff *virtuelle Inbetriebsetzung* bezeichnet die frühe Entwicklung und Überprüfung von Steuerungsabläufen anhand eines Simulationsmodells.

Tabelle 1: *Definition des Begriffes virtuelle Inbetriebsetzung*

Mit der virtuellen Inbetriebsetzung kann für die Konzeptevaluierung in einem frühen Stadium der Entwicklung die sequentielle Richtigkeit eines Gutablaufs in einem einfachen Simulationsmodell geprüft werden. Es wird weder ein Leistungstest noch eine Prüfung auf Störungen und des Störungsverhaltens der Anlage möglich. Die virtuelle Inbetriebsetzung dient einer aufwandsarmen, frühzeitigen Absicherung von Entwicklungen im Konzeptstadium. Dem gegenüber steht der Begriff der virtuellen Inbetriebnahme, der in Tabelle 2 definiert wird:

**Definition: Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN)**

Der Begriff *virtuelle Inbetriebnahme* beschreibt den abschließenden Steuerungstest anhand eines Simulationsmodells, das in der Kopplung von realer oder virtueller Steuerung mit dem Simulationsmodell eine ausreichende Abtastrate für alle Steuerungssignale gewährleistet.

Tabelle 2: Definition des Begriffes „virtuelle Inbetriebnahme“

Die virtuelle Inbetriebnahme ermöglicht die Inbetriebnahme von Steuerungstechnik mit Gutabläufen und Störungsverhalten unter realistischen Bedingungen. Bei einem nicht den Spezifikationen entsprechenden Verhalten der virtuellen Maschine ist aufgrund der Konsistenz eindeutig klar, dass unter der Voraussetzung eines logisch korrekten Modells ein Fehler in der Maschinenkonstruktion vorliegt, also in der Steuerung, der Elektrik oder der Mechanik.

### 3.4 Untersuchte Merkmale

Für die Analyse des Standes der Technik im Bereich der virtuellen Inbetriebnahme werden die wesentlichen Merkmale der Ansätze aufgenommen und verglichen. Die betrachteten Merkmale umfassen das Umfeld des Ansatzes, die Art der Simulationszeitbasis, die Modellierungssprachen bzw. -werkzeuge, die abgedeckte Automatisierungstechnologie, Referenzprojekte, die Produktionsebene der Steuerung sowie das Vorhandensein eines Vorgehens bzw. einer Methodik und werden im Folgenden erläutert.

#### **Merkmal *Umfeld***

Mit diesem Merkmal wird festgehalten, ob der Ansatz aus der Forschung stammt oder aus der direkten industriellen Anwendung. Daraus lässt sich ableiten, ob ein Ansatz ein gewisses Maß an wirtschaftlicher Anwendbarkeit erreicht hat.

#### **Merkmal *Simulationszeitbasis***

In diesem Merkmal wird die Größenordnung der dem Ansatz zu Grunde liegende Simulationszeitbasis berücksichtigt. Mit einer Betrachtung der minimalen Abtastrate (siehe Unterabschnitt 2.3.2) lässt sich von der Simulationszeitbasis auf die maximale Frequenz der auf der Steuerung testbaren Vorgänge schließen. Der Wertebereich wurde in vier Stufen eingeteilt und erstreckt sich von der Verwendung einer so genannten virtuellen Zeitachse über die Simulationszeitbasen von 100, zehn und einer Millisekunde. Eine virtuelle Zeitachse bedeutet dabei nach Strassacker, Denkena

und Baudisch (DENKENA et al. 2001, BAUDISCH 2001, MILBERG 1992) eine dehnbare Zeitachse, die je nach Ereignisdichte oder Rechenaufkommen in der Simulation gegenüber der realen Zeit gedehnt wird. Dadurch kann zum einen ein Simulationsmodell wesentlich beschleunigt werden, zum anderen kann bei sehr komplexen Rechnungen mehr Rechenleistung aufgewendet werden. Modelle mit virtueller Zeitachse sind in der Regel nicht echtzeitfähig. Für echtzeitfähige Modelle kann eine Zykluszeit angegeben werden, innerhalb derer spätestens die nächstfolgenden Rechenergebnisse zur Verfügung stehen. In der Produktionstechnik erfüllen jeweils echtzeitfähige Modelle mit einer Zykluszeit in der Größenordnung von 100 ms jeweils die Bedingungen für die Ebene der Leitsysteme, Modelle mit zehn ms die der Zellen- und Maschinenebene und Modelle mit einer ms die für Bahnsteuerungen. Damit kann über die garantierte Simulationszeitbasis eines Echtzeitsimulationssystems die Eignung für die virtuelle Inbetriebnahme des betrachteten Systems beurteilt werden.

#### **Merkmal *Modellierungssprache***

Dieses Merkmal listet die eingesetzten Modellierungssprachen und -werkzeuge auf, aus deren Verbreitung in der Ausbildung von Fachpersonal zum einen die Handhabbarkeit des Ansatzes in der industriellen Praxis entscheidend ermittelt werden kann. Zum anderen lässt sich aus der Modellierungssprache und den eingesetzten Werkzeugen auf die Vollständigkeit der im Modell abgebildeten Effekte schließen. Mit der Vollständigkeit der Abbildung von Effekten ist wiederum die maximal erreichbare Testtiefe begrenzt. Der Wertebereich umfasst die strukturierte und die objektorientierte Modellierung, graphische Automaten, Ereignisdiskrete Materialflusssimulation, 3D-Kinematiksimulation mit Kollisionsrechnung, die Modellierung über regelungstechnische Blockschaltbilder sowie mechanische Modelle wie Mehr-Körper-Systeme (MKS), Modelle gemäß der Finite-Elemente-Methode (FEM) und Prozessmodelle.

#### **Merkmal *Automatisierungstechnologie***

Mit diesem Merkmal wird die mit dem Ansatz testbare Steuerungs- und Automatisierungstechnik festgehalten. Der wesentlich bestimmende Faktor ist dabei die Integration des jeweiligen Automatisierungssystems in die virtuelle Umgebung. Die Integration kann entweder durch Emulation des Systems auf einem Rechner oder durch die Kopplung des realen Systems an die virtuelle Umgebung erfolgen. Der Wertebereich für dieses Merkmal erstreckt sich über die Integration von Leitsteuerungssystemen bzw. Manufacturing Execution Systems (MES), Human Machine Interfaces (HMI), die Emulation speicherprogrammierbarer Steuerungen (SPS), die Anbindung realer SPS-Hardware, die Integration realer Feldbustechnologie bis hin zur Integration von Roboter Steuerungen (RC) und Computerized Numerical Controls (CNC). Mit der Ausprägung diesem



Merkmal lässt sich die Anwendbarkeit des betreffenden Ansatzes auf produktionstechnische Inbetriebnahme-Probleme aus Sicht der Informationstechnologie beurteilen.

#### **Merkmal *Referenzprojekte***

In diesem Merkmal wird die Zahl der veröffentlichten Referenzprojekte aufgeführt. Diese Zahl kann zur Beurteilung des Reifegrades hinzugezogen werden. Eine hohe Zahl von Referenzprojekten deutet zum einen darauf hin, dass es einen breiten Erfahrungsschatz und zum anderen eine solide Anwenderbasis für den Ansatz gibt.

#### **Merkmal *Produktionsebene der Steuerung***

Mit diesem Merkmal werden die Steuerungsebenen aus dem produktionstechnischen Ebenenmodell festgehalten, die durch den Ansatz abgedeckt werden. Dies bedeutet, dass Steuerungen aus den aufgelisteten Ebenen mit Hilfe des betreffenden Ansatzes virtuell in Betrieb genommen werden können. Der Wertebereich erstreckt sich über die fünf Ebenen der Produktion nach MILBERG (1992): Planungsebene, Leitebene, Zellebene, Maschinenebene, Prozessebene. Die Ausprägung dieses Merkmals gibt Auskunft darüber, wie flexibel die Anwendung des Ansatzes bezüglich eines beliebigen Inbetriebnahmeszenarios ist.

#### **Merkmal *Vorgehen bzw. Methodik***

In diesem Merkmal wird das Vorhandensein eines Vorgehensmodells bzw. einer Methodik bei dem jeweiligen Ansatz beurteilt. Damit lassen sich die Einsetzbarkeit und die Reife eines Ansatzes für Inbetriebnahmeszenarien abschätzen. Der Wertebereich dieses Merkmals erstreckt sich von Methoden zur Modellierung über das Projektmanagement, die virtuelle Inbetriebsetzung bis hin zur Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme. Das Vorhandensein eines systematischen Modellierungsvorgehens erleichtert die Modellerstellung. Unter einer Methodik für das Projektmanagement wird hier eine Richtlinie oder ein Leitfaden verstanden, der es dem Leiter eines Inbetriebnahmeprojektes erlaubt, systematisch die Elemente eines Produktionssystems zu identifizieren, die für eine virtuelle Inbetriebnahme relevant sind. Es wird zudem bewusst zwischen einem Vorgehen für die virtuelle Inbetriebsetzung und für die virtuelle Inbetriebnahme unterschieden, da die Erwartungen an die Softwarequalität fundamental unterschiedlich sind (siehe auch Unterabschnitt 3.3).

In den folgenden Unterabschnitten werden die bekannten Ansätze für die virtuelle Inbetriebnahme aufgeführt, gegliedert nach dem Merkmal *Simulationszeitbasis*, beginnend mit Ansätzen im Bereich *virtuelle Zeitachse*. Ansätze, die mehrere Zeitbasen darstellen können, werden der kleinsten, unterstützten Zeitbasis zugeordnet.

### 3.5 Ansätze mit virtueller Zeitachse

In diesem Abschnitt sind die Ansätze zusammengefasst, bei denen ein Vorgehen mit rein virtueller Zeitachse gewählt wurde. Die Vorteile der Simulation mit virtueller Zeitachse liegen zum einen in der Möglichkeit, beliebig komplexe Modelle in die Simulation einzubinden, zum anderen in der Möglichkeit, die Simulation schneller als in Echtzeit ablaufen zu lassen. Der wesentliche Nachteil besteht in der mangelnden Verfügbarkeit exakter Steuerungsmodelle.

#### 3.5.1 Osmers 1998

Mit seinem Ansatz einer Virtual-Reality-SPS-Programmierungsumgebung führt Osmers die Arbeiten von Weule fort (OSMERS 1998, WEULE et al. 1994, siehe Unterabschnitt 3.5).

Die Programmierung erfolgt durch die Definition von Sensorik und Aktorik in der Virtual-Reality-Umgebung und durch Verknüpfung der Sensorik mit der Aktorik. Aus den Verknüpfungen kann ein ablauffähiger Pseudocode abgeleitet werden. Osmers entwickelt dazu das Konzept einer so genannten Virtual Programmable Logic Control (kurz VPLC), also einer simulierten SPS, die den SPS-Pseudocode interpretiert. Die VPLC wird in die VR-Umgebung integriert und erlaubt damit die graphische Programmierung von SPS-Software. Bei einem Pseudocode handelt es sich um IEC-1131-konforme SPS-Programme, die prinzipiell durch Kompilieren in ausführbare Programme für reale Steuerungen überführt werden können.

In Tabelle 3 sind die für die virtuelle Inbetriebnahme relevanten Merkmale des Ansatzes zusammengefasst:

Merkmal	Osmers 1998
Umfeld	Forschung
Simulationszeitbasis	Virtuelle Zeit
Modellierungssprachen	3D-Kinematik, Strukturierte Modellierung
Automatisierungstechnik	SPS-Emulation
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Maschinenebene
Methodik	Erzeugung des Gutablaufs

Tabelle 3: Merkmale des Ansatzes von Osmers 1998

Osmers' Hauptbetrachtungsebene ist die Maschinenebene, für die er eine Methodik zur Ableitung des Gutablaufs eines SPS-Programms aus einer 3D-Kinematiksimulation vorstellt.

### 3.5.2 Baudisch und Denkena 2001

Baudisch stellt eine Simulationsumgebung vor, die aus dem Simulationswerkzeug SimPACK für Mehr-Körper-Systeme, Matlab/SIMULINK für die Simulation von Regelkreisen und dem NC-Steuerungssimulator Siemens Virtual-NCK besteht. Er beschreibt dazu seine Kopplung der virtuellen NC ohne PLC-Funktionalität mit dem Mehr-Körper-System einer 3D-Kinematiksimulation zur Visualisierung (BAUDISCH 2001).

Das Ziel des Ansatzes ist die Beschreibung und Simulation des mechatrischen Verhaltens einer Produktionsmaschine bestehend aus Mechanik, Elektrotechnik, Elektronik und Informationsverarbeitung. Damit können bereits in den frühen Phasen der Entwicklung mit Hilfe eines virtuellen Prototyps Erkenntnisse gewonnen werden, die zur Verkürzung des Entwicklungsprozesses genutzt werden können. Denkena erweitert Baudischs Ansatz um die Einbindung einer virtuellen SPS (DENKENA et al. 2001).

Die Integration von Simulation des Mehrkörpersystems, Kinematiksimulation, regelungstechnischer Simulation, virtueller SPS und virtueller NC erfolgt mittels DCOM-Technologie der Firma Microsoft. Die für die virtuelle Inbetriebnahme interessanten Merkmale sind in Tabelle 4 aufgeführt:

Merkm <sup>al</sup>	Baudisch und Denkena 2001
Umfeld	Forschung
Simulationszeitbasis	Virtuelle Zeitachse
Modellierungssprachen	Regelungstechnische Blockschaltbilder, 3D-Kinematik, MKS
Automatisierungstechnik	SPS und CNC
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Maschinen- und Prozessebene
Methodik	-

Tabelle 4: Merkmale des Ansatzes von Baudisch und Denkena 2001

Der Vorteil dieses Ansatzes besteht in der Möglichkeit, domänenspezifische Simulationswerkzeuge einzusetzen und miteinander zu koppeln. Durch den Ansatz der virtuellen Zeitachse können auch aufwändige Modelle genutzt werden, da sich die Zeitachse nach Rechenaufwand dehnen lässt. Für die Taktzyklen, innerhalb derer die unterschiedlichen Modelle gegenseitig Daten austauschen, wird ein Wert von 100 Millisekunden virtueller Zeit angegeben. Die im Ansatz bemühte virtuelle Steuerung ermöglicht es, NC-Programme auf syntaktische Korrektheit sowie Kollisionsfreiheit im Arbeitsraum zu prüfen (HAMM & MENZEL 2004).

### 3.5.3 Dietrich 2002

Dietrich beschreibt eine gekoppelte Werkzeugumgebung, die eine Simulation von Werkzeugverformung und Materialabtrag beim Fräsen ermöglicht. Er geht dabei auf die Systemkopplung zwischen dem Prozessmodell für das Fräsen und der Werkzeugverformung ein und schlägt über die Verwendung zur Auslegung von Maschine, Werkzeug und Prozess hinaus auch die Nutzung für die Implementierung neuer Steuerungsalgorithmen im Rahmen einer simultanen Kopplung zwischen Bearbeitungsprozess und Simulation vor. Durch die Möglichkeit, mit Hilfe der Simulation die Werkzeugverformung und den daraus resultierenden Materialabtrag zu simulieren, könnten neue Steuerungsalgorithmen mit simulativer Look-ahead-Funktion realisiert werden (DIETRICH et al. 2002).

Außerdem können mit Hilfe der Simulationsumgebung die NC-Programme vor dem Einsatz an der Maschine virtuell getestet werden. Im Rahmen einer virtuellen Inbetriebnahme der Maschinensteuerung können damit NC-Bahnsteuerungsalgorithmen auf Bahngenauigkeit und Optimierung der Prozessdauer hin untersucht werden. In Tabelle 5 sind die Merkmale des Ansatzes von Dietrich aufgelistet.

Merkmals	Dietrich 2002
Umfeld	Forschung
Simulationszeitbasis	Virtuelle Zeitachse
Modellierungssprachen	MKS, FEM, Prozesssimulation
Automatisierungstechnik	CNC
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Prozessebene
Methodik	-

Tabelle 5: Merkmale des Ansatzes von Dietrich 2002

Der Ansatz bindet Simulationsmodelle aus MKS, FEM und der Prozesssimulation über eine virtuelle Zeitachse in eine Simulationsumgebung mit einer virtuellen NC ein. Bei dem angegebenen Beispiel handelt es sich um eine NC, die auf Prozessebene virtuell in Betrieb genommen wurde. Es wurde keine Methodik zum Vorgehen bei der Modellierung oder dem Steuerungstest angegeben.

## 3.6 Echtzeitansätze auf Prozessebene

In diesem Abschnitt sind die Ansätze mit einer Echtzeitsimulation zusammengefasst, die zur Anwendung bis herunter auf die Prozessebene

geeignet sind und mit einer Zykluszeit in der Größenordnung von einer Millisekunde arbeiten. Der Vorteil ist der realitätsnahe Test von Steuerungs- und Regelungssystemen. Der Nachteil liegt in der starken Beschränkung der Simulationsmodelle im Hinblick auf ihre Größe durch die jeweils maximal verfügbare Rechenleistung bzw. Bandbreite.

### 3.6.1 Meier und Kreusch 2000

Meier und Kreusch schlagen die Nutzung von 3D-Simulation zur schnellen, sicheren und kostengünstigen Inbetriebnahme von Maschinen und Anlagen trotz steigender Komplexität der Steuerungs- und Automatisierungssysteme vor (MEIER & KREUSCH 2000). Sie verwenden den Begriff einer virtuellen Werkzeugmaschine für ihre Kopplung eines Echtzeitsimulators mit realer CNC-Hardware. Mit dem Echtzeitsimulator auf Basis des Betriebssystems VxWorks kann eine Zykluszeit von unter 4ms für die gleichzeitige Darstellung von drei NC-Achsen erreicht werden. Die Modelle der Achsen werden in Matlab/SIMULINK aus Messdaten abgeleitet und in Echtzeitcode umgewandelt, der auf dem Echtzeitrechner lauffähig ist. Die Kopplung zwischen Lageregelkreisen und Modell erfolgt über spezielle Interface-Karten. Zusätzlich können digitale Signale für Peripheriebaugruppen zwischen Steuerung und Simulationsmodell ausgetauscht werden.

Es wird außerdem die Kopplung einer 3D-Visualisierung in AnySIM über TCP/IP an die Echtzeitsimulation beschrieben. Diese lässt allerdings nur eine qualitative Aussage zu; ein quantitativer Vergleich zwischen Soll- und Ist-Bahn ist nur im Nachgang aufgrund von Protokollen der Lageregelkreise in der Echtzeitsimulation möglich.

Durch die Portierung des Systems auf Java kann von einer Simulation in Echtzeit auf eine Simulation mit einer virtuellen Zeitachse übergegangen werden. Die virtuelle Maschine wird in einem Browser mit 3D-VRML-Plugin dargestellt, während ein Java-Applet als CNC-Kern mit typischer Bedienoberfläche die Bewegungen der virtuellen Maschine steuert.

Das Fazit von Meier und Kreusch ist, dass Echtzeitsimulation als sinnvolles Hilfsmittel zur realitätsnahen und sicheren Vorabinbetriebnahme von Steuerungssystemen an Werkzeugmaschinen genutzt werden kann. Die für die virtuelle Inbetriebnahme wesentlichen Merkmale sind in Tabelle 6 zusammengefasst:

Merkmal	Meier und Kreusch 2000
Umfeld	Forschung
Simulationszeitbasis	Virtuelle Zeitachse, 100, 10 und 1 ms
Modellierungssprachen	Regelungstechnische Blockschaltbilder, 3D-Kinematik
Automatisierungstechnik	SPS und CNC
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Maschinen- und Prozessebene
Methodik	-

Tabelle 6: Merkmale des Ansatzes von Meier und Kreusch 2000

#### 3.6.2 Bender et al. 1995-2003

Die Forscher um Bender haben sich unter anderem im Rahmen des SEMI-Projektes intensiv mit der Echtzeitsimulation für den Vorabtest von Steuerungssoftware beschäftigt (BENDER & KAISER 1995, KRANZ 1995, BENDER et al. 1996, SCHAICH 1996, SCHULLERER 1998, ALBERT & TOMASZUNAS 1998, ALBERT 1998, Bender 1999, KAISER 1999, KOÇ et al. 2002).

Bender und Kaiser schlagen im Rahmen des SEMI-Projektes einen automatisierten Test von Steuerungssoftware bei der Steuerungs-Inbetriebnahme am virtuellen Modell vor. Sie verfolgen dabei das Ziel, die Qualität zu steigern und den herrschenden Zeitdruck zu verringern (BENDER & KAISER 1995). Zur Abbildung intelligenter Peripherie soll hierbei die so genannte Maschinenemulation eingesetzt werden, um mikroelektrische Geräte an der Schnittstelle zur Steuerung darzustellen.

Schaich beschreibt die Emulation einer Maschine am E/A-Prozessabbild, wodurch die Inbetriebnahme der originalen Steuerungssoftware am Simulationsmodell der Maschine ermöglicht wird. Es wird das Beispiel eines Transferstraßenherstellers dargestellt (SCHAICH 1996, S. 84). Dabei konnten 80% Zeiteinsparung beim Programmtest durch Simulation erreicht werden, darüber hinaus eine Verkürzung der Gesamtinbetriebnahmezeit von ca. 60%.

Die Simulationsumgebung setzt sich aus skalierbarer Hardware zusammen, die aus einem Bedien-PC mit Echtzeitbetriebssystem, einer Echtzeitrechnerkarte und E/A-Karten zur Kopplung an die Steuerung zusammen. Die Kopplung gestaltet sich bei umfangreichen Maschinen aufwendig, da die Signale einzeln verdrahtet werden. Deshalb schlägt er eine Busankopplung für größere Maschinen anstelle der direkten E/A-Verkabelung vor. Er beschreibt das Problemfeld der Modellierung intelligenter Aktorik bzw. Sensorik, bei deren Einsatz die Grenze zwischen Steuerung und Maschinenperipherie zunehmend verschwimmt.

Er skizziert das Vorgehen zur schrittweisen Inbetriebnahme größerer, dezentral automatisierter Anlagen der Simulation. Dabei wird allerdings davon ausgegangen, dass grundsätzlich eine gesamte Anlage mit Hilfe der Simulation vorab in Betrieb genommen wird. Eine Methode zur Abschätzung, für welche Elemente einer großen Anlage eine Vorabinbetriebnahme rentabel durchgeführt werden kann, wird nicht angegeben. Im Weiteren nennt er zusätzliche Einsatzmöglichkeiten seines Systems zur Fernwartung und zur Schulung des Bedienpersonals.

Tomaszunas beschreibt auf Basis dieser Vorarbeiten einen Ansatz zur aufwandsarmen Maschinenmodellierung auf höherer Ebene (TOMASZUNAS 1998). Dazu wird eine Methodik zur vereinfachten Maschinenmodellierung ausgearbeitet, die die Nachbildung des Prozessgutes mit dem Materialfluss, die Nachbildung stochastischer Vorgänge, die Nachbildung intelligenter Komponenten und die skalierbare und offene Ankopplung ermöglicht.

Als Methode für die komponentenbasierte Modellierung wird ein dreiphasiger Prozess skizziert (TOMASZUNAS 1998, S. 41):

- **Phase 1:** Maschinenanalyse mit dem Ergebnis einer allgemeinen Beschreibung der Struktur und der Komponenten einer Maschine
- **Phase 2:** Modellierung der Komponenten mit dem Ergebnis einer Modulbibliothek
- **Phase 3:** Maschinenkonfiguration aus der Komponentenbibliothek mit dem Ergebnis einer virtuellen Maschine

BENDER & ALBERT (1999) fassen die Arbeiten des SEMI-Projektes zusammen und entwickeln dazu ein Vorgehensmodell, bestehend aus dem Vorgehen zur Modellierung nach Tomaszunas (TOMASZUNAS 1998, S. 41) und einem skizzierten Vorgehen zum Testen des SPS-Programms. Zunächst wird das Maschinenmodell beobachtet und beeinflusst. In einem weiteren Schritt können die E/A-Signale an der Steuerung beobachtet und beeinflusst werden. Sie beschreiben vier Anwendungsbeispiele für die Ergebnisse des SEMI-Projektes, darunter Präzisionsmaschinen und Transferstraßen mit einer stark materialflusslastigen Problemstellung.

Koç beschreibt neben dem Vorgehen zum Vorabtest von Steuerungssoftware mittels Echtzeitsimulation auch eine qualitative Aufwand-Nutzen-Betrachtung. Dabei wird die Sachlage in Wirkposten, Einflussfaktoren und Wirkregeln unterteilt (KOÇ et al. 2002). Die Wirkposten sind die Aufwände und der Nutzen. Einflussfaktoren bestehen in der Bewertung der Höhe der Aufwände bzw. des Nutzens. Ein System von Wirkregeln wiederum verknüpft in Form einer Matrix die Einflussfaktoren durch deren Auswirkungen mit den Wirkposten anhand einer fünfstufigen Skala.

Xu stellt fest, dass der simulationsgestützte Steuerungstest häufig ein Einzelprojekt ist und nicht durchgängig in die Abläufe integriert wird (XU 2003, S. 3). Er leitet davon den Handlungsbedarf ab, dass die Modellierung effizienter gestaltet werden muss. Deshalb widmet er sich der Unterstützung der Wiederverwendbarkeit von Simulationsmodellen für den Steuerungstest durch Modularisierung in einer Komponentenbibliothek. Aus dieser Bibliothek können Module entnommen, ggf. adaptiert und zu einem Simulationsmodell konfiguriert werden. Die Merkmale des von Bender et al. entwickelten Ansatzes sind in der Tabelle 7 aufgeführt:

<b>Merkmal</b>	<b>Bender et al. 1995-2003</b>
Umfeld	Forschung
Simulationszeitbasis	Echtzeit, 100, 10 und 1 ms
Modellierungssprachen	ROOM, graphische Automaten, regelungstechnische Blockschaltbilder,
Automatisierungstechnik	SPS und CNC
Referenzprojekte	4
Produktionsebene	Zell- und Maschinenebene
Methodik	-

Tabelle 7: Merkmale des Ansatzes von Bender et al. 1995-2003

#### 3.6.3 Scheifele und Röck 2004

Scheifele, Röck und Broos arbeiten im Rahmen des SimCAT-Projektes an einem speziellen Ansatz zur Simulation von Werkzeugmaschinen. Ziel des Forschungsprojektes ist eine integrierte Simulationsumgebung für die Optimierung und Berechnung von Werkzeugmaschinen in drei Schritten. In einem ersten Schritt geht es um die Analyse und Optimierung der Maschine im Frequenzbereich hinsichtlich der Eigenfrequenzen und Nachgiebigkeitsfrequenzgänge. Im zweiten Schritt wird die Kopplung eines reduzierten Modells mit einer simulierten NC angestrebt, die der Sollwertvorgabe für Untersuchungen im Zeitbereich dient. Im letzten Schritt wird die Simulation in Echtzeit durchgeführt. Bei den in der Simulationsumgebung berücksichtigten Effekten handelt es sich um Kinetik, Kinematik, Strukturmechanik, Prozesskraftmodelle, Reglerverhalten und die Steifigkeit des Antriebssystems (SCHEIFELE & RÖCK 2004, BROOS 2005).

Scheifele und Röck beschäftigen sich dabei mit dem dritten Schritt, der Hardware-in-the-Loop-NC-Prozesssimulation (SCHEIFELE & RÖCK 2004). Sie nutzen eine Echtzeitkopplung der realen Steuerung mit einer virtuellen Maschine auf Basis einer Echtzeitsimulation mit einem Echtzeitbetriebssystem. Die virtuelle Maschine besteht aus der realen Steuerung, dem Reglermodell und dem Modell der mechanischen Regelstrecke. Die Modellierung der Regler erfolgt in der regelungstechnischen Simulation



Matlab/SIMULINK, wobei die Regelstrecke als reduziertes FEM-Modell integriert wird.

Sie schlagen ihre HIL-Simulation zur Lösung mehrerer Problemstellungen vor, die anhand von konkreten Anwendungsbeispielen beschrieben werden. Diese umfassen den Test von Bahnregelungsalgorithmen, HSC-Freiformflächenalgorithmen, eines Parallelantriebes einer Gantrybrücke mit einer Änderung von Massenträgheitsmomenten und Transportapplikationen.

In einem Vergleich der Simulationsumgebung mit einer Testumgebung, die eine Vielzahl verschiedener realer Antriebe aufweist, nennen sie die Vorteile eines verringerten Kostenaufwandes und eines verringerten Platzbedarfes. Scheifele und Röck nennen als Einsatzgebiete des entwickelten Simulators für Steuerungshersteller sowie Maschinenhersteller und -anwender die Entwicklung, die Inbetriebnahme, die Schulung, den Vertrieb und die Arbeitsvorbereitung (SCHEIFELE & RÖCK 2004).

Die für die virtuelle Inbetriebnahme interessanten Merkmale des Ansatzes sind in Tabelle 8 zusammengefasst:

<b>Merkmal</b>	<b>Scheifele, Röck und Broos 2004</b>
Umfeld	Forschung
Simulationszeitbasis	Echtzeit, 100, 10 und 1 ms
Modellierungssprachen	Strukturierte Modellierung, regelungstechnische Blockschaltbilder, 3D-Kinematiksimulation, FEM
Automatisierungstechnik	SPS-Emulation und CNC
Referenzprojekte	8
Produktionsebene	Maschinen- und Prozessebene
Methodik	-

Tabelle 8: Merkmale des Ansatzes von Scheifele, Röck und Broos 2004

### 3.7 Echtzeitansätze auf Maschinenebene

In diesem Abschnitt sind alle Ansätze auf Maschinenebene zusammengefasst. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass Simulationszykluszeiten in einer Größenordnung von zehn Millisekunden erreichbar sind.

#### 3.7.1 Qin 2005

Qin stellt einen komponentenbasierten Ansatz für den Entwurf, die Simulation sowie die Umsetzung von verteilten Steuerungssystemen mit dem Ziel einer gesteigerten Rekonfigurierbarkeit des Produktionssystems vor

(QIN et al. 2005). Dazu verfolgt er das aus der PC-Welt bekannte Plug-and-play-Prinzip. In einem ersten Schritt wird Sensorik in eine 3D-Repräsentation des Produktionssystems eingebettet. Damit muss die Logik der 3D-Welt nicht nachprogrammiert werden.

Die Steuerung ebenfalls zu einem integralen Bestandteil des Maschinenentwurfs und modular hierarchisch in die 3D-Welt eingefügt. Er berichtet in diesem Zusammenhang von dem Problemfeld unterschiedlicher Komponentenhierarchien in Mechanik und Steuerungstechnik, die die Strukturierung eines Modells nach seinem Prinzip erschweren.

In der Mechanik ergänzen sich je nach Montagestruktur Bauteile zu Baugruppen, während in der Steuerungstechnik logische Funktionsgruppen aufgebaut werden. Deshalb ist es schwierig, Entsprechungen zwischen mechanischen und steuerungstechnischen Komponenten zu finden.

Es wird eine Kopplung zu einer Maschinensteuerung erwähnt, es bleiben allerdings Fragen zu deren Echtzeitfähigkeit bzw. Zykluszeit und Bandbreite ungeklärt. Konsistenzfragen im Bereich der verteilten Steuerungsmodellierung werden ebenso wenig behandelt wie die Abbildung der Maschinenelektrik, der Sicherheitstechnik und des Materialflusses.

In Tabelle 9 sind die Merkmale des Ansatzes von Qin zusammengefasst.

Merkmal	Qin 2005
Umfeld	Forschung
Simulationszeitbasis	Virtuelle Zeit, Echtzeit 100 ms
Modellierungssprachen	3D-Kinematik
Automatisierungstechnik	SPS-Emulation, reale SPS
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Zellebene, Maschinenebene
Methodik	Modellierung

Tabelle 9: Merkmale des Ansatzes von Qin 2005

#### 3.7.2 Dierßen 2002

Dierßen beschreibt seinen Ansatz einer virtuellen Maschine, die aus der Dreiteilung in Steuerung, Echtzeitssimulation und Visualisierung aufgebaut wird (DIERSSEN 2002). Dabei führt er drei Kopplungsvarianten auf, die zum Einsatz kommen können, nämlich die Steuerungssimulation, die Steuerungsemulation und die Integration der realen Steuerung.

Bei der Steuerungssimulation wird die Steuerung nachgebildet und mittels Pseudocode programmiert. Die Vorteile sieht er in der leichten Einbindbarkeit in die Simulationssysteme. Bei der Steuerungsemulation

handelt es sich um eine Portierung der originalen Steuerungsfirmware auf den PC. Die Vorteile sieht Dierßen in der Austauschbarkeit von Steuerungscode zwischen emulierter SPS und realer SPS. Die Integration der realen Steuerung in eine echtzeitfähige Simulation mit Prozesssignal-Kopplung wird über den realen Feldbus realisiert.

Unabhängig von der Kopplungsvariante unterteilt Dierßen die Simulationswerkzeuge in die so genannte Signalsimulation und die mechatronische Simulation mittels Mehr-Körper-Systemen oder Finite-Elemente-Methode. Dabei spielt für Dierßen die so genannte tiefe Integration der mechatronischen Simulation in die Signalsimulation eine wesentliche Rolle bei der Umsetzung der virtuellen Maschine. Er beschreibt eine prototypische Umsetzung einer tiefen Integration, bei der ein MKS- oder FEM-Modell mit der Signalsimulation gekoppelt wird. Als Zykluszeiten für den Variablen austausch zwischen Signalsimulation und mechatronischer Simulation nennt er zehn bis 100 Millisekunden.

Die Arbeit befasst sich nicht mit den Fragen nach einer generellen Methodik für den Aufbau und Betrieb einer virtuellen Maschine, der Abbildung des zellinternen Materialflusses sowie der Vernetzung einer Zelle in materialflusstechnischer und steuerungstechnischer Hinsicht. In Tabelle 10 sind die für die virtuelle Inbetriebnahme relevanten Merkmale des Ansatzes von Dierßen zusammengefasst:

Merkmals	Dierßen 2002
Umfeld	Forschung
Simulationszeitbasis	Echtzeit 100 ms, 10 ms
Modellierungssprachen	3D-Kinematik
Automatisierungstechnik	SPS-Emulation, reale SPS, Feldbustechnologie
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Zellebene, Maschinenebene
Methodik	-

Tabelle 10: Merkmale des Ansatzes von DIERSSEN 2002

### 3.7.3 Hamm und Menzel 2004

Hamm und Menzel beschreiben das System Sinumerik Machine Simulator, das zur Hardware-in-the-Loop-Simulation von Maschinen eingesetzt werden kann. Es handelt sich dabei um ein kompilierendes System, das ausgehend von einer blockorientierten Modellierung einen Source-Code generiert, der in ein ausführbares Modell übersetzt wird (HAMM & MENZEL 2004). Dieses Modell enthält Treiber für eine Feldbus-Emulationskarte, mit Hilfe derer auf dem Feldbus sämtliche Busteilnehmer der Maschine dargestellt werden und in Echtzeit Daten mit dem Mo-

dell austauschen. Aus dem universitären Umfeld sind Erfahrungen mit der Echtzeiterweiterung RTX des Betriebssystems Microsoft Windows bekannt. Damit lassen sich die Einschränkungen der Echtzeitfähigkeit unter Windows auf minimal 10 ms überwinden und Zykluszeiten von 1 ms und darunter erreichen.

In dem System Sinumerik Machine Simulator lassen sich 3D-Modelle integrieren, deren Kinematiken durch Achsen bewegt werden, die in der Blocksimulation generiert werden. Mit einer Definition von Sensoren in der 3D-Welt können Rückmeldungen über die Lage der Kinematiken an die Steuerung in Form von Signalen von Endlageschaltern oder Lichtschranken erfolgen.

Die Arbeiten liefern keine generelle Methodik für den Aufbau und Betrieb der Simulationsumgebung sowie für die Abbildung des zellinternen Materialflusses und der Vernetzung einer Zelle in materialflusstechnischer und steuerungstechnischer Hinsicht. In Tabelle 10 sind die für die virtuelle Inbetriebnahme relevanten Merkmale des Ansatzes von Hamm und Menzel zusammengefasst:

<b>Merkmal</b>	<b>Hamm und Menzel 2004</b>
Umfeld	Industrie
Simulationszeitbasis	Echtzeit 100 ms, 10 ms, 1 ms
Modellierungssprachen	Blocksimulation, 3D-Kinematiksimulation
Automatisierungstechnik	SPS-Emulation, reale SPS, Feldbustechnologie
Referenzprojekte	3
Produktionsebene	Zellebene, Maschinenebene
Methodik	-

Tabelle 11: Merkmale des Ansatzes von Hamm und Menzel 2004

#### 3.7.4 Mewes 2004

Mewes schätzt das Reduktionspotential der Softwareinbetriebnahmezeit auf 50% (MEWES 2004). Aus diesem Grund fordert Mewes, einen Steuerungstest auf einer realen Steuerung an einer virtuellen Maschine durchzuführen. Durch eine Kopplung der Echtzeitsimulation mit einer 3D-Visualisierung kann das Maschinenverhalten der virtuellen Maschine intuitiv erfasst werden.

Die Umgebung ermöglicht die Manipulation von Signaleingängen und das Beobachten von Ausgängen und stellt so eine virtuelle Maschine mit einem Verhalten zur Verfügung, das dem der realen Maschine entspricht. Die Realisierung erfolgt in WinMOD, einer Systemsoftware für die Echtzeitsimulation der Firma Mewes und Partner auf einem Standard-

Windows-PC. Die Software erlaubt einfaches Signalmanagement, Bedienen und Beobachten, das Zusammensetzen einer virtuellen Maschine aus virtuellen Komponenten auf Basis der Makrotechnik sowie eine einfache Bibliotheksfunktion.

Mewes beschreibt zahlreiche Anwendungsbeispiele, darunter eine Windkraftanlage, bei der die Steuerung über den Feldbus mit einem Simulationsmodell gekoppelt wurde. Es konnte eine Reduktion der Inbetriebnahmezeit um 80% erreicht werden (MEWES & SCHUBERT 2004).

Im Bereich des Automobil-Rohbaus beschreibt Mewes eine Kooperation mit dem Hersteller eines Robotersimulationswerkzeugs (MEWES 2005a, RÜCKER 2005, siehe auch Unterabschnitt 3.8.2). Durch eine Kopplung von Echtzeitsimulation und Robotersimulation wird eine virtuelle Inbetriebnahme von Rohbauzellen ermöglicht. Auf eine Methodik zur Modellerstellung sowie zum Arbeitsablauf bei der Roboterprogrammierstellung wird nicht näher eingegangen.

Mewes hebt die Bedeutung des Materialflusses bei der Steuerungsinbetriebnahme hervor und beschreibt die Abbildung des Materialflusses in einem 3D-Modell. Auf die Modellierungstechniken sowie den Arbeitsablauf bei der Modellierung wird nicht eingegangen. In Tabelle 12 sind die für die virtuelle Inbetriebnahme wesentlichen Merkmale des Ansatzes aufgeführt:

Merkmal	Mewes 2004
Umfeld	Industrie
Simulationszeitbasis	Echtzeit 100 ms, 10 ms
Modellierungssprachen	Regelungstechnische Blockschaltbilder, 3D-Kinematik, Materialflusssimulation
Automatisierungstechnik	SPS-Emulation, reale SPS, Feldbustechnologie
Referenzprojekte	> 10
Produktionsebene	Zellebene, Maschinenebene
Methodik	-

Tabelle 12: Merkmale des Ansatzes von Mewes 2004

### 3.7.5 Zäh et al. 2005

Zäh et al. verfolgen mit ihrem Ansatz einen durchgängigen und ganzheitlichen Einsatz von Simulationssystemen auf dem Gebiet der virtuellen Inbetriebnahme. Hierfür stellt die HIL-Simulation ein kontinuierlich in Weiterentwicklung befindliches Werkzeug dar (ZÄH et al. 2005b).

Dazu schlagen sie eine integrierte Entwicklungsumgebung für Roboterzellen vor, bei der die reale Steuerungshardware über eine Hardware-in-the-

Loop-Kopplung integriert ist und VR-Technologien als Mensch-Maschine-Schnittstelle eingesetzt werden (ZÄH et al. 2005c, ZÄH et al. 2005d). Durch die Einbindung der originalen Steuerungshardware sind eine realitätsnahe Simulation und die Übertragbarkeit der erstellten Programme auf die reale Anlage möglich.

Die Simulationsumgebung integriert eine SPS, das Feldbussystem und eine Robotersteuerung in eine Hardware-in-the-Loop-Simulationsumgebung mit Visualisierung in einem Virtual-Reality-System. Dadurch ist es möglich, robotergestützte Produktionssysteme virtuell in Betrieb zu nehmen. Es können neue Steuerungsstrategien für die Anlage am Simulationsmodell detailliert überprüft werden, wie zum Beispiel eine Offline-Rekonfiguration einer Zelle für eine neue Montageaufgabe.

Das vorgestellte Konzept bringt jedoch auch einen nicht unerheblichen Modellierungsaufwand mit sich: Die Verhaltensmodelle müssen manuell aufgebaut werden und jede Änderung in der Zelle bedingt eine Anpassung dieser Modelle. Eine weitere Verbesserung des Ansatzes bestünde darin, für jede mechanische Komponente ein spezifisches Verhaltensmodell bereitzustellen, das sich automatisch anpasst. Auch der Abgleich zwischen dem virtuellen Modell und der realen Anlage ist fehleranfällig. Selbst kleine Abweichungen zwischen Modell und Realität machen Anpassungen des resultierenden Programmcodes notwendig. Die für die virtuelle Inbetriebnahme relevanten Merkmale des Ansatzes sind in Tabelle 13 aufgeführt:

Merkmal	Zäh et al. 2005
Umfeld	Industrie, Forschung
Simulationszeitbasis	Echtzeit, 100 ms, 10 ms
Modellierungssprachen	Regelungstechnische Blocksimulation, 3D-Kinematik
Automatisierungstechnik	SPS und Robotersteuerung (RC)
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Zellenebene
Methodik	-

Tabelle 13: Merkmale des Ansatzes von Zäh et al. 2005

#### 3.7.6 Spath und Landwehr 2000

Spath und Landwehr beschreiben, wie sie durch den Einsatz von VR-Technologien Defizite bei der Anlageninbetriebnahme beheben (SPATH & LANDWEHR 2000a, SPATH & LANDWEHR 2000b, SPATH & LANDWEHR 2000c). Dazu schlagen sie die Schaffung eines dynamischen 3D-Modells mit hinterlegter Steuerungsfunktionalität in einer integrierten Simulationsumgebung vor. Die SPS-Programmierung soll dabei auf graphisch-

interaktive Weise mit Hilfe graphischer Repräsentationen von Aktionen und Weichschaltbedingungen erfolgen. Durch einfache Benutzerdialoge und eine automatische Generierung des SPS-Codes werden die Anwender durch das System unterstützt. Der Arbeitsablauf der VR-gestützten SPS-Programmierung gliedert sich in mehrere Schritte:

Zunächst werden Geometrie und andere rein äußerliche Ausprägungen der Komponenten in der Betriebsmittelbibliothek festgelegt. In einem weiteren Schritt werden für jede Komponente der Betriebsmittelbibliothek zugehörige Grundfunktionalitäten hinterlegt. Anschließend wird die Anlage mit Hilfe der Komponenten aus der Betriebsmittelbibliothek interaktiv konfiguriert. Durch eine logische Verknüpfung der Sensoren und Aktoren zu Funktionsbausteinen mit Hilfe graphischer Repräsentationen werden erste Programmbausteine auf Funktionsebene generiert. Danach erfolgt eine sequentielle Verknüpfung der Funktionsbausteine zu einem Ablaufprogramm.

Im folgenden Schritt einer virtuellen Inbetriebsetzung wird der erzeugte Ablauf in ein ausführbares Programm übersetzt und in der VR-Umgebung mittels Simulation getestet. Die Möglichkeit einer Online-Kopplung der realen Steuerung mit dem VR-System wird angedeutet.

Drei Einsatzszenarien des Systems werden beschrieben: In einem Szenario werden in der Umgebung entwickelte Steuerungsprogramme auf die reale Anlage übertragen. In dem zweiten Szenario werden Steuerungsprogramme aus dem realen System in die VR-Umgebung gebracht und das Anlagenverhalten im Virtuellen getestet. Im dritten Szenario kann reale SPS-Software mit realer SPS-Hardware nach dem Hardware-in-the-Loop-Prinzip an die Umgebung gekoppelt werden. Die für die virtuelle Inbetriebnahme relevanten Merkmale des Ansatzes sind in Tabelle 14 aufgeführt:

<b>Merkmal</b>	<b>Spath und Landwehr 2000</b>
Umfeld	Forschung
Simulationszeitbasis	Virtuelle Zeitachse, Echtzeit, 100 ms
Modellierungssprachen	Regelungstechnische Blockschaltbilder, strukturierte Modellierung, graphische Automaten
Automatisierungstechnik	SPS-Emulation
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Zellebene und Maschinenebene
Methodik	Erzeugung des Gutablaufs

Tabelle 14: Merkmale des Ansatzes von Spath und Landwehr 2000

#### 3.7.7 Min et al. 2002

Min et al. entwickeln ihren Ansatz für die Integration einer Echtzeitsimulation von Steuerungen in eine Virtual-Manufacturing-Umgebung (MIN et al. 2002). Sie versprechen sich davon eine Steigerung der Genauigkeit der Virtual-Manufacturing-Umgebung. Simulationsergebnisse auf Maschinenebene werden in Echtzeit berechnet und an die Virtual-Manufacturing-Umgebung weitergegeben.

Min et al. beschreiben das Anwendungsbeispiel eines Produktionssystems, das aus mehreren Werkzeugmaschinen besteht. Als Ergebnis halten sie fest, dass eine höhere Abbildungsgenauigkeit mit einem reduzierten Modellierungsaufwand sowie einem erhöhten Funktionsumfang bei der Simulation auf Maschinenebene erreicht werden konnte. Die Merkmale des Ansatzes von Min et al., die die virtuelle Inbetriebnahme betreffen, sind in Tabelle 15 zusammengefasst:

Merkmals	Min et al. 2002
Umfeld	Forschung
Simulationszeitbasis	Virtuelle Zeitachse, Echtzeit, 100 ms, 10 ms
Modellierungssprachen	Strukturierte Modellierung, objektorientierte Modellierung, 3D-Kinematik
Automatisierungstechnik	SPS-Emulation und CNC
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Zellebene und Maschinenebene
Methodik	-

Tabelle 15: Merkmale des Ansatzes von Min et al. 2002

#### 3.7.8 Tecnomatix 2003

Nolde beschreibt die von der Firma Tecnomatix<sup>1</sup> vertriebene, kommerzielle Simulationsumgebung eM-PLC, die in Kooperation mit der Firma Siemens entwickelt wurde (NOLDE 2003). Die Einsatzziele sind die Verbesserung und die zeitliche Verkürzung des Engineering-Prozesses für Produktionssysteme. Die Simulationsumgebung ermöglicht die Generierung von SPS-Programmen aus einer virtuellen Produktionszelle heraus und damit die Lösung der Abstimmungsprobleme zwischen Mechanik und Software. Der Arbeitsablauf beginnt mit dem Import von CAD-Daten der Zelle in die Simulationsumgebung (TECNOMATIX 2003). Nach einer

---

<sup>1</sup> Anmerkung des Autors: zum Zeitpunkt der Veröffentlichung 2003 noch Firma Tecnomatix, die 2005 von der Firma UGS übernommen und zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit als Firma UGS Tecnomatix weitergeführt wurde.



Definition von Kinematiken und, darauf aufbauend, des Prozessablaufs erfolgt eine Ergänzung von steuerungsrelevanten Informationen. Dies bedeutet, dass der Prozessablauf in Schrittketten mit Überwachungszeiten und Verriegelungsbedingungen überführt wird. Aus diesen Schrittketten kann der Gutablauf von Steuerungssoftware für den Automatikbetrieb abgeleitet werden, während die Handbetriebsfunktionen durch eine Zuordnung von Stellgerätebausteinen für jede Ressource abgedeckt werden.

Die Simulationsumgebung ermöglicht die virtuelle Inbetriebnahme des betrachteten Steuerungssystems durch einen Download der Steuerungssoftware auf eine virtuelle Steuerung, die mit Hilfe des Produktes PLCSIM der Firma Siemens integriert wurde. Darüber hinaus lässt sich über eine OPC-Schnittstelle auch die Kopplung an reale Steuerungen realisieren. In einem Fallbeispiel wird beschrieben, wie zwei Arbeitstage bei einer Produktionseinheit eingespart werden konnten.

Die Frage nach der Simulationszeitbasis und der Bandbreite, mit denen Daten zwischen Simulation und SPS ausgetauscht werden, sowie die Frage nach der Abbildung des Materialflusses bleiben offen. Die für die virtuelle Inbetriebnahme relevanten Merkmale des Ansatzes sind in Tabelle 16 aufgeführt:

<b>Merkmal</b>	<b>Nolde 2003</b>
Umfeld	Industrie
Simulationszeitbasis	Virtuelle Zeitachse, Echtzeit 100 ms
Modellierungssprachen	Strukturierte Modellierung, graphische Automaten, 3D-Kinematik
Automatisierungstechnik	SPS-Emulation, SPS, RC
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Zellebene und Maschinenebene
Methodik	Erzeugung des Gutablaufs

Tabelle 16: Merkmale des Ansatzes von Tecnomatix 2003

### 3.7.9 Dassault Systèmes 2005

In einem dem Ansatz von Tecnomatix vergleichbaren Simulationssystem integriert die Firma Dassault Systèmes die kinematische Zellenmodellierung mit der Steuerungstechnik verschiedener Hersteller in dem Produkt Delmia Automation (DASSAULT SYSTÈMES 2005).

Die Ziele von Delmia Automation sind dabei, die Programmierung einer Reihe von SPS-Steuerungen zu unterstützen und diese in einem Test der Programme gegen eine virtuelle Maschine, Zelle oder Linie zu prüfen. Letztendlich soll mit dem System eine Leistungsanalyse durchgeführt werden können. Damit soll die Parallelisierung der Softwareentwicklung

für Produktionsmaschinen durch Vorabinbetriebnahme am virtuellen Prototyp ermöglicht werden.

Mit dem so genannten Delmia Automation Smart Device Builder erfolgt eine Anreicherung von 3D-CAD-Modellen mit Aktor- und Sensorfunktionalität und eine Abbildung von intelligentem Peripherieverhalten mittels des LCM-Studios, wobei auch eine Abbildung von Fehlerzuständen möglich ist. Aus der Summe aller in einer Zelle verbauten Aktoren und Sensoren erfolgt die Generierung einer I/O-Schnittstelle für die Anbindung an die virtuelle Steuerung. Diese wird im Delmia Automation Controlled System Simulator durchgeführt. Dazu werden wahlweise eine virtuelle oder eine reale SPS über OPC an die Smart Devices über I/O-Ports gekoppelt und getestet.

Durch eine Definition von Quellen und Senken für die Entstehung und Vernichtung von Werkstücken an der Systemgrenze ist ein einfacher Materialfluss darstellbar, mit Hilfe dessen stochastische Auswertungen werkstück- oder ressourcenbasiert durchgeführt werden können.

Durch den Einsatz der OPC-Technologie für die Kopplung von Modell und Steuerung bleibt die Frage offen, ob neben einer virtuellen Inbetriebsetzung ein aussagekräftiger, echtzeitfähiger Systemtest der Steuerungen und damit eine echte virtuelle Inbetriebnahme mit dem System möglich ist. Die für die virtuelle Inbetriebnahme wesentlichen Merkmale des Systems sind in Tabelle 17 aufgeführt:

<b>Merkmal</b>	<b>Dassault Systèmes 2005</b>
Umfeld	Industrie
Simulationszeitbasis	Virtuelle Zeitachse, Echtzeit 100 ms
Modellierungssprachen	Strukturierte Modellierung, graphische Automaten, 3D-Kinematik
Automatisierungstechnik	SPS-Emulation, SPS, RC
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Zellebene und Maschinenebene
Methodik	-

Tabelle 17: Merkmale des Ansatzes von Dassault Systèmes 2005

#### 3.7.10 Rockwell Automation 2005

Rockwell Automation bietet als Steuerungshersteller mit dem Produkt Rockwell Systems Teststand eine Simulationsumgebung an, in der Steuerungen der Firma virtuell in Betrieb genommen werden können (ROCKWELL SYSTEMS 2005). Der Aufbau des Systems ähnelt dem der indirekten Konkurrenten Tecnomatix (siehe Unterabschnitt 3.7.9) und Dassault Systèmes (siehe Unterabschnitt 3.7.9). Durch eine Kopplung von 2D- bzw.

3D-Zellenlayout mit einer Soft-SPS oder wahlweise über OPC mit einer realen SPS können mechanische Zerstörungen vermieden und Verriegelungen zwischen Robotern getestet werden. Bezüglich des echtzeitfähigen Steuerungstests und damit einer echten virtuellen Inbetriebnahme gelten dieselben Einschränkungen wie bei den Simulationsumgebungen von Tecnomatix und Dassault Systèmes. Eine Methodik oder ein Vorgehen für den Modellaufbau, für die automatische Codegenerierung sowie für die virtuelle Inbetriebnahme selbst werden nicht erwähnt. Die für die virtuelle Inbetriebnahme relevanten Merkmale des Ansatzes sind in Tabelle 18 zusammengefasst:

Merkmal	Rockwell Automation 2005
Umfeld	Industrie
Simulationszeitbasis	Virtuelle Zeitachse, Echtzeit 100 ms
Modellierungssprachen	Strukturierte Modellierung, graphische Automaten, 3D-Kinematik
Automatisierungstechnik	SPS-Emulation, SPS, RC
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Zellebene und Maschinenebene
Methodik	-

Tabelle 18: Merkmale des Ansatzes von Rockwell Automation 2005

### 3.7.11 Stetter 2005

Stetter beschreibt den Einsatz des Simulationssystems Trysim der Firma Cephalos Gesellschaft für Automatisierung mbH (siehe STETTER 2005a und WILHELM 2005) unter Zuhilfenahme der Methode so genannter *Quality Gates*. Damit werden Projektmeilensteine bezeichnet, die in den verschiedenen Projektphasen *Anforderungsspezifikation*, *Lösungsspezifikation*, *Realisierung*, *Systemintegration* und *Abnahme* dazu dienen, die Funktionen unterschiedlicher Domänen miteinander in Einklang zu bringen (STETTER 2005b). Die Methodik berücksichtigt die virtuelle Inbetriebnahme bzw. den Steuerungssystemtest in der Integrationsphase, liefert allerdings keine gezielte Unterstützung bei Modellaufbau und Abwicklung der virtuellen Inbetriebnahme.

Stetter vollzieht eine Aufwand-Nutzen-Betrachtung für den Einsatz der Simulation in kleinen und mittleren Unternehmen. Dabei wurden Szenarien mit mehreren verteilten SPS mit HMI betrachtet. Es wird nicht auf die erreichbare Zykluszeit und Bandbreite des Simulationssystems eingegangen. Die Darstellung des Produktionssystems in einer dreidimensionalen, virtuellen Umgebung ermöglicht einfache und rechtwinklige Geometrien in Drahtdarstellung. Sensorik und Aktorik wird direkt in dieser Darstellung modelliert und erlaubt eine einfache physikalische Simulati-

on des Materialflusses. Möglichkeiten zum automatischen Modellaufbau oder zum Import von 3D-CAD-Daten werden nicht erwähnt. Der Nutzen beläuft sich auf Einsparungen im Bereich von 50% der Kosten für die Inbetriebnahme. Die für die virtuelle Inbetriebnahme relevanten Merkmale von Stetters Ansatz sind in Tabelle 19 aufgeführt.

<b>Merkmal</b>	<b>Stetter 2005</b>
Umfeld	Industrie
Simulationszeitbasis	Virtuelle Zeitachse, Echtzeit 100 ms
Modellierungssprachen	Strukturierte Modellierung, 3D-Kinematik, Materialflusssimulation
Automatisierungstechnik	SPS-Emulation
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Zellebene und Maschinenebene
Methodik	Projektmanagement

Tabelle 19: Merkmale des Ansatzes von Stetter 2005

#### 3.7.12 Cuiper 2000

Cuiper beschreibt den so genannten Cosmonaut-Ansatz für die Steuerungsentwicklung für SPS und Roboter-Steuerungen (CUIPER 2000). Mit ihm soll die Kluft zwischen digitaler Anlagenplanung und realer Inbetriebnahme geschlossen werden. Dazu wird die SPS-Programmierung in das Offline-Programmiersystem RobCAD eingebunden. Durch den sukzessiven Aufbau eines Modells während der Planungsphase soll ein kontinuierlicher Übergang in die Realität ermöglicht werden.

Die zur Zeit der Entwicklung des Ansatzes bestehende Step7-3D-RobCAD-Schnittstelle ermöglicht die unidirektionale Generierung der sogenannten Sequence of Operations, allerdings nicht von detaillierten Steuerungsprogrammen. Dazu werden die Vorgänge in fünf Arten von Teilvorgängen unterteilt, nämlich in

- elementare Montagebewegungen,
- das Annähern bzw. Verlassen der Fügestelle,
- das Be- bzw. Entladen der Bereitstellung,
- periphere Montagebewegungen
- und werkstückunabhängige Nebenprozesse.

Durch Synchronisation und Hierarchisierung von Vorgängen können auch komplexe Montageprozesse abgebildet werden. Daraus lassen sich die Steuerungsfunktionen des Ablaufs ableiten.

Cuiper beschreibt das Anwendungsbeispiel eines Stäubli RX90 und einer Siemens S7-300 SPS. Diese wird als reale Steuerung in die Planungsumgebung eingebunden und interagiert mit dem Roboter-Offline-Programmiersystem RobCAD. Die wesentlichen Merkmale des Ansatzes von Cuiper finden sich in Tabelle 20:

Merkmal	Cuiper 2000
Umfeld	Forschung
Simulationszeitbasis	100 ms Echtzeit
Modellierungssprachen	Strukturierte Modellierung, objektorientierte Modellierung, graphische Automaten, 3D-Kinematik
Automatisierungstechnik	SPS, RC
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Leitebene, Zellebene und Maschinenebene
Methodik	Modellierung und Erzeugung des Gutablaufs

Tabelle 20: Merkmale des Ansatzes von Cuiper 2000

## 3.8 Echtzeitansätze auf Zellen- und Anlagenebene

In diesem Unterabschnitt sind alle Ansätze zusammengefasst, die sich mit einem Steuerungstest auf Zellen- und Anlagenebene befassen. Dazu können diese Ansätze eine Größenordnung der Simulationszykluszeit von 100 Millisekunden sicherstellen.

### 3.8.1 Freund 2000

Freund beschreibt sein integriertes Simulations- und Steuerungssystem, basierend auf den Ergebnissen der Forschungsprojekte COSIMIR und LUCAS (FREUND et al. 2000). Mit Hilfe der Simulationsumgebung lassen sich eine Arbeitszellensimulation und –steuerung in einem System umsetzen. Der Arbeitsablauf bei der Robotersimulation COSIMIR ist in die drei Schritte *Layouterstellung*, *Programmierung* und *Einzeltest* unterteilt. Bei der Layouterstellung wird das 3D-Modell aus Komponenten für Roboter und Peripherie aufgebaut. Die Programmierung erfolgt mittels nativer Robotersprachen und der Einzeltest durch Simulation der Roboterprogramme im 3D-Modell. Der Arbeitsablauf zur Erzeugung einer flexiblen Zellensteuerung nach dem LUCAS-Modell gliedert sich ebenfalls in drei Schritte, nämlich in die *Konfiguration*, die *Programmierung* und den *Einzeltest*. Durch eine Kombination beider Arbeitsabläufe wird die Simulation einer Roboterzelle mit Zellensteuerung ermöglicht. Damit erlaubt das System eine vollständige Planung und Programmierung einer Anlage, ohne reale Komponenten einzusetzen.

### 3 Stand der Technik

---

Die Systeme arbeiten mit einer virtuellen Robotersteuerung und wahlweise mit SPS-Emulation bzw. realer SPS-Hardware über OPC. Eine Betrachtung der mit der OPC-Technologie erreichbaren Zykluszeit und Bandbreite für den Steuerungstest wird nicht angestrebt. Die für die virtuelle Inbetriebnahme wesentlichen Merkmale des Ansatzes sind der Tabelle 21 zu entnehmen:

<b>Merkmal</b>	<b>Freund 2000</b>
Umfeld	Forschung und Produkt
Simulationszeitbasis	Virtuelle Zeitachse, 100 ms Echtzeit
Modellierungssprachen	Strukturierte Modellierung, Materialflusssimulation, 3D-Kinematik
Automatisierungstechnik	Leitsystem, HMI, SPS-Emulation, SPS, RC
Referenzprojekte	5
Produktionsebene	Leitebene und Zellebene
Methodik	Modellierung

Tabelle 21: Merkmale des Ansatzes von Freund 2000

#### 3.8.2 Rücker 2005

Rücker erläutert das Planungs-, Visualisierungs- und Simulationssystem INVISION, das zur Optimierung und Verifikation von Produktionsprozessen dient (RÜCKER 2005). Es handelt sich um eine Simulationsumgebung für die Echtzeitsimulation großer Produktionsanlagen mit einer Integrationsmöglichkeit von Robotersteuerungen. Es umfasst eine 3D-Darstellung, eine ereignisgesteuerte Echtzeitsimulation sowie eine SPS-Ankopplung mit Hilfe des Echtzeitsystems WinMOD von MEWES (2005b), siehe auch Unterabschnitt 3.7.3).

Die Frage nach der Simulationszykluszeit, mit der die Echtzeitmodelle dargestellt werden, wird ebenso wenig beantwortet wie die Frage nach einem Arbeitsablauf bei der Modellierung und der Testtiefe bei Robotersteuerungen. Die für die virtuelle Inbetriebnahme relevanten Merkmale sind in Tabelle 22 aufgeführt:

Merkmal	Rücker 2005
Umfeld	Industrie
Simulationszeitbasis	Virtuelle Zeitachse, Echtzeit
Modellierungssprachen	3D-Kinematik, Materialflusssimulation
Automatisierungstechnik	Robotersteuerung (RC)
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Anlagenebene und Zellebene
Methodik	-

Tabelle 22: Merkmale des Ansatzes von Rücker 2005

#### 3.8.3 Milberg und Amann 1996

Nach Milberg und Amann verkürzen getestete Ablaufvorschriften auf Zellen- und Leitebene die Inbetriebnahmezeiten von Produktionssystemen (MAUDERER 1996, MILBERG et al. 1992b). Insbesondere die Zellenrechner-simulation ermöglicht einen interaktiven Entwurf und Test von Steuerungssoftware vor der Installation. Die anlagenspezifische Steuerungs-hard- und -software sind wichtige Inhalte bei der Planung eines Produktionssystems, so dass Ablaufvorschriften entwickelt und optimiert werden müssen (REINHART et al. in EVERSHEIM & SCHUH 1996, S. 10-70).

In seinem Systementwurf skizziert Amann seine Vision für die modulare Fabrikplanungsumgebung und schlägt einen so genannten Tool-Manager als zentrales Koppelement vor, der das Starten, Handhaben und Verwalten der Einzelwerkzeuge übernimmt. Ein so genannter Message-Manager verbindet die Werkzeuge miteinander und die Integration aller Werkzeuge erfolgt über ein zentrales Fabrikmodell, bestehend aus Produkt, Produktionsmittel und Prozess. Amann propagiert eine durchgehende Nutzung der Ablaufsimulation für die Anlagenplanung, die Ablaufsteuerung und den Betrieb. Dabei umfasst die implementierte Simulationsumgebung die Bestandteile des Tool-Managers und des Message-Managers, die Ablaufsimulation, den Flow-Chart-Editor, einen Debugger und eine Original-Steuerung (AMANN 1994, S. 51 ff.).

Amann betrachtet dabei die Unterstützung unterschiedlicher Anwender: Diese erstrecken sich vom Planer mit wenig Erfahrungsschatz über Planer mit fundierten Kenntnissen bis zum Experten in der Phase von Steuerungsentwicklung und -test. Amann wählt einen objektorientierten Modellierungsansatz, bei dem ein System in Untermodelle der eingesetzten Produktionsmittel untergliedert wird, wie beispielsweise Roboter oder Maschinen. Die Vorteile liegen neben der erleichterten Übertragbarkeit auf die Realität durch die Entsprechung von Modellelementen und realen Objekten in der Verständlichkeit für Nicht-Simulationsexperten und der einfacheren Erfassbarkeit des Zusammenspiels der Anlagenkomponen-

ten. Die Nachteile liegen in einem hohen Änderungsaufwand aufgrund von Spezialfällen, in der Notwendigkeit von Simulationsexperten zur Erstellung von Objektmodellen und in der fehlenden Vollständigkeit von Modellbaukästen. Die wesentlichen Merkmale des Ansatzes von Amman sind in Tabelle 23 zusammengefasst:

<b>Merkmal</b>	<b>Milberg und Amman 1996</b>
Umfeld	Forschung
Simulationszeitbasis	Virtuelle Zeitachse
Modellierungssprachen	Objektorientierte Modellierung
Automatisierungstechnik	Leitsystem
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Leitebene
Methodik	Modellerstellung, Erzeugung des Gutablaufs

Tabelle 23: Merkmale des Ansatzes von Milberg und Amman 1996

#### 3.8.4 Strassacker 1997

Strassacker setzt seinen Arbeiten eine realitätsnahe Überprüfung der Funktionalität von Leitsystemen oder deren Module bereits während der Entwicklung, noch vor der realen Inbetriebnahme zum Ziel (STRASSACKER 1997). Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Reproduzierbarkeit und Protokollierung aller analytischen Maßnahmen sowie auf der Entlastung der Leitsystem-Entwickler durch weitgehende Automatisierung der analytischen Maßnahmen. Außerdem spielen Langzeittests mit schneller Abarbeitung zahlreicher, komplexer Produktionsvorgänge eine wesentliche Rolle.

Er beschreibt das entwickelte Vorgehen für die Entwicklung von Leitsystemsoftware in drei Schritten, der Codierungsphase mit dem Einzeltest von Prozeduren im so genannten Prozedurtestbett, der Modultestphase mit dem Test von Einzelmodulen im Modultestbett und der Integrationsphase mit dem Test des Gesamtsystems oder von Teilsystemen gegenüber einem Anlagentestbett.

Dazu schlägt er eine Online-Kopplung von Testumgebung und Leitsystem durch eine Emulation und Visualisierung des Nachrichtenverkehrs an der Schnittstelle zum Modell des Anlagenverhaltens vor, mit der Möglichkeit, das Modellverhalten zu beeinflussen. In der Inbetriebnahmephase muss ein schneller und einfacher Ersatz einzelner realer Komponenten durch virtuelle möglich sein.

Die simulationsseitigen Merkmale der Testumgebung beschreibt Strassacker als diskrete Simulation mit internen und externen Ereignissen



(STRASSACKER 1997, S. 30 ff.). Dabei ist das Verhältnis von Simulationszeit zu Realzeit bei der diskreten Simulation nicht als konstant, sondern durch die Ereignisdichte geprägt und muss durch eine echtzeitsynchrone Simulation an der Schnittstelle zwischen Modell und Leitsystem gepuffert werden. Eine Zeitrafferfunktion ist nur bei so genannten ereignisorientierten Leitsystemen uneingeschränkt möglich. In den übrigen Systemen müssen die Zeitbasen synchron beschleunigt werden, wobei man in diesem Fall von einem echtzeitproportionalen Zeitraffer spricht. Durch automatisierte und protokollierte Zeitraffertests im Hinblick auf die Abnahme können die Entwickler beim Test entlastet werden.

Er teilt seine Modultestumgebung in drei Ebenen mit abnehmendem Abstraktionsgrad und einer zunehmendem Hardware-Schnittstellen-Spezifikation ein. Die Bewertung der Kopplungsmöglichkeiten erfolgt anhand einer qualitativen Aufwand-Nutzen-Betrachtung.

Für die Modellierung erachtet Strassacker eine strikte Trennung von Steuerung und Verhalten in jeder Einheit für notwendig (STRASSACKER 1997, S. 79 ff.). Dies widerspricht zunächst der klassischen Verwendung der Ablaufsimulation, bei der gewöhnlich keine Trennung zwischen Anlage und Steuerung vorgenommen wird und deren Simulationslauf nicht von außen beeinflussbar ist. Für den Leitsystem-Test ist allerdings eine schrittweise Abarbeitung und Animation von Steuerungsbefehlen notwendig. Damit ergibt sich die Problematik der Schnittstellenmodellierung für die Schnittstellen zwischen mehreren Steuerungen im Modell und deren physikalischen Maschinenmodellen sowie für die Schnittstellen zwischen Gesamtmodell und den Steuerungsschnittstellen zu den realen Steuerungen bzw. Leitsystemen. In Tabelle 24 sind die für die virtuelle Inbetriebnahme wesentlichen Merkmale aufgeführt:

Merkmal	Strassacker 1997
Umfeld	Forschung
Simulationszeitbasis	Virtuelle Zeitachse
Modellierungssprachen	Objektorientierte Modellierung
Automatisierungstechnik	Leitsystem
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Leitebene
Methodik	Modellerstellung, Erzeugung des Gutablaufs

Tabelle 24: Merkmale des Ansatzes von Strassacker 1997

### 3.8.5 Heinrich und Wortmann 2004

Das Prinzip der HIL-Simulation wurde auch bei Leitsystemen von Förder-technikanlagen im Automobilbau erfolgreich umgesetzt. Heinrich und

Wortmann konnten eine Leitsteuerung für einen automatisierten Fahrzeugsortierspeicher vor einer Lackieranlage offline optimieren und anschließend das Leitsteuerungsprogramm auf die reale Anlage überspielen (HEINRICH & WORTMANN 2004). Durch eine Verdoppelung der mittleren Blocklänge von Fahrzeugen gleicher Farbe gegenüber der ursprünglichen konnten aufwändige Rüstzeiten verringert und der Fahrzeugdurchsatz in der Lackiererei erhöht werden. Die Optimierungen wurden auf einer Entwicklungs- und Testumgebung, bestehend aus dem realen Leitstand, einer Materialflusssimulation und einer 3D-Animation, umgesetzt und getestet. So konnten neben einer Verkürzung der Entwicklungszeit der neuen Software insbesondere durch eine risikolose, iterative Annäherung an die optimale Lösung eine deutliche Verkürzung der Inbetriebnahmezeit und damit eine deutliche Kostenreduzierung erzielt werden. Laut Heinrich und Wortmann wird von einer Amortisation der Kosten der Entwicklungsumgebung nach spätestens einem Jahr ausgegangen.

Heinrich und Wortmann stellen die Struktur ihres System dar als Kopplung des Simulationsmodells in eM-Plant® über die TCP/IP-, DDE- und SQL-Schnittstellen an die Logistiksoftware, bestehend aus der ERP-Datenbank und der HMI-Software. Eine Methodik wird nicht ausgeführt. Die wesentlichen Merkmale des Ansatzes von Heinrich und Wortmann werden in Tabelle 25 dargestellt:

<b>Merkmal</b>	<b>Heinrich und Wortmann 2004</b>
Umfeld	Industrielle Anwendung
Simulationszeitbasis	Echtzeit 100 ms
Modellierungssprachen	Strukturierte und objektorientierte Modellierung, Materialflusssimulation
Automatisierungstechnik	Leitsystem und HMI
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Leitebene und Zellebene
Methodik	-

Tabelle 25: Merkmale des Ansatzes von Heinrich und Wortmann 2004

#### 3.8.6 Römberg 2004

Römberg schildert die Kopplung eines Produktionsleitrechners an ein Materialfluss-Simulationsmodell für die virtuelle Inbetriebnahme in Planung und Engineering (RÖMBERG 2004). Ausgehend von einem 2D-Layout werden die Materialflusssimulation und die Leittechnikanwendung aufgebaut. Als Ziele der virtuellen Inbetriebnahme nennt Römberg die Möglichkeit einer Vorabanalyse der Taktzeitverluste in der realen Anlage, eine Rückführung der gewonnenen Erkenntnisse, die Erstellung ei-

ner verbesserten Karosseriebauanlage sowie die Präsentation der virtuellen Produktion bei den Inbetriebnehmern und beim Kunden.

Die Systemstruktur ist derart aufgebaut, dass die Leitebene wahlweise mit dem Materialflusssimulator eM-Plant oder mit der realen Produktionslinie betrieben werden kann. Die Kopplung erfolgt über Produktionsvorgaben und Produktionsrückmeldungen. Darüber hinaus gibt es eine Kopplung der Materialflusssimulation an eine 3D-Visualisierung. Die Abbildung der Zellen-SPS erfolgt in Form von eM-Plant-Netzwerken.

Eine Methodik für Modellierung und virtuelle Inbetriebnahme wird nicht formuliert und der Grad der Echtzeitfähigkeit wird nicht angegeben. Die wesentlichen Merkmale von Römbergs Ansatz sind in Tabelle 26 zusammengefasst:

Merkmal	Römberg 2004
Umfeld	Industrielle Anwendung
Simulationszeitbasis	Echtzeit 100 ms
Modellierungssprachen	Strukturierte und objektorientierte Modellierung, Materialflusssimulation, 3D-Kinematik
Automatisierungstechnik	Leitsystem und HMI
Referenzprojekte	1
Produktionsebene	Leitebene und Zellebene
Methodik	-

Tabelle 26: Merkmale des Ansatzes von Römberg 2004

#### 3.8.7 Schlögl 2005

Der bereits in Unterabschnitt 2.2.2 erwähnte Ansatz des Siemens Automation Designer ermöglicht in der Kernanwendung eine softwaregestützte Standardisierung und Modularisierung und, basierend darauf, eine virtuelle Inbetriebsetzung (VIBS) der Liniensteuerung (SCHLÖGL 2005). Bezüglich der Automobilindustrie sieht Schlögl die Hauptangriffspunkte für die VIBS im Rohbau und in Logistikanlagen, während die Gewerke der Lackiererei und Endmontage wegen der Komplexität des Lackierens und dem niedrigen Automatisierungsgrad in der Endmontage weniger geeignet seien (SCHLÖGL 2005, S.7). Sein Systemkonzept umfasst die Anwendung über alle Ebenen der Automatisierung. Auf Anlagenebene nutzt er dazu das System Sicalis, auf Linienebene und auf Standard-Betriebsmittel-Ebene den Automation Designer und auf der Ebene der Mechanisierungszelle das System eM-PLC der Firma UGS Tecnomatix (SCHLÖGL 2005, S.8, für eM-PLC siehe auch Unterabschnitt 3.7.8).

Die geplante Systemstruktur des Automation Designer umfasst die Abbildung von Produktionslinien mit Hilfe von virtuellen Modellen, an denen

die Liniensteuerung virtuell in Betrieb gehen kann (SCHLÖGL 2005, S.9). Auf Zellenebene sollen einzelne Zellen durch eM-PLC mit der Zellensteuerung virtuell in Betrieb gesetzt werden, während die Kopplung von Linien- und Zellebene über Objekteinbindungen in den Automation Designer realisiert werden soll.

Als Anwendungsbeispiel beschreibt Schlögl die virtuelle Inbetriebsetzung einer Schweißzelle bei einem Automobilhersteller mit insgesamt fünf Robotern, einem mit siebter Achse und ca. 90 Einzelspannern.

Weitere allgemeine Anwendungsgebiete der VIBS-Modelle bestehen in der Anlagenbedienung, bei der ein 3D-Modell als Prozessvisualisierung sowie zur Darstellung und Diagnose von Fehlern in das HMI integriert wird. Auf Basis dieser Modelle kann auch ein Training des Betriebspersonals erfolgen. Tabelle 27 stellt für die virtuelle Inbetriebnahme relevante Merkmale des Ansatzes von Schlögl dar:

<b>Merkmal</b>	<b>Schlögl 2005</b>
Umfeld	Produkt / Industrielle Anwendung
Simulationszeitbasis	Virtuelle Zeitachse, Echtzeit 100 ms
Modellierungssprachen	Strukturierte und objektorientierte Modellierung, Materialflusssimulation, 3D-Kinematik
Automatisierungstechnik	Leitsystem, HMI, SPS-Emulation und SPS
Referenzprojekte	2
Produktionsebene	Leitebene und Zellebene
Methodik	Modellierung und Erzeugung des Gutablaufs, VIBS

Tabelle 27: Merkmale des Ansatzes von Schlögl 2005

## 3.9 Zusammenfassung

Aus der Gegenüberstellung der betrachteten Ansätze hinsichtlich der Merkmale aus Unterabschnitt 3.4 (siehe Abbildung 10) ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Die Ansätze lassen sich grob in vier Gruppen unterteilen, nämlich die der Ansätze mit einer rein virtuellen Zeitachse, bei der es keine Beschränkungen hinsichtlich der Betrachtungsebene gibt, und in drei Gruppen der Echtzeitansätze mit gestaffelter Auflösung von der Prozessebene über die Maschinenebene bis hin zur Zellenebene.
- Bei den Ansätzen mit Echtzeit korreliert die Simulationszykluszeit mit der betrachteten Produktionsebene. Dies bedeutet, dass zwischen der Abstraktionsebene des betrachteten Produktionssystems und der Zykluszeit von Simulationssystemen ein direkter Zusam-

menhang besteht. Umgekehrt wurden bei der Betrachtung höherer Produktionsebenen, also bei Zellen oder Anlagen, hinsichtlich der Zykluszeiten weniger genaue Simulationswerkzeuge eingesetzt, da dies hinreichend ist.

Anforderungen		Ansatz																								
		Denkena und Baudisch 2001	Dietrich 2002	Meier und Kreusch 2000	Bender 2003	Scheifele und Röck 2004	Osners 1998	Qin 2005	Dierßen 2002	Mewes 2004	Hann und Menzel 2004	Zäh et al 2005	Spath und Landwehr 2000	Min 2002	Texnomatik 2003	Dassault Systemes 2005	Rockwell Automation 2005	Stetter 2005	Culper 2000	Freund 2000	Rücker 2005	Milberg und Amann 1996	Strassacker 1997	Heinrich und Wortmann 2004	Römberg 2004	Schlogl 2005
Umfeld	Forschung	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Industrielle Anwendung	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Referenzen	Anzahl	1	1	1	4	8	1	1	1	2	3	1	1	1	3	3	3	3	1	5	1	1	1	1	1	2
Simulationszeitbasis	Virtuelle Zeitachse	✓	✓			✓	✓	✓					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	100ms HIL				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	10ms-HIL (Windows HIL)			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	1ms-HIL (Echtzeitsystem)			✓	✓	✓				✓																
Modellierungssprachen bzw. Werkzeuge	Strukturierte Modellierung			✓	✓	✓				✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Objektorientierte Modellierung			✓	✓								✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Graphische Automaten				✓										✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Materialflusssimulation																			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	3D-Kinematik, Kollision	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Regelungst. Blockschaltbilder	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Automatisierungstechnologien	MKS, FEM, Prozesssimulation	✓	✓		✓				✓																	
	Leitsystem / MES																			✓		✓	✓	✓	✓	✓
	HMI																					✓	✓	✓	✓	✓
	SPS-Emulation				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	SPS			✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Feldbustechnologie									✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Produktionsebene	RC										✓				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	CNC	✓	✓	✓	✓	✓				✓			✓													
	Planungsebene																									
	Leitebene																			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Zellebene				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vorgehen bzw. Methodik	Maschinenebene	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Prozessebene	✓	✓	✓	✓	✓																				
	Modellierung				✓				✓				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Projektmanagement																		✓							
	Erzeugung Gutablauf (VIBS)					✓						✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Test und IBN (VIBN)		✓	✓										✓										✓			

Abbildung 10: Matrix des Standes der Technik

- In einer ähnlichen Weise korreliert die Steuerungstechnik mit der Produktionsebene. Dies bedeutet, dass ein Szenario für die virtuelle

Inbetriebnahme eines Leitsystems auch die Leitebene als Betrachtungshorizont aufwies. Eine schärfere Detaillierung von Modellierung und Simulationstechnik scheint nicht notwendig zu sein. Auf der anderen Seite schließen Szenarien für die virtuelle Inbetriebnahme einer Maschinensteuerung in der Regel die Leitebene nicht ein. Dies bedeutet, dass in den genannten Projekten die Grenzen der Produktionsebene der betrachteten Steuerung gleichzeitig Szenariogrenzen bei der virtuellen Inbetriebnahme darstellen. Eine die Produktionsebenen übergreifende virtuelle Inbetriebnahme scheint nicht durchgeführt worden zu sein.

- Es fällt weiterhin auf, dass generell eine Methodik nur von wenigen Ansätzen bereitgestellt wird. Entweder handelt es sich um nicht nach außen gegebenes Wissen oder es haben sich nur wenige Forscher mit einem Vorgehen beschäftigt. Insbesondere die Einbindung der virtuellen Inbetriebnahme in ein Projektmanagement, also die Klärung der Frage, wann welcher Anlagenteil mittels der virtuellen Inbetriebnahme zu qualifizieren ist, wird nur von einem Ansatz und nur am Rande gestreift.
- Zahlreiche Ansätze werden häufig im Zusammenhang mit dem Begriff *virtuelle Inbetriebnahme* genannt, sollten jedoch unter Berücksichtigung der oben getroffenen Definition (siehe Unterabschnitt 3.3) unter dem Begriff *virtuelle Inbetriebsetzung* geführt werden. Damit gibt es nur wenige Ansätze, die eine virtuelle Inbetriebnahme im Sinne eines für die reale Inbetriebnahme qualifizierenden Steuerungstests darstellen.

Ordnet man die Ansätze nach der Hierarchieebene der getesteten Steuerungstechnik zum einen und nach dem Umfang des betrachteten Produktionssystems zum anderen, so ergibt sich eine Verteilung gemäß Abbildung 11:

Auf der vertikalen Achse ist der Umfang der abgebildeten Anlage aufgetragen. Er wird in der Anzahl von E/A-Variablen gemessen, die zwischen Steuerung und Automatisierungsperipherie ausgetauscht werden. Im Folgenden besitzen die Klassen *Werkzeugmaschine bzw. Bearbeitungszentrum* (WZM/BAZ) eine Größenordnung von bis zu 500 E/A, die Klasse *Logistik- und Montagezelle* ca. 1000 E/A, die Klasse *Logistikanlage* ca. 10000 E/A und die Klasse *Agiles Fertigungssystem* über 20000 E/A auf der Feldebene. Die horizontale Achse, die informationstechnische Hierarchieebene des betrachteten Steuerungssystems, läuft von der NC bzw. SPS auf Maschinenebene über die Zellen-SPS bzw. den Zellenrechner auf Zellebene bis hin zum Leitsystem auf Anlagenebene.

Aus der Literaturrecherche bekannte Ansätze liegen auf einem diagonalen Korridor (weiß) in dem Diagramm. Es lassen sich zwei Grenzen (diagonale gestrichelte Linien) des Korridors qualitativ aufzeigen: Oberhalb des Korridors ist der Detaillierungsgrad der Simulationsmodelle zu niedrig, um einen verwertbaren Nutzen zu ziehen, unterhalb des Korridors ist der Modellierungsaufwand zu hoch.

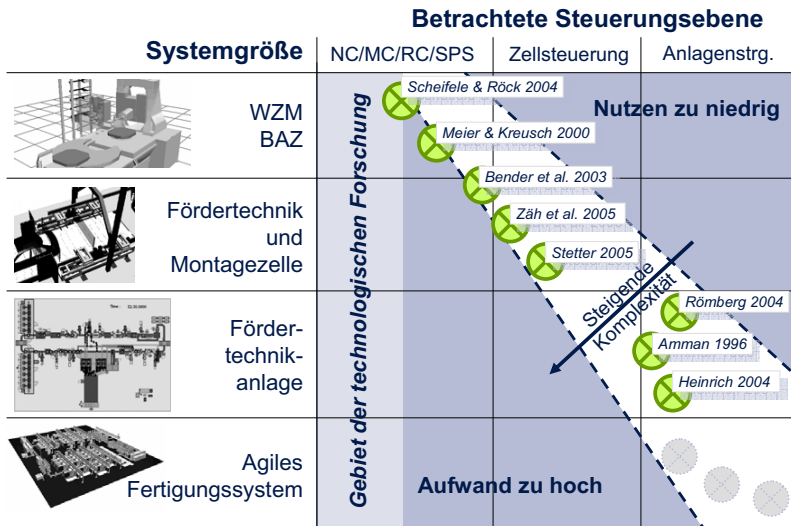


Abbildung 11: Portfolio ausgewählter Ansätze der virtuellen Inbetriebnahme

Ein weiterer Bereich, der der technologischen Grundlagenforschung, ist nach links abgegrenzt. In diesem Bereich findet die Forschung sowohl an der echtzeitfähigen Abbildung des Antriebs- und Strukturverhaltens der Maschinen für eine realistische HIL-Simulation statt (SCHEIFELE & RÖCK 2004, BROOS 2005) wie auch die Forschungsaktivitäten im Hinblick auf eine Vollsimulation mit simulierter Steuerung und einer virtuellen Zeitachse (SPATH & LANDWEHR 2001, DIETRICH et al. 2002). Diese Zeitachse ermöglicht die Einbindung von rechenzeitintensiven FEM- oder MKS-Modellen in vollem Umfang, da sie nach aktuellem Rechenaufwand konsistent gedehnt werden kann.

Auffällig ist, dass es sich bei allen Projekten um Insellösungen im Hinblick auf die Einordnung in der horizontalen Achse nach Abbildung 11 handelt. Die Randbedingungen der einzelnen Aktivitäten sind stets wirtschaftlicher Natur. Im Bereich der virtuellen Inbetriebnahme von Leitsys-

temen würde eine detaillierte Abbildung der Anlagentechnik auf E/A-Ebene den wirtschaftlich vertretbaren Rahmen sprengen. Deshalb wird die Modellierungstiefe und der Abstraktionsgrad wesentlich höher gehalten, eben auf Anlagenebene.

Aus dem Stand der Technik ergeben sich unmittelbar die Fragestellungen, die eine Methodik zur Umsetzung der virtuellen Inbetriebnahme beantworten muss. Ziel ist es, die Wirtschaftlichkeit und technische Umsetzbarkeit einer simulationsgestützten Inbetriebnahmeumgebung für die Steuerungstechnik von komplexen Produktionsanlagen sicherzustellen. Die betrachtete Steuerungstechnik reicht von der Feldebene über die Zellebene bis hinauf zur Leit- oder Anlagenebene. Hiermit wird versucht, die Komplexitätsgrenze des wirtschaftlichen Korridors (siehe diagonales Oval in Abbildung 11) weiter nach links zu verschieben und damit einen höheren Nutzen durch Ausdehnung des Softwaretests auf einen hierarchieübergreifenden Steuerungsverbund zu generieren. Wesentliche Fragestellungen bei der virtuellen Inbetriebnahme, auf die diese Arbeit antwortet, lassen sich nach Abschnitt 1.4 einteilen in:

- **Einführung in die Organisation:**

Durch die Entwicklung eines Vorgehens zur Einführung der virtuellen Inbetriebnahme in ein Unternehmen soll diese Aufgabe für den jeweiligen Anwendungsfall optimal erfüllt werden. Dazu müssen zunächst Anforderungen an eine erfolgreiche Einführung in ein Unternehmen definiert werden. Darauf aufbauend wird für das zu erarbeitende Vorgehensmodell eine Prüfung kritischer Eigenschaften der Organisation entwickelt, mit Hilfe derer eine Einschätzung des Reifegrades möglich wird. Basierend darauf können von einem generischen Einführungsfahrplan die zu tätigenen Einführungsmaßnahmen abgeleitet werden. Weitere zu klärende Fragestellungen sind die Zuständigkeiten bei den Aufgaben Modellierung und virtuelle Inbetriebnahme und deren Zuordnung zu Organisationseinheiten, die Vorbereitung der datentechnischen Integration in die Organisation sowie die Schaffung neuer interner oder externer Instanzen.

- **Sicherstellung der wirtschaftlichen Durchführbarkeit:**

Aufwand und Nutzen eine virtuellen Inbetriebnahme stehen nicht für jedes Anlagenprojekt im wirtschaftlichen Verhältnis. Zudem sind vorhandene Kapazitäten für die Modellbildung und Simulation natürlicherweise begrenzt. Aus diesem Grund muss für die virtuelle Inbetriebnahme, unabhängig von der einzusetzenden Technologie und der Integration in die Unternehmensorganisation, ein methodisches Vorgehen zur optimalen Gestaltung von Umfang und Tiefe der virtuellen Inbetriebnahme gewählt werden. Dazu muss die Problemstellung gelöst werden, wie ein geplantes Produktionssystem in Teilsysteme un-



terteilt werden kann, die jeweils unabhängig getestet werden können. Des Weiteren muss geklärt werden, wie diese Teilsysteme hinsichtlich Aufwand und Nutzen zu bewerten sind und zueinander in Relation gesetzt werden können. Nicht zuletzt wird eine Methode erforderlich, die die Auswahl der Teilsysteme mit dem besten Aufwand-Nutzen-Verhältnis unter Berücksichtigung von Kapazitätsaspekten in einer virtuellen Inbetriebnahme gestattet.

- **Skalierbare Modellbildung:**

Eine skalierbare Modellbildung ist erforderlich, um die unterschiedlichen Szenarien, die bei einer virtuellen Inbetriebnahme auftreten können, technisch abdecken zu können. Dabei spielt die Beherrschung der Schnittstellen der industriellen Kommunikationssysteme eine ebenso große Rolle wie die Berücksichtigung der in den Maschinen und Anlagen eingesetzten Automatisierungstechnik selbst. Für eine wirksame virtuelle Inbetriebnahme ist das Abtasttheorem unbedingt einzuhalten, wodurch sich für die einzelnen Steuerungsebenen unterschiedliche Anforderungen ergeben. Damit ist das Grundsystem einer Simulationsumgebung mit den Merkmalen *Simulationszykluszeit* und *-bandbreite* festgelegt. Die Methodik zur Modellerstellung gilt es zu untersuchen, wobei Möglichkeiten zur Nutzung von Daten aus vorgelegten Disziplinen und ggf. eines automatisierten Modellaufbaus untersucht werden müssen.



## 4 Einführung in eine Organisation

Dieses Kapitel ist der Einführung der VIBN in die Aufbau- und Ablauforganisation eines Unternehmens gewidmet, dem Teilziel 2 aus Abschnitt 1.3. Um die VIBN mit Erfolg in ein Unternehmen einzuführen, bedarf es einer Reihe von Voraussetzungen und darauf abgestimmter Maßnahmen. In diesem Kapitel wird, ausgehend von den Anforderungen, ein allgemeiner Einführungsfahrplan dargestellt, der es den betroffenen Abteilungen eines Maschinenbauunternehmens erlaubt, von ihrem aktuellen Reifegrad in Bezug auf eine VIBN die richtigen Maßnahmen abzuleiten. Der Reifegrad wird vorab anhand einer gezielten Bewertung bestimmt. Das Kapitel schließt mit einer kurzen Skizze organisatorischer Umsetzungsformen.

### 4.1 Anforderungen

Praktische Erfahrungen aus Pilotprojekten belegen, dass eine virtuelle Inbetriebnahme nur wirksam eingesetzt werden kann, wenn gewisse Voraussetzungen gegeben sind (siehe auch das Anwendungsbeispiel in Abschnitt 7.3 und APPEL 2006). Diese können als Anforderungen an den Entwicklungsprozess formuliert werden. Sie müssen durch ein Maschinenbauunternehmen erfüllt werden, um eine virtuelle Inbetriebnahme nachhaltig wirksam einzuführen. Im Folgenden werden diese Anforderungen erläutert.

**Systematischer Erfahrungsrückfluss aus der IBN:** In der Inbetriebnahme von Maschinen zeigt sich der Wert der Konstruktionsarbeit. In der Regel werden Maschinen von Monteuren auf der Baustelle in Betrieb genommen. Dabei handelt es sich um pragmatische Techniker mit einem breiten Erfahrungsschatz und universellen Fähigkeiten. Praktische Erfahrung mit der Erprobung der Maschine im Feld und die dabei sich als erforderlich ergebenden Änderungen müssen systematisch in die Entwicklung zurückgeführt werden (siehe ZEUGTRÄGER 1998). Dies lässt sich beispielsweise auf organisatorischem Wege durch Projekt-Reviews vor und nach der IBN umsetzen. Die dabei zwischen Konstruktion und Montage ausgetauschten Informationen müssen insbesondere zur Pflege der Richtlinien und Standards eingesetzt werden (siehe unten).

**Datenkonsistenz:** Mit der Forderung nach Datenkonsistenz wird das klassische Problem der Mechatronik adressiert. Die Entwicklungsdaten aus den Bereichen von Mechanikkonstruktion, Fluidkonstruktion und Elektrokonstruktion entstehen aus unterschiedlichen Denkweisen und durch Menschen unterschiedlicher Ausbildung. Dementsprechend liegt es

in der Natur des Entstehungsprozesses, dass diese Daten oft nicht vollständig zusammenpassen. Inkonsistenzen aus dem Entwicklungsprozess werden bei der Modellierung für die VIBN teilweise aufgedeckt, da hier erstmals ein detailliertes Gesamtmodell des Systems aufgebaut wird. Demnach erhöht eine hohe Zahl von Inkonsistenzen den Aufwand bei der Modellierung aufgrund von Verständnisschwierigkeiten und der notwendigen Rücksprache mit den beteiligten Bereichen. Im Prinzip finden dann bei der Modellierung Tätigkeiten statt, die ohne Simulation in der IBN erforderlich gewesen wären, allerdings im Grunde eine Aufgabe der Entwicklung sind. Deshalb muss im Sinne eines schlanken Modellaufbaus beim mechatronischen Entwicklungsprozess durch organisatorische oder informationstechnische Maßnahmen eine hohe Datenkonsistenz sichergestellt werden (siehe ZÄH et al. 2003a).

**Vollständigkeit digitaler Daten:** Da sich der Modellaufbau auf Daten aus der Entwicklung stützt, kann der Modellierungsaufwand durch Importfunktionen oder Modellgeneratoren weiter reduziert werden, wenn die Daten vollständig in digitaler Form vorliegen. Dies bedeutet bei Mechanikdaten, dass beispielsweise das Vorhandensein von 3D-Daten Vorteile gegenüber reinen Maschinenzeichnungen hat. Sind die 3D-Daten zusätzlich mit Kinematikinformationen angereichert, so reduziert sich der Modellerstellungsaufwand weiter (siehe Zäh et al. 2004b). Bezüglich der Daten aus Fluid- und Elektrokonstruktion sind wiederum CAD-Systeme der so genannten dritten Generation von Vorteil, bei denen die Daten nicht mehr nur als reine 2D-Zeichnungen vorliegen, sondern durch Verwendung intelligenter Datenbanken die Konsistenz zwischen mehreren Plänen und dem Mengengerüst der Maschinenperipherie gewährleistet wird. Basierend darauf lassen sich Modelle leichter aufbauen und ggf. sogar automatisiert ableiten (siehe ZÄH et al. 2005a und Zäh et al. 2006b).

Die drei Anforderungen sind im Folgenden zusammengefasst; erst wenn sie erfüllt sind, kann die Wirkung einer virtuellen Inbetriebnahme zum Tragen kommen:

- Systematischer Erfahrungsrückfluss von der Inbetriebnahme
- Datenkonsistenz
- Vollständigkeit der digitalen Daten

### 4.2 Einführungsfahrplan

Der entwickelte Einführungsfahrplan stützt sich auf die Anforderungen aus dem vorhergehenden Abschnitt. Dazu wird zunächst eine Reifegrad-

analyse der Entwicklungsprozesse hinsichtlich der Anforderungen durchgeführt. Auf Basis der Ergebnisse erfolgt je nach Reife des Unternehmens in einem Stufenplan schrittweise die Vorbereitung der Organisation auf die virtuelle Inbetriebnahme. Danach ist die Zeit reif für das erste Pilotprojekt zur Evaluierung der virtuellen Inbetriebnahme. Der Einführungsfahrplan mit dem notwendigen Fundament ist in Abbildung 12 graphisch dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte weiter ausgeführt.

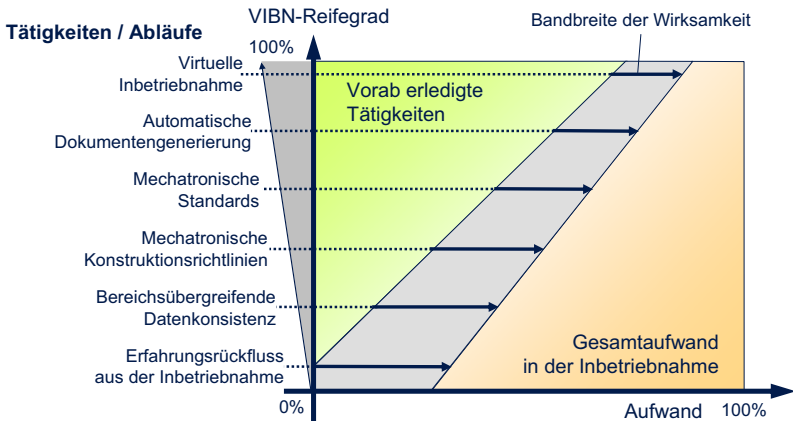


Abbildung 12: Einführungsfahrplan für eine wirksame virtuelle Inbetriebnahme

**Reifegrad-Analyse:** Entscheidend für die optimale Einbindung der virtuellen Inbetriebnahme in die Entwicklung ist die genaue Kenntnis der im Unternehmen gewachsenen Entwicklungsmethoden und -abläufe, der dabei eingesetzten Werkzeuge sowie deren Schnittstellen und verwendeten Datenformate. Ebenso ist eine fundierte Kenntnis der technologischen Prozesse und der in den Maschinen und Anlagen verbauten Komponenten notwendig. Im Rahmen der Analyse muss daher eine detaillierte Untersuchung der Entwicklungsprozesse in Bezug auf die VIBN durchgeführt werden. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen können anschließend die Schritte einer Einführung abgeleitet werden.

**Systematischer Erfahrungsrückfluss aus der IBN:** Diese Anforderung ist gewissermaßen als Basis für die Einführung einer VIBN zu sehen. Findet der Erfahrungsrückfluss nicht statt, so setzt eine VIBN im Qualitätsmaßstab zu weit unten an. Für einen systematischen Erfahrungsrückfluss von der Baustelle in die Konstruktion werden hier zwei mögliche Maßnahmen genannt:

## 4 Einführung in eine Organisation

Bei der Projektentwicklung großer Anlagen, wenn beispielsweise die Elektrokonstruktion für unterschiedliche Anlagenabschnitte durch mehrere Konstrukteure bearbeitet wird, muss die Auftragsabwicklung umgestellt werden. Die an der Konstruktion beteiligten Mitarbeiter müssen die Anlage im weiteren Verlauf selbst in Betrieb nehmen. Dazu wäre es denkbar, dass auf der Baustelle ein erfahrener Inbetriebnehmer die Koordination der Arbeiten übernimmt und die Konstrukteure jeweils den von ihnen bearbeiteten Anteil selbst in Betrieb nehmen. Damit verteilt sich zum einen die Last der auswärtigen Projektarbeit auf mehrere Schultern und zum anderen steigt bei den beteiligten Konstrukteuren die Motivation, bereits im Büro möglichst hohe Entwicklungsqualität anzustreben. Zusätzlich erwerben sie durch die Tätigkeiten auf der Baustelle für zukünftige Konstruktionsaufgaben wertvolle Erfahrung.

Eine weniger einschneidende Maßnahme, bei der die klassische Organisation mit einer Teilung zwischen Konstruktion und Inbetriebnahme bestehen bleibt, stellt die gezielte Einführung von Übergabegesprächen dar (siehe Abbildung 13).

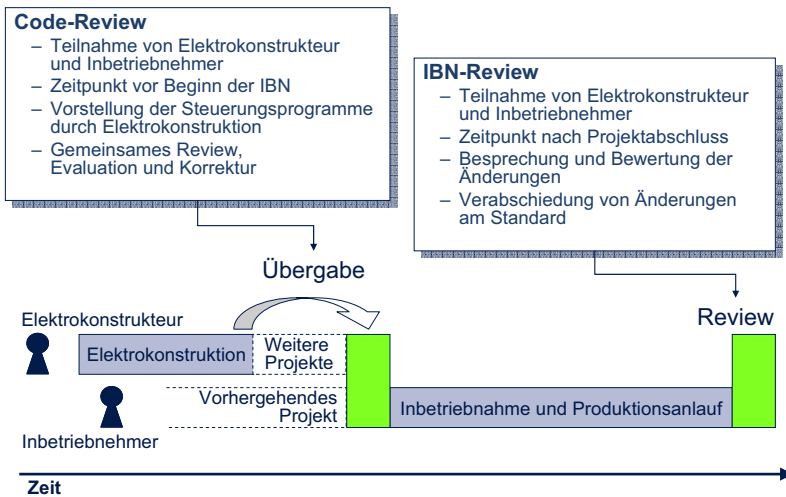


Abbildung 13: Sicherung der Inbetriebnahme-Erfahrung durch gezielte Einführung von Übergabegesprächen

Diese müssen an zwei Stellen in der Auftragsabwicklung geführt werden. Zum einen muss der Konstrukteur seine Maschinensoftware vor der IBN

dem Inbetriebnehmer vorstellen und erläutern. Damit muss er sein Arbeitsergebnis bewusst vertreten und kann zusammen mit dem Inbetriebnehmer bereits Änderungen vornehmen, deren Notwendigkeit dieser im Code-Review aufgrund seiner Erfahrung bereits erkennt.

In einem weiteren Gespräch, einem so genannten IBN-Review, muss der Inbetriebnehmer dem Elektrokonstrukteur die Änderungen auf der Baustelle darstellen und erklären. Gemeinsam werden Änderungen diskutiert und jeweils die Entscheidung getroffen, ob es sich um einen Einzelfall handelt oder die Änderung in zukünftige Konstruktionen mit einfließen muss.

**Mechatronische Datenkonsistenz:** Die Verfügbarkeit der zum Aufbau von Simulationsmodellen notwendigen Daten und Dokumente stellt eine notwendige Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme dar. Es gilt zu untersuchen, in welchem Stadium des Entwicklungsprozesses welche Informationen und Dokumente zur Verfügung stehen. Beispiele für notwendige Dokumente sind mechanische Modelle, Konstruktionszeichnungen, Fluidpläne, Stromlaufpläne und E/A-Listen. Insbesondere die Konsistenz dieser Dokumente ist sicherzustellen. Dies kann nur durch regelmäßige Kommunikation über den Projektfortschritt und Abgleich der Daten zwischen den an der Entwicklung beteiligten Fachbereichen sichergestellt werden. Als Maßnahmen eignen sich hier regelmäßige Projektrunden, in denen der Fortschritt abgestimmt wird.

**Mechatronische Konstruktionsrichtlinien:** Konstruktionsrichtlinien oder, in einer weiteren Ausbaustufe, Konstruktions-Standards stellen den Wissens- und Erfahrungsschatz eines Unternehmens dar. In Richtlinien sind die Vorarbeiten und Erfahrungen vorhergehender Konstruktionen abgelegt. Diese dienen bei Neu- oder Anpasskonstruktionen dazu, das Wissen unter den Konstrukteuren zu verbreiten. Der Prozess der Erstellung und Pflege, aber auch der Anwendung dieser Richtlinien muss ständig gelebt werden, um eine schnelle Lernkurve in der Breite der Organisation sicherzustellen.

**Mechatronische Standards:** Einen Schritt weiter gehen mechatronische Standards, bei denen für Module, die häufig in der Maschinentechnik eingesetzt werden, domänenspezifische Vorlagen zu einem Standard zusammengefasst werden. Dazu werden beispielsweise mechanische Grundkonstruktionen mit den zugehörigen Mengengerüsten und Zeich-

nungsvorlagen aus der Elektro- und Fluidkonstruktion gespeichert. Häufig können auch Programmteile für die Steuerung einem mechatronischen Standard zugeordnet werden. Die Standardisierung beschleunigt und verbessert das Ergebnis der Konstruktion (siehe EVERSHEIM et al. 1990a und EVERSHEIM 1990b, LITTO 2004 und LITTO & LEVEK 2005). Der Preis dafür ist der im Vergleich zu Richtlinien deutlich höhere Aufwand für die Erstellung und Pflege der domänenübergreifenden Standards. Dazu müssen Konstrukteure aller Disziplinen regelmäßig mit Monteuren aus der Inbetriebnahme gemeinsam daran arbeiten, die Erfahrung aus dem Feld in die Standards einzubringen.

**Automatische Dokumentgenerierung:** Ebenso ist eine Analyse der eingesetzten Entwicklungswerkzeuge und deren Datenschnittstellen notwendig. Es gilt zu klären, in welchen Datenformaten bzw. Dokumentationsformen die in der Entwicklung generierten Informationen für die Fertigung und Montage bereitgestellt werden müssen. Durch eine Verwendung von maschinenlesbaren Daten, in denen die Eigenschaften von Maschinenteilsystemen, die Maschinenstruktur und das Mengengerüst einer Maschine abgelegt sind, können Dokumente automatisch generiert werden. Dazu können angepasste Generatoren eingesetzt werden, die aus den Daten Dokumente für jede Domäne, wie beispielsweise Mechanik, Fluidtechnik, Elektrik und Steuerungstechnik, generieren. Dieses Vorgehen stellt zum Einen sicher, dass die Gesamtheit der Dokumente aus einer Datenbasis generiert ist, und zum Anderen, dass die Dokumente konsistent sind, wenn die Korrektheit der mechatronischen Standards und Dokument-Vorlagen vorausgesetzt werden kann. Dadurch werden Änderungen auf der Baustelle aufgrund nicht zusammen passender Teilsysteme vermieden und die VIBN setzt damit auf mechatronischen Daten auf, die zum einen konsistent sind und zum anderen die Erfahrung aus den vorhergehenden Inbetriebnahmevorgängen beinhalten.

**Pilotprojekt:** Um den Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme gezielt auf die Bedürfnisse des betrachteten Unternehmens abzustimmen, beginnt die Einführung der VIBN mit der Durchführung eines Pilotprojektes. Dazu sollte ein Projekt ausgewählt werden, das hinsichtlich der Simulationstechnologien nicht an die Grenzen geführt wird, aber dennoch ein hohes Nutzenpotential besitzt. Zu dessen Bestimmung bietet sich ein vereinfachtes Vorgehen nach Kapitel 5 an.

Das Entwicklungsprojekt muss durch VIBN-Experten von der Auftragsvergabe bis hin zur Auslieferung und Inbetriebnahme beim Kunden begleitet werden. Die Durchführung muss durch eine unabhängige Instanz



innerhalb des Projektteams erfolgen. Diese, im weiteren Verlauf als VIBN-Abteilung bezeichnete Instanz stellt projektbegleitend die erforderlichen Entwicklungsdokumente zusammen, baut basierend darauf ein VIBN-Modell auf und betreut die VIBN. Bezüglich der Besetzung des VIBN-Teams mit Mitarbeitern ist darauf zu achten, dass es sich um innovative und technologisch interessierte Mitarbeiter handelt. Die gezielte Einbindung von Schlüsselfiguren, die als Respektspersonen anerkannt sind, kann einen positiven, meinungsbildenden Einfluss auf die übrigen Mitarbeiter haben.

### 4.3 Organisatorische Umsetzungsformen

Auf die erforderlichen Technologien zur Modellbildung wird in Kapitel 6 eingegangen. Sie setzt neben der Investition in die Rechnerhardware, die Simulations- und Visualisierungssoftware sowie die Steuerungstechnik auch eine Investition in die fachübergreifende Ausbildung der Techniker voraus. Die Mitglieder einer VIBN-Abteilung müssen vergleichbar mit den realen Inbetriebnehmern neben einer profunden Kenntnis der in Betrieb zu nehmenden Anlagen auch ein breites Anwendungswissen aus den Bereichen Simulations- und Steuerungstechnik vorweisen oder die Bereitschaft haben, sich dieses selbstständig anzueignen.

Die Einrichtung einer VIBN-Abteilung stellt für Maschinenbauunternehmen somit eine hohe Investition dar, bei der sicherlich abgewogen werden muss, ob genügend Synergien daraus entstehen. Deshalb muss die organisatorische Eingliederung der VIBN in das Unternehmensnetzwerk betrachtet werden, das hier vereinfacht aus dem Generalunternehmer, den Maschinenlieferanten selbst, diversen Zulieferern, wie zum Beispiel externen Dienstleistungsunternehmen besteht. In Abbildung 14 sind drei denkbare Organisationsstrukturen im Unternehmensnetzwerk nach ZÄH & REINHART (2004b) dargestellt. Diese sind von oben nach unten:

- **VIBN als externe Dienstleistung:** Eine VIBN wird bei Bedarf an externe Dienstleistungsunternehmen als Auftrag vergeben. Es muss keine eigene Kompetenz aufgebaut, allerdings Wissen und Erfahrung mit den Maschinen nach außen gegeben werden.
- **VIBN durch eine standortinterne VIBN-Abteilung:** Die VIBN wird durch eine standortinterne Spezialabteilung projektweise bei Bedarf durchgeführt. Es muss eigene Kompetenz aufgebaut werden, allerdings wird kein Spezialwissen nach außen gebracht.
- **VIBN durch unternehmensweites VIBN-Kompetenzzentrum:** Eine VIBN wird bei Bedarf durch ein für die gesamte Unternehmensgruppe zuständiges Kompetenzzentrum durchgeführt.

Spezialwissen wird an einem Standort gebündelt, der in unterschiedlichen Projekten alle Standorte mit der VIBN als unternehmensinterne Dienstleistung beliefert.

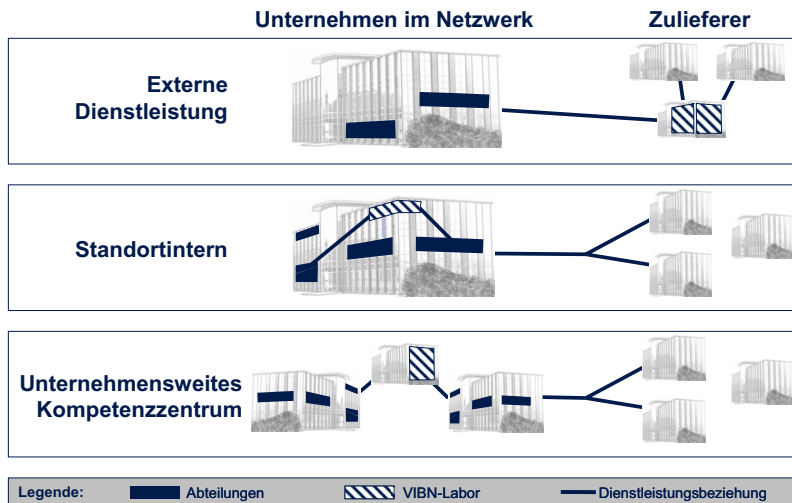


Abbildung 14: Organisatorische Eingliederung einer Virtuellen-Inbetriebnahme-Abteilung nach ZÄH & REINHART (2004b)

Für die interne Einordnung in die Aufbauorganisation eines kleinen oder mittelständischen Unternehmens spielen zwei Aspekte eine Rolle: Zum einen muss entsprechendes, domänenübergreifendes Erfahrungswissen vorhanden sein (siehe Abschnitt 6.4). Zum anderen muss eine organisatorische Unabhängigkeit von der Elektrokonstruktion bestehen. Aus diesem Grund muss eine VIBN-Abteilung als eigenständige Organisationseinheit in der Entwicklungsabteilung geschaffen werden. Der Auftrag der VIBN-Abteilung ist es, die Projektabwicklung durch Simulation zu unterstützen. Damit umfassen ihre Aufgaben die projektbegleitende Bereitstellung der Ausrüstung und Modelle für die Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme. Dazu zählen die ständige Verbesserung des Modellbildungsprozesses durch Aufbau von Standardbibliotheken und automatisierten Modellgenerierungsmechanismen aus den Datenstämmen der Entwicklungsabteilung. Die tatsächliche virtuelle Inbetriebnahme muss durch einen baustellenerfahrenen Inbetriebnehmer oder Elektrokonstrukteur in Zusammenarbeit mit einem Mitarbeiter der VIBN-Abteilung erfolgen. Letzterer stellt die Verfügbarkeit der Simulationstechnik sicher und sorgt dafür, dass bei Bedarf Modelle angepasst werden können, während die

Mitarbeiter aus Elektrokonstruktion bzw. Inbetriebnahme die virtuelle Inbetriebnahme nach Checkliste durchführen.

Um maximalen Nutzen aus der virtuellen Inbetriebnahme zu gewinnen, muss diese als Prozess in die Produktentwicklung integriert werden. Es gilt also den bisherigen Entwicklungsprozess zu optimieren und anzupassen. Die vorherrschende Praxis in der Produktentwicklung von Maschinen und Anlagen hat einen stark sequentiellen Charakter der Konstruktion, Fertigung, Montage und Inbetriebnahme. Der Produktentwicklungsprozess muss insofern angepasst werden, als der VIBN-Prozess startet, sobald die Konstruktion die ersten Baugruppen fertig gestellt hat. Die Modellierung des VIBN-Simulationsmodells beginnt also schon während der Konstruktion selbst. Aus den Erkenntnissen können wichtige Änderungen an Mechanik und Elektrik abgeleitet werden und direkt in die Konstruktion einfließen. Im Idealfall schließt der VIBN-Prozess gleichzeitig mit der Fertigung und Montage ab. Durch die vorgezogene virtuelle Inbetriebnahme werden Fehler, die normalerweise erst bei der realen Inbetriebnahme auftreten, früher gefunden und behoben. Es ist daher notwendig, zusätzlich zum VIBN-Prozess ein entsprechendes Änderungsmanagement zu integrieren. Dies ermöglicht sehr kurze Informationsschleifen zwischen Konstruktion, Modellierung, Fertigung, Montage und virtueller Inbetriebnahme. Dadurch werden Änderungen, die im Normalfall sehr spät, unter Zeitdruck und dadurch sehr teuer durchgeführt werden, rechtzeitig erkannt, wohl durchdacht und wesentlich kostengünstiger realisiert. Nach Abschluss der Fertigung, Montage und VIBN ist die Maschine oder Anlage im Idealfall frei von Fehlern. Es muss an dieser Stelle nur noch die Inbetriebnahme am realen Objekt durchgeführt werden, um alle notwendigen Funktionen und Sicherheitsmechanismen zu überprüfen. Dieser Wandel im Entwicklungsprozess ist in Anlehnung an Unterabschnitt 3.1 in Abbildung 15 dargestellt.

## 4 Einführung in eine Organisation

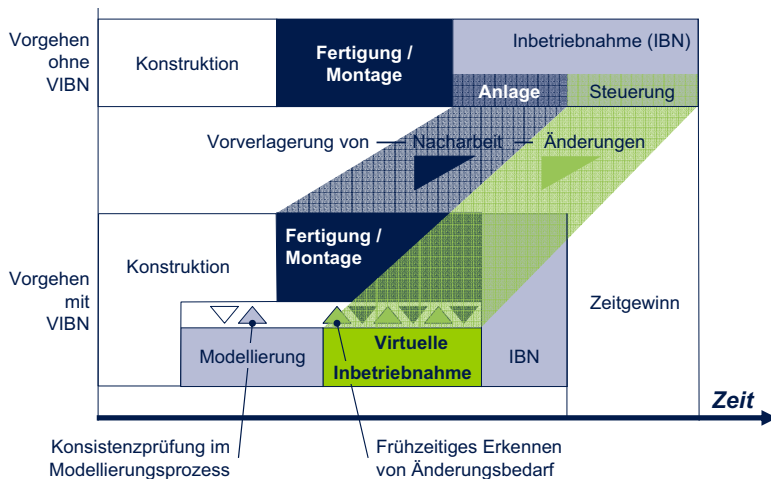


Abbildung 15: Vergleich des Vorgehens bei der Maschinenentwicklung mit und ohne virtueller Inbetriebnahme

## 5 Wirtschaftliche Skalierung

Zur Motivation sei ein allen Simulationsanwendungen in der Entwicklung zu Grunde liegendes Dilemma angemerkt: Grundsätzlich kann der Beitrag einer VIBN zur Wirtschaftlichkeit eines Maschinenbauprojektes weder vor noch nach der Durchführung ermittelt werden (siehe WÜNSCH 2006). Dies resultiert aus der Tatsache, dass bei einem Projekt der direkte Vergleich des Vorgehens mit und ohne VIBN nicht möglich ist. Die Rentabilität der Simulation kann genau genommen nicht einmal nach Projektabschluss berechnet werden, auch wenn zu diesem Zeitpunkt alle Zahlungsflüsse getätigt und alle Hemmnisse bekannt sind. Der Grund hierfür ist die fehlende Vergleichbarkeit von Projekten mit und ohne Simulation; niemals werden gleiche Randbedingungen, gleiche Mitarbeiter und gleiche Aufgaben bestehen, die eine exakte Gegenüberstellung des Vorgehens mit und ohne Simulation ermöglichen. Mit anderen Worten: Es lässt sich bei der Projektabwicklung nach Abbildung 8 nur entweder der obere oder der untere Pfad beschreiten, niemals beide gleichzeitig. Dies führt dazu, dass in realen Projekten keine vergleichende Messung von Qualität und Zeit durchgeführt werden kann. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel eine Methode vorgestellt, die es erlaubt, VIBN-Projekte vor der Durchführung anhand einfacher Kennzahlen bezüglich Aufwand und Nutzen miteinander zu vergleichen (siehe Teilziel 3 in Abschnitt 1.4). Im Weiteren wird mit dem Begriff *Subsystem* ein Teil eines Produktionssystems bezeichnet, der für sich in Betrieb genommen werden kann und einen sinnvollen Umfang für die Durchführung einer VIBN hat. Dabei wird der Begriff *VIBN-Projekt* für die Summe der Tätigkeiten genutzt, die für eine VIBN eines Subsystems durchgeführt werden müssen.

Im Abschnitt 5.1 und 5.2 erfolgen Plausibilitätsbetrachtungen zur Ermittlung des Aufwands und des Nutzens bei der Durchführung eines VIBN-Projektes. Im letzten Abschnitt des Kapitels wird auf die vorhergehenden Abschnitte aufbauend eine Methode zur Optimierung des Einsatzes der VIBN skizziert. Die Methode dient zunächst der Einteilung eines geplanten Produktionssystems in Subsysteme und anschließend der Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer VIBN für jedes Subsystem.

### 5.1 Bestimmung des Aufwands

Der höchste Aufwand bei der virtuellen Inbetriebnahme liegt in der Erstellung des Simulationsmodells. Dieses muss ggf. mehrschichtig sein und aus den Elementen Peripherie-, Visualisierungs- und Materialflussmodell bestehen (siehe auch Unterabschnitt 6.3.5). Je nach dem geforderten Modellzweck und der damit verbundenen Modellierungsgenauigkeit geht ein

unterschiedlich hoher Aufwand bei der Modellerstellung einher. Grundsätzlich ist dieser aber von dem zu simulierenden Projekt abhängig. Je komplexer ein Projekt beschaffen ist, desto aufwändiger ist es, das entsprechende Simulationsmodell zu erstellen.

Für das Peripheriemodell ist es unter anderem von Bedeutung, ob bereits eine Bibliothek vorhanden ist, auf die zugegriffen werden kann (siehe auch Unterabschnitt 6.3.5.1.3). In diesem Zusammenhang kommt es darauf an, wie viele Teile neu erstellt werden müssen und wie viele Standardmodule aus der Bibliothek übernommen werden können. Bei einer sehr umfangreichen Bibliothek fallen lediglich minimale Anpassungs- und Verschaltungsaufgaben an. Allerdings muss eine derartige Bibliothek gepflegt werden, was sich in zusätzlichem Aufwand niederschlägt.

Das Visualisierungsmodell wird entweder manuell aus 2D-Zeichnungen aufgebaut oder halbautomatisiert aus 3D-CAD-Daten abgeleitet (siehe auch Unterabschnitt 6.3.5.1.4). Sind letztere vorhanden, müssen meist noch Anpassungen vorgenommen werden. Wenn die Konstruktion der Maschine bzw. Anlage bereits im 3D-CAD-System erfolgt ist, können die so erzeugten Daten weiterverwendet werden. Falls keine 3D-Daten vorhanden sind, muss das Visualisierungsmodell von Grund auf neu konstruiert werden, was mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist.

Wie beim Visualisierungsmodell kann auch beim Materialflussmodell auf bestehende Daten zurückgegriffen werden (siehe Unterabschnitt 6.3.5.1.5). Bereits in der Konstruktion oder Layoutplanung werden Materialflussmodelle genutzt, die für die VIBN weiterverwendet werden können. Auch hier kann sehr gut mit Standardmodulen und Bibliotheken gearbeitet werden, um so den Neuerstellungsaufwand zu reduzieren.

Es ist ersichtlich, dass ein erheblicher Teil des Aufwands zur Simulationsmodellerstellung bereits im Projektmanagement und im Produktentwicklungsprozess festgelegt wird. Bei einer optimalen Integration der VIBN wird der Anpassungsaufwand von Daten weitestgehend minimiert. Somit liegt der Haupteinflussfaktor in der **Komplexität** des zu simulierenden Projektes. Es wird vereinfacht angenommen, dass sich der Aufwand proportional zur Komplexität verhält.

Nach ZEUGTRÄGER (1998) ist der Begriff der Komplexität von Produktionssystemen durch die drei Größen *Zahl der Elemente*, *Zahl der Beziehungen* und *Verschiedenartigkeit der Beziehungen* definiert. Ein hier betrachtetes Subsystem  $i$  besteht jeweils aus einer oder mehrerer zu testender Steuerungen und dem Testmodell als Testbett (siehe Abbildung 16 bzw. WÜNSCH 2006). Das Testmodell stellt dabei die projektbezogene und komplexitätstreibende Komponente bei der VIBN dar. Der Modellie-

rungsaufwand resultiert aus dem Umfang jeweils des Modells selbst und der Schnittstelle zwischen Modell und Steuerung.

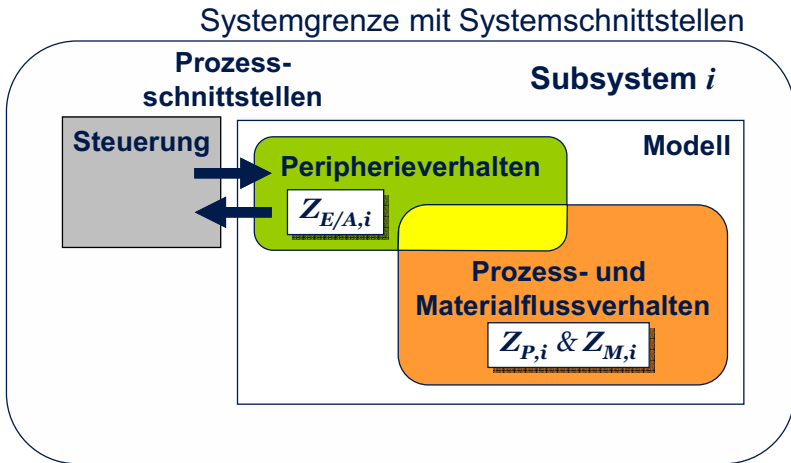


Abbildung 16: Elemente eines Subsystems  $i$  mit den Messgrößen „Zahl der Ein- und Ausgänge“  $Z_{E/A,i}$ , „Zahl der Prozesse“  $Z_{P,i}$  und „Zahl der Materialflussverbindungen“  $Z_{M,i}$  für die Bestimmung des Aufwands  $A_i$  bei der VIBN: Steuerung und Modell mit Peripherieverhalten sowie Prozess- und Materialflussverhalten

Mit der Anzahl von Bearbeitungs- und Fügeprozessen sowie auf der Anzahl von Verbindungen dazwischen wird die Komplexität der Basisstruktur eines Subsystems und damit der Aufwand bei der Modellierung beurteilt. Dazu werden die beiden Messgrößen *Zahl der Prozesse*  $Z_{P,i}$  und *Zahl der Materialflussverbindungen*  $Z_{M,i}$  zwischen Prozessen im Subsystem addiert. Als Aufwand aufgrund der Modellstruktur ergibt sich somit ein Zusammenhang nach der Gleichung 1:

$$A_{P/M,i} \sim (Z_{P,i} + Z_{M,i}) \quad (1)$$

Zusätzlich wird der Modellierungsaufwand durch den Umfang der Prozessschnittstelle zwischen dem Modell und der Steuerung beeinflusst. Eine absolute Größe, die den damit verbundenen Aufwand recht gut wiedergibt, ist die *Anzahl der Ein- und Ausgänge*  $Z_{E/A,i}$  mit denen Daten zwischen der Steuerung und der Simulation ausgetauscht werden. Es wird in einfacher Abschätzung angenommen, dass sich der Aufwand  $A_i$  proportional zu  $Z_{E/A,i}$  verhält:

$$A_i \sim Z_{E/A,i} \quad (2)$$

Da der funktionale Zusammenhang zwischen  $A_i$ , und den Kennzahlen  $Z_{E/A,i}$ ,  $Z_{P,i}$  und  $Z_{M,i}$  nicht bekannt ist, lässt sich keine kombinierte Gleichung für den Aufwand  $A_i$  aufstellen. In der Bewertung müssen deshalb die Gleichungen 1 und 2 alternativ genutzt werden. In den Anwendungsbeispielen wird eine Aufwandsabschätzung nach Gleichung 2 verfolgt (siehe Kapitel 7.5). Durch die Einführung eines zunächst unbekanntes Proportionalitätskoeffizienten  $a$  jeweils für die Gleichungen 1 und 2 ergeben sich exakte Gleichungen zur Berechnung des Aufwandes. Da der Proportionalitätskoeffizient in der Realität allerdings nur mit hohem Aufwand bestimmt werden kann, wird durch Umstellung der *spezifische Aufwand*  $\underline{A}_i$  gebildet (siehe Gleichungen 3 bzw. 4):

$$\underline{A}_i = \frac{A_i}{a} = (Z_{P,i} + Z_{M,i}) \quad (3)$$

$$\underline{A}_i = \frac{A_i}{a} = Z_{E/A,i} \quad (4)$$

Der spezifische Aufwand lässt den Vergleich von Projekten anhand der einfachen Kennzahlen  $Z_{E/A,i}$  bzw.  $Z_{P,i}$  und  $Z_{M,i}$  zu.

## 5.2 Bestimmung des Nutzens

Der Nutzen, der aus der virtuellen Inbetriebnahme gezogen werden kann, lässt sich nach den drei wirtschaftlichen Grundgrößen Zeit, Kosten und Qualität einteilen:

**Zeit:** Eine zeitliche Einsparung kann bei der VIBN größtenteils durch die Parallelisierung von Prozessen erreicht werden. Hierbei werden Teile der Inbetriebnahme bereits während der Fertigung und Montage durchgeführt. Außerdem werden durch ein fest integriertes Änderungsmanagement Änderungen an der Maschine, der Anlage oder der Software optimal über die mechatronischen Disziplinen verbreitet. Somit werden späte Kundenwünsche genauso wie Fehler direkt im Prozess berücksichtigt und blockieren die Folgeschritte nur in geringerem Maße. Die Programmierung komplexer Steuerungen auf der Baustelle geschieht naturgemäß in einer meist lauten Industrieumgebung (siehe VDW 1997). Bei der virtuellen Inbetriebnahme kann die gesamte Steuerung in einer Büroumgebung sowohl programmiert als auch getestet werden. Dadurch wird konzentriertes und effizientes Arbeiten gefördert. Unter der Voraussetzung, dass nach einer virtuellen Inbetriebnahme keine Fehler mehr vorhanden sind, ergibt sich das Potential der zeitlichen Einsparmöglichkeiten aus Abschnitt 2.1 bzw. VDW (1997) zu 8,1 bis 13,5% der Gesamtdurchlaufzeit. In



der Praxis wird sich das volle Maß dieser Einsparungen allerdings aufgrund von Modellungenauigkeiten und unvermeidbaren Fehlern nicht realisieren lassen.

ZÄH et al. (2006a) beschreiben die Ergebnisse einer experimentellen Feldstudie, anhand derer die Potenziale des Zeitgewinns verdeutlicht werden können. Bei der Studie haben jeweils 30 Entwickler mit VIBN und 30 Entwickler ohne VIBN dieselbe Maschine in Betrieb genommen. Das Inbetriebnahmeobjekt der Feldstudie ist die Beispielanlage *Dosenpresse*, deren 10 pneumatische und elektrische Aktoren durch eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) gesteuert werden, die wiederum auf 17 Endlagenschalter und Lichtschranken zurückgreifen kann. Die Versuchsdurchführung dauerte im Schnitt 2,5 Stunden und umfasste eine Softwareentwicklungs- und eine Inbetriebnahmephase. Die Probanden, die eine VIBN in der Entwicklung nutzen konnten, erhielten ein fertiges VIBN-Modell zum Steuerungstest. Die Softwareentwicklung ohne VIBN erreichte durchschnittlich lediglich 37% der geforderten Qualität (siehe Abbildung 17).

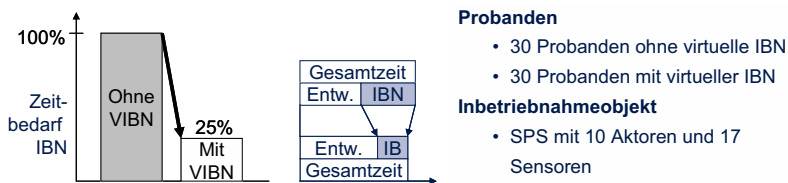


**→Steigerung der Softwarequalität von 37% auf 84%**

(Qualität definiert als Grad der Erfüllung aller Anforderungen)

Abbildung 17: Qualitätssteigerung durch virtuelle Inbetriebnahme einer Beispielanlage (ZÄH et al. 2006a)

Hinsichtlich eines Qualitätsgewinns durch die VIBN stellte sich heraus, dass die Software, die mittels einer VIBN vorgeprüft wurde, zu Beginn der realen Inbetriebnahme im Durchschnitt 84% der geforderten Funktionen bereits erfüllte. Damit konnte im Durchschnitt ein Zeitgewinn von 75% in der realen Inbetriebnahme erzielt werden. Gleichzeitig reduzierte sich durch ein stetigeres Arbeiten an der Software bei der Gruppe mit VIBN die Gesamtdurchlaufzeit um 15% (siehe Abbildung 18).



→ Verkürzung der Inbetriebnahme um ca. 75%  
 Verkürzung der Gesamtzeit um ca. 15%

Abbildung 18: Zeitgewinn durch virtuelle Inbetriebnahme einer Beispielanlage (ZÄH et al. 2006a)

Dies übertrifft sogar die Erwartungen von 8,5 bis 13% (siehe oben), da durch eine frühzeitig erfolgende Simulation in der Softwareentwicklung Synergieeffekte durch rasche Erfahrungsrückkopplung entstehen.

**Kosten:** Kosten korrelieren mit dem Zeitaufwand in verschiedener Hinsicht. Je geringer die Durchlaufzeit einer Maschine oder Anlage ist, desto niedriger fallen die damit verbundenen Kosten für Lagerfläche, Personal und Kapitalbindung aus. Je früher die fehlerfreie Lieferung an den Kunden erfolgt, desto früher findet der vollständige Kapitalrückfluss vom Kunden zum Hersteller statt. Neben dem für die Inbetriebnahme zuständigen Personal ist bei der realen Inbetriebnahme teilweise noch zusätzliches Sicherheits- und Hilfspersonal notwendig, das den Materialfluss abwickelt bzw. überbrückt. Die Kosten dafür können durch eine VIBN minimiert werden, da die Inbetriebnahme an der realen Maschine oder Anlage zeitlich kürzer ist, als bei einem Vorgehen ohne VIBN. Außerdem wird weitestgehend vermieden, dass kostspielige Schäden an der Maschine oder Anlage durch fehlerhafte Steuerungssoftware entstehen, da die Software vorher am Modell umfangreiche, zum Teil technische Grenzen überschreitende Tests durchläuft, bei denen weder Sach- noch Personenschaden entstehen kann.

**Qualität:** Es ist bereits zu Beginn der realen Inbetriebnahme Software vorhanden, die einen deutlich höheren Qualitätsstandard hat (siehe ZÄH et al. 2006a), was zur Vermeidung von Fehlern und Schäden beiträgt. Damit ist unmittelbar eine Steigerung der Qualität verbunden. Eine hohe Anfangsqualität der Software trägt außerdem zu einem guten Image beim Kunden bei, da eine schnelle Inbetriebnahme, die frei von Komplikationen ist, ein hohes Maß an Know-how vermittelt. Aber nicht nur die Kenntnis der Software trägt zur Steigerung der Qualität bei. Auch die Montage kann von einer VIBN profitieren, da die funktionierende Maschine oder Anlage bereits im Vorfeld genau studiert werden kann und so

der Wissensstand schon vor der Auslieferung sehr hoch ist. Damit ist es für Anlagenhersteller möglich, sich von anderen Wettbewerbern durch eine schnelle und qualitativ hochwertige Montage bzw. Inbetriebnahme abzuheben.

Neben Zeit, Kosten und Qualität existieren weitere Nutzenpotentiale in Verbindung mit der VIBN. Es können z.B. an der virtuellen Anlage oder Maschine bereits vor der Auslieferung Präsentationen für den Kunden durchgeführt und eventuelle Änderungen direkt gezeigt werden. Für den Kunden besteht außerdem die Möglichkeit, Mitarbeiter ohne Produktivitätsverlust am virtuellen Modell zu schulen. Auch im Servicefall oder bei nachträglichen Funktionserweiterungen kann der Hersteller Änderungen zuerst im Modell vornehmen und Funktionstests dort durchführen, bevor die reale Maschine oder Anlage umgerüstet wird.

Es kann gefolgert werden, dass der Nutzen von der Projektgröße abhängt, denn je größer ein Anlagenprojekt ist, desto größer ist auch der oben beschriebene, potentielle Nutzen, der daraus hervorgehen kann. Dies bedeutet, dass für sehr umfangreiche Projekte eine VIBN mehr Nutzen bringt als für Projekte geringeren Umfangs. Das Nutzenpotential steigt also mit der **Projektgröße**. Es wird in erster Näherung ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Projektgröße  $G_i$  und dem Nutzen  $N_i$  angenommen (siehe Gleichung 5).

$$N_i \sim G_i \quad (5)$$

Für die Größe  $G_i$  des Subsystems kann als Messgröße der Projektwert angesetzt werden. Dieser sollte in der im Unternehmen rechnerisch verwendeten Währung gemessen werden, also beispielsweise für ein in der Euro-Zone ansässiges Unternehmen in €.

Bei der Projektabwicklung der Inbetriebnahme eines komplexen Produktionssystems wird diese in eine Zahl von Einzelinbetriebnahmen zerlegt. Dies bedeutet, dass einzelne Maschinen bzw. Zellen oder Subsysteme jeweils einen eigenen Inbetriebnahmeprozess durchlaufen. Die zeitliche Folge von Inbetriebnahmevorgängen hängt davon ab, welche Subsysteme für ihre eigene Inbetriebnahme den Betrieb anderer Subsysteme erfordern. Die Inbetriebnahme eines Subsystems, von dessen Funktionieren die Inbetriebnahmevorgänge anderer Subsysteme abhängen, ist bedeutender als die Inbetriebnahme eines Subsystems, von dem keine anderen Inbetriebnahmevorgänge abhängig sind. Demnach steigt das Nutzenpotential für die Gesamtanlage mit der **Bedeutung** des Subsystems innerhalb des Gesamtsystems. Auch hier wird in erster Näherung eine direkte Proportionalität zwischen Nutzen  $N_i$  und der Bedeutung  $B_i$  angenommen (siehe Gleichung 6).

$$N_i \sim B_i \quad (6)$$

Die Bedeutung des Subsystems wird aus der Lage der realen Inbetriebnahme auf dem kritischen Pfad der Projektabwicklung ermittelt. Dazu wird im Projektplan untersucht, wie viele Inbetriebnahmevorgänge anderer Subsysteme von der Inbetriebnahme des betrachteten Subsystems abhängen. Die Zahl wird durch die Gesamtzahl von Inbetriebnahmevorgängen dividiert. Damit liegt eine Kennzahl für die Bedeutung des Subsystems mit der Einheit Prozent vor.

Im Kern adressiert die virtuelle Inbetriebnahme die Absicherung der Steuerungssoftware. Deshalb kann aus Projekten, die einen hohen Funktionsanteil in der Steuerungstechnik haben, auch ein hoher Nutzen gezogen werden, da mehr Fehler in der Steuerung somit früher erkannt und behoben werden. Je höher der Steuerungsanteil ist, desto größer ist auch die Gefahr, dass sich absolut gesehen mehr Fehler in der Steuerungstechnik verbergen. Damit steigt das Nutzenpotential mit dem **Anteil der Steuerungstechnik an der Gesamtfunktionalität** der Maschinen, weiter mit dem Begriff **Steuerungsanteil** bezeichnet. Es wird ebenfalls in erster Näherung angenommen, dass der Nutzen  $N_i$  proportional zum Steuerungsanteil  $S_i$  ist (siehe Gleichung 7).

$$N_i \sim S_i \quad (7)$$

Für die Messgröße des Steuerungsanteils an der Gesamtfunktionalität kann der in der Planung geschätzte Aufwand für die Steuerungsentwicklung im Verhältnis zum gesamten Entwicklungsaufwand angesetzt werden. Diese Messgröße wird in % angegeben, deshalb ist keine Normierung notwendig und sie kann vereinfacht anhand des geplanten zeitlichen Anteils der Steuerungsentwicklung an der geplanten Gesamtentwicklungszeit ermittelt werden.

Aus der Annahme, dass die Größen  $G_i$ ,  $B_i$  und  $S_i$  unabhängig voneinander sind, lässt sich mit den Gleichungen 5 bis 7 folgern, dass die Ableitungen des Nutzens nach den Größen  $G_i$ ,  $B_i$  und  $S_i$  jeweils konstant sind. Damit ergibt sich mit dem Koeffizienten  $n$  die Funktionsgleichung für den Nutzen in Gleichung 8:

$$N_i = n \times G_i \times B_i \times S_i \quad (8)$$

Wie bei der Elimination des Koeffizienten  $a$  wird für  $n$  der Weg verfolgt, diesen der linken Seite der Gleichung 8 zuzuschlagen und dadurch einen *spezifischen Nutzen*  $\underline{N}_i$  weiter zu verwenden:

$$\frac{N_i}{n} = \underline{N}_i = G_i \times B_i \times S \quad (9)$$

Die vorgestellten Messgrößen sind bereits vor dem Start des VIBN-Projekts bekannt und voneinander unabhängig.

## 5.3 Entwickelte Methode

Im folgenden Abschnitt wird eine Methodik zur wirtschaftlichen Optimierung des Einsatzes der VIBN beschrieben. Dazu wird zunächst das Grundkonzept erläutert und im Folgenden auf die einzelnen Schritte der Methodik näher eingegangen.

Das Grundprinzip der Methode gliedert sich nach dem Verfasser WÜNSCH (2006) in zwei Schritte *a* und *b*. Im Schritt *a* wird ein komplexes Produktionssystem zunächst in technisch handhabbare Subsysteme mit zugehörigen VIBN-Projekten aufgegliedert (siehe Abbildung 19, Schritte a). Im Schritt *b* werden die entstandenen VIBN-Projekte aus wirtschaftlicher Sicht miteinander verglichen (siehe Abbildung 19, Schritt b). Schritt *a* liegt der Gedanke zugrunde, dass nur dann eine wirtschaftlich optimale virtuelle Inbetriebnahme stattfinden kann, wenn die VIBN-Projekte an sich optimal an die technischen Gegebenheiten und die Fähigkeiten einer VIBN-Abteilung angepasst sind. Um das zu ermöglichen, wird der eigentlichen wirtschaftlichen Bewertung eine Methode zur Projekteinteilung vorausgeschickt. Erst wenn die anstehenden Projekte auf die VIBN-Abteilung abgestimmt sind, wird eine Bewertung dieser Projekte im Schritt *b* vorgenommen. Die Bewertung gibt dem Projektmanagement eine Entscheidungshilfe, welche der VIBN-Projekte letztendlich virtuell in Betrieb genommen werden sollen. Eine Übersicht über die Methode ist in Abbildung 19 dargestellt.

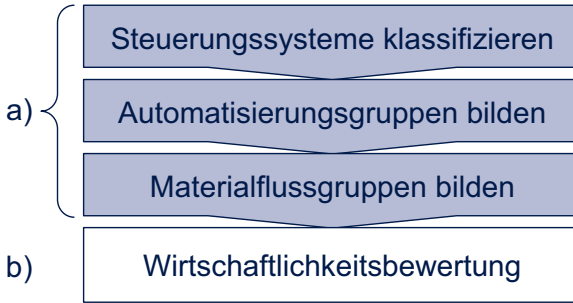


Abbildung 19: Methode für die wirtschaftliche Optimierung des Einsatzes der virtuellen Inbetriebnahme komplexer Produktionssysteme

In den folgenden Unterabschnitten werden alle Einzelschritte anhand des fiktiven, komplexen und automatisierten Produktionssystems aus Abbildung 20 erklärt. Dieses besteht aus einem flexiblen Materialfluss mit einer Transferstraße, einem agilen Fertigungssystem und einer robotergestützten Montagezelle.

Um VIBN-Projekte zu finden, die durch eine VIBN-Abteilung abgewickelt werden können, müssen als erstes sinnvolle Gruppen gebildet werden. Diese Gruppen sollten aus informationstechnischer-, automatisierungstechnischer- und materialflusstechnischer Sicht abgeschlossen sein.

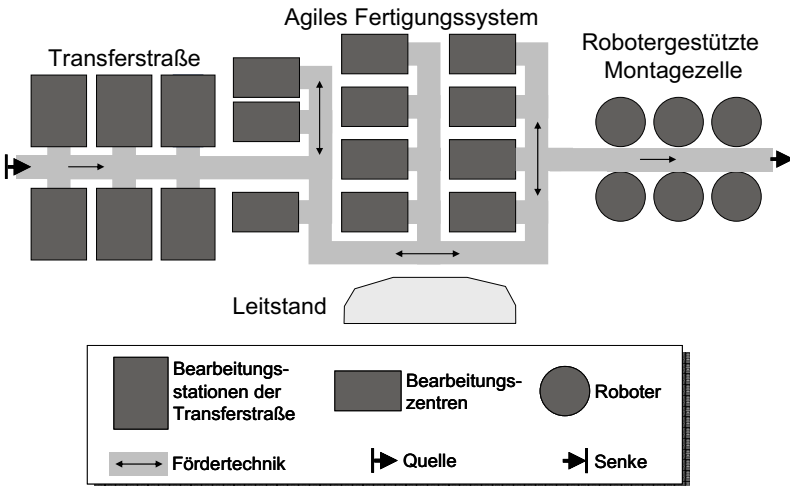


Abbildung 20: Exemplarisches Anlagenlayout

### 5.3.1 Klassifikation der Steuerungssysteme

Im ersten Schritt wird eine große Anlage gegliedert, indem alle vorhandenen Steuerungssysteme in ein Layout eingezeichnet werden (siehe Abbildung 21). Dies dient der Strukturierung der Informationstechnik. Es werden Prozessein- und -ausgänge, funktionale Verbindungen zu anderen Systemen, Steuerungstechnologien (RC, CNC, SPS, ...) und Kommunikationstechnologien zu den eingezeichneten Steuerungssystemen ermittelt.

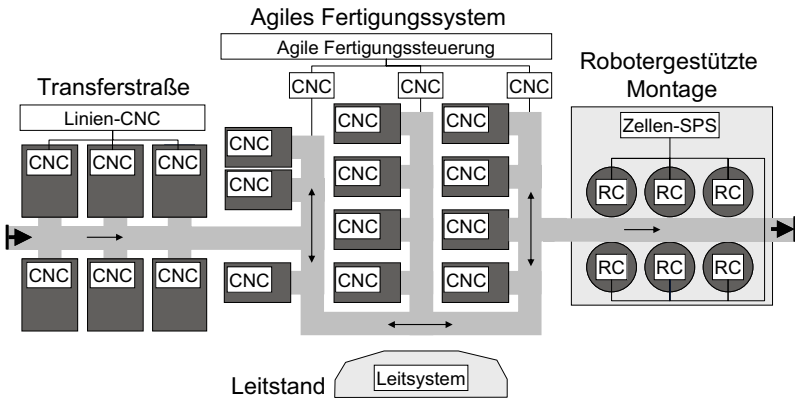


Abbildung 21: Exemplarisches Anlagenlayout mit eingezeichneten Steuerungssystemen

### 5.3.2 Bildung von Automatisierungsgruppen

Aus den nach informationstechnischer Sicht strukturierten Bereichen werden nun Automatisierungsgruppen gebildet. Dazu werden stark integrierte Systeme zu Gruppen zusammengefasst, wie in Abbildung 22 dargestellt (siehe Automatisierungsgruppen G1 bis G13). Kommunikations- und Steuerungstechnologien sind derart zu gruppieren, dass eine aufwandsarme Anbindung an die Simulationstechnik sichergestellt ist. Dies geschieht durch die Minimierung der Zahl von Verbindungen zwischen den Automatisierungsgruppen.

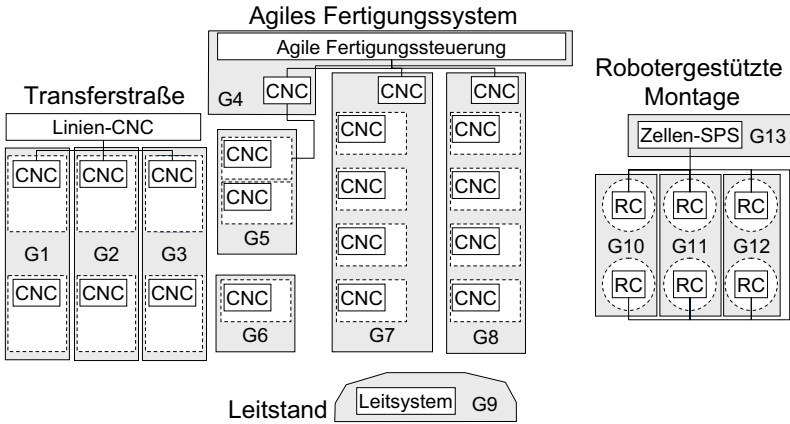


Abbildung 22: Bildung von Automatisierungsgruppen

### 5.3.3 Bildung von Materialflussgruppen

Im nächsten Schritt wird das Materialflussmodell des gesamten Systems in das Layout mit den Automatisierungsgruppen eingezeichnet. Automatisierungsgruppen mit einer hohen Zahl externer Materialflussverbindungen werden derart zu Materialflussgruppen zusammengefasst, dass die Zahl der Verbindungen minimiert wird (siehe Abbildung 23). Die Materialflussgruppen P1 bis P4 bilden dann die potentiellen bzw. VIBN-Projekte.

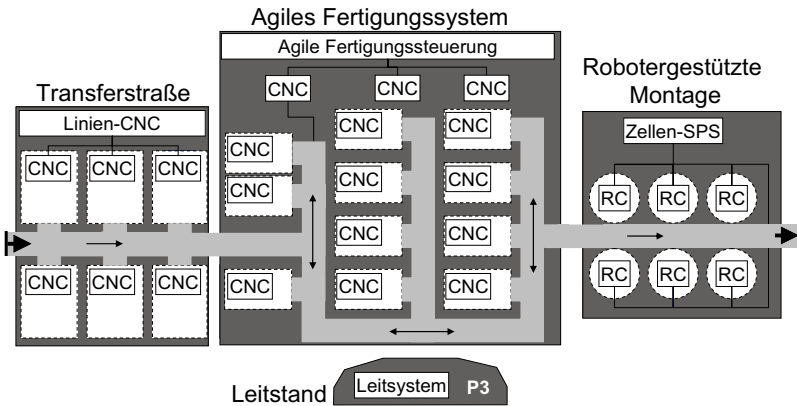


Abbildung 23: Bildung von Materialflussgruppen



### 5.3.4 Wirtschaftlichkeitsbewertung

Die Wirtschaftlichkeitsbewertung erfolgt anhand einer abgewandelten Kosten-Wirksamkeitsanalyse, wobei im Portfolio die Kosten in Form des Aufwandes und die Wirksamkeit in Form des Nutzens aufgetragen werden. „Die Kosten-Wirksamkeits-Analyse (KWA, englisch *Cost-Effectiveness-Analysis*) ist ein Instrument zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Projekten, deren Kosten zwar über Marktpreise ermittelt werden können, deren Nutzen jedoch nicht monetär gemessen werden kann (z.B. Bewahrung von Menschenleben) oder dessen monetäre Messung in der Gesellschaft umstritten ist“ (SCHULTE-ZURHAUSEN 2005).

Nach der Berechnung der Kennzahlen für den spezifischen Nutzen  $\underline{N}_i$  nach Gleichung 9 und den spezifischen Aufwand  $\underline{A}_i$  nach Gleichung 3 bzw. 4 kann jedes VIBN-Projekt in ein Wirtschaftlichkeitsportfolio (siehe Abbildung 24) eingetragen werden. Damit entsteht jeweils ein Portfolio mit der Zahl der Prozesse und Materialflussverbindungen  $\underline{Z}_{P/M,i}$  bzw. mit der Zahl der Ein- und Ausgänge  $\underline{Z}_{E/A,i}$  über dem spezifischen Nutzen  $\underline{N}_i$ . Die *spezifische Rentabilität*  $\underline{R}_i$  als Quotient aus spezifischem Nutzen und spezifischem Aufwand stellt dabei jeweils die Steigung der Ursprungsgerade dar, die durch die Koordinaten eines VIBN-Projektes verläuft.

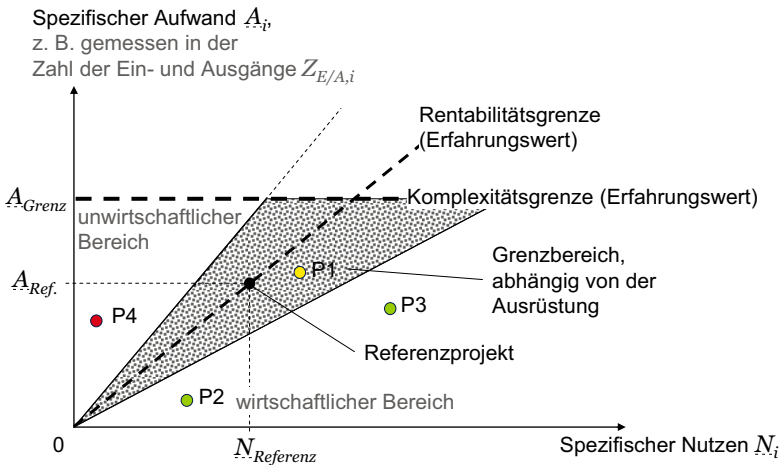


Abbildung 24: Beispiel eines Wirtschaftlichkeitsportfolios für die Beurteilung von Nutzen und Aufwand für die VIBN-Projekte P1 bis P4; der Aufwand mit der Zahl der Ein- und Ausgänge des Subsystems abgeschätzt

Sind ausreichend Referenzprojekte vorhanden, die die maximale Komplexität, die mit der Simulationstechnik beherrscht werden kann, belegen,

so kann eine Komplexitätsgrenze eingezeichnet werden. Projekte, die oberhalb dieser Grenze liegen, müssen in kleinere Projekte aufgeteilt werden. Das Portfolio lässt sich in vier Bereiche unterteilen. Der Bereich oberhalb der Komplexitätsgrenze  $\underline{A}_{Grenz}$  ist per se unwirtschaftlich, da das VIBN-Labor mit der Projektdurchführung technisch überfordert wäre. Das Rechteck unterhalb wird von der Diagonalen durch den Punkt  $(\underline{N}_{Referenz}/\underline{A}_{Referenz})$  in zwei Bereiche geteilt. VIBN-Projekte im linken Bereich sind technisch durchführbar, generieren aber im Vergleich zum Aufwand einen derart geringen Nutzen, dass die Durchführung unwirtschaftlich ist. Der Bereich rechts von der Diagonale stellt den Bereich wirtschaftlicher VIBN-Projekte dar. Es ist sinnvoll, einen weiteren Bereich abzugrenzen, der zentriert auf der Diagonalen liegt und einen Grenzbereich darstellt, in dem Unsicherheit herrscht. Projekte im Grenzbereich sollten bei freier Kapazität ausgeführt werden, da hierdurch Erfahrung aufgebaut und die Unsicherheit in diesem Bereich durch weitere Referenzprojekte reduziert wird.

Anhand der Portfolios können auf einen Blick erfolversprechende Projekte von riskanteren Projekten unterschieden werden. Naturgemäß ist die Durchführung von Projekten zu vermeiden, die bei hohem Aufwand nur wenig Nutzen mit sich bringen. Der gewünschte Bereich ist derjenige, bei dem hoher Nutzen mit geringstem Aufwand erzielt werden kann. Der in der Praxis am häufigsten auftretende Fall wird der Grenzbereich sein, bei dem Aufwand und Nutzen in etwa in einer Größenordnung liegen. Die Entscheidung für die Durchführung von Projekten sollte in der Rangfolge von rechts unten nach links oben durchgeführt werden (siehe Abbildung 24).

Die in diesem Kapitel vorgestellte Methode ermöglicht es in der Projekt-Planungsphase eines komplexen Produktionssystems bereits, auf Basis leicht zu ermittelnder Messgrößen und mit Hilfe eines geplanten Anlagensystems den Einsatz einer VIBN zu optimieren. Dabei wird das Gesamtsystem zunächst in mehreren Schritten in sinnvoll unterteilte Subsysteme zerlegt. Diese werden im Anschluss mit Hilfe einfach vorab zu ermittelnder, projektbezogener Messgrößen hinsichtlich ihres Verhältnisses von Aufwand und Nutzen bewertet. Wird das Ergebnis in ein Wirtschaftlichkeitsportfolio mit Aufwand über dem Nutzen eingetragen, so können diejenigen Subsysteme abgelesen werden, für die sich eine VIBN lohnt.

## 6 Technologien für die Modellbildung

Für einen erfolgreichen Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme spielt die eingesetzte Simulationstechnologie eine entscheidende Rolle. Ein Teilziel dieser Arbeit (siehe Abschnitt 1.3) ist der Aufbau eines Technologiebaukastens, mit Hilfe dessen eine VIBN-Abteilung auf das Projektgeschäft vorbereitet werden kann. Dazu werden die Technologien anhand der Eigenschaften der Anlagen- und Automatisierungstechnik aus den im Stand der Technik dargestellten Systemen ausgewählt. Gegebenenfalls müssen die Ansätze derart erweitert werden, dass ein konsistenter Steuerungstest bzw. eine genauere Repräsentation des Materialflusses und der Bahnbewegungen unter Prozesseinfluss möglich wird. Vor diesem Hintergrund werden in diesem Kapitel Richtlinien für den Aufbau und den Betrieb eines VIBN-Labors entwickelt.

Aus dem Abschnitt 3.1 folgen für die Steigerung der Wirtschaftlichkeit bei der virtuellen Inbetriebnahme zwei wesentliche Stoßrichtungen, die durch die Simulationsumgebung selbst beeinflusst werden können: Zum einen muss die Modellerstellungsphase erleichtert und verkürzt werden, zum anderen kann durch eine Steigerung der Testqualität während der virtuellen Inbetriebnahme die nachfolgende reale Inbetriebnahme weiter verkürzt werden.

Im Folgenden wird eine Systematik für die Auslegung bzw. Auswahl der Simulationstechnologie für eine VIBN-Abteilung aufgebaut. Zunächst werden die allgemeinen Anforderungen dargelegt und daraus eine generische Funktionsstruktur für die Simulationstechnik einer VIBN-Abteilung entwickelt. Basierend auf dieser Funktionsstruktur werden im dritten Abschnitt Ausprägungen aufgeführt. Diese werden als Entscheidungshilfe im vierten Abschnitt in Form eines Lösungsbaukastens zusammenfassend dargestellt.

### 6.1 Anforderungen

AMANN (1994) formuliert allgemeine Anforderungen an die Verwendung von Simulation bezogen auf das Ziel, Zeit und Kosten zu reduzieren. Die Simulationsumgebung muss eine dem Kenntnisstand des Benutzer angepasste Bedienung ermöglichen, damit Experten, aber auch Anwender mit unterschiedlich fundierten Kenntnissen in der Lage sind, das System einzusetzen. Dies wird unter anderem erreicht durch Flexibilität, Benutzerfreundlichkeit, Offenheit, Integration in vorhandene Anwendungen zur Datenverarbeitung sowie Möglichkeiten zur Modularisierung und Wiederverwendung. Über diese allgemeinen Anforderungen hinaus definiert

er spezielle Anforderungen an die Verwendung von Simulation als Testumgebung für Steuerungssoftware. Das Simulationssystem muss es dem Bediener zur Laufzeit ermöglichen, die Simulationszeit zu starten oder anzuhalten sowie das Modells zu manipulieren. Die Benutzerschnittstelle muss durch eine Prozessvisualisierung jederzeit den Modellzustand transparent darstellen sowie einen gezielten Zugriff auf Modellparameter und -zustände erlauben. Für eine Fehlersuche muss eine Zustandsarchivierung integriert sein. Eine flexible Nachbildung der Sensorik und die Trennung von Material- und Informationsfluss müssen ebenso realisiert sein. Amanns Forderung nach Modellen, die keine eigene Steuerungsintelligenz enthalten, gilt ausschließlich für die zu testende Steuerung. Es muss allerdings dem Effekt der steigenden Dezentralisierung von Steuerungsintelligenz in der Automatisierungstechnik Rechnung getragen werden. Dies bedeutet, dass je nach der Grenze zwischen Steuerung und Simulation ggf. durchaus Steuerungsintelligenz im Simulationsmodell enthalten sein muss, um beispielsweise eine übergeordnete Steuerung zu testen. Amman bezeichnet die Simulation auch als *Testbett*, ein Begriff aus der Softwareentwicklung, der in diesem Zusammenhang ein Softwareprogramm bezeichnet, das ausschließlich für die Untersuchung der zu testenden Software entwickelt wird. Bei der VIBN wird der Begriff *Testbett* synonym für die Verhaltenssimulation genutzt, die gegenüber der Steuerungssoftware die Maschine nachbildet. Amman fordert, dass eine Laufzeitkopplung zwischen dem Testbett und dem Testobjekt durch entsprechende Schnittstellen ermöglicht werden muss.

Nach BENDER & ALBERT (1999) ergeben sich weitere Anforderungen an ein Simulationssystem für den echtzeitfähigen Steuerungstest. Die zu testende Steuerung wird mit einer Hardware-in-the-Loop-Kopplung in das simulierte Testbett eingebunden. Dabei wird durch die Forderung nach der Echtzeitfähigkeit des Simulationssystems die Konsistenz zwischen virtueller Maschine und Steuerung gewahrt. Ein vollständiger Steuerungstest wird erst durch eine Abbildung von Materialfluss-, Bearbeitungs- und Montageprozessen möglich. Das Inbetriebnahme- und Testpersonal muss Werkzeuge zum Beobachten und zur Manipulation interner Prozessgrößen erhalten, um beispielsweise Störungen zu simulieren. Durch eine direkte Kopplung über das Prozessabbild der Steuerung, beispielsweise über den Feldbus, kann die Einbindung intelligenter, dezentraler Komponenten erfolgen.

ZÄH et al. (2004, S. 13-7, Bild 6) gliedern die Anforderungen an die Simulationsmodelle von Produktionssystemen in die drei Bereiche Abbildung des Betriebsverhaltens, Abbildung des Störungsverhaltens und Wiederwendbarkeit. Bei der Abbildung des Betriebsverhaltens stehen das Zeitverhalten, der Werkstück- und Werkzeugfluss, der Bearbeitungsprozess und eine anwendungsgerechte Modellierungstiefe im Vordergrund.

Für die Abbildung des Störungsverhaltens sind diverse Effekte wie Zeitüberschreitungen, Verschmutzung, Geschwindigkeitsbeeinflussung, Totalausfall, Drahtbruch sowie stochastische Vorgänge, beispielsweise Signalprellen, abzubilden. Eine maximale Wiederverwendbarkeit wird durch Strukturierung von Modellen in standardisierte Module und Komponenten erreicht. Da insbesondere für die Steigerung der Steuerungsqualität und für die Einsparung von Inbetriebnahmezeit eine höhere Qualität der simulationsgestützten Testphase notwendig wird, müssen diese Anforderungen um den Qualitätsaspekt erweitert werden. Dies wird durch eine hohe Abbildungsqualität im Modell hinsichtlich Peripherieverhalten und Materialflussverhalten sowie durch die Einhaltung des Abtasttheorems (siehe Unterabschnitt 2.3.2) zwischen Simulation und Steuerung sichergestellt.

ZÄH et al. (2003b) formulieren die Anforderungen an die Integration eines Testautomaten in eine Simulationsumgebung für den Test von Steuerungssoftware. Die Anforderungen umfassen die Bereiche *Schnittstelle zum Steuerungssystem* und *Schnittstelle zum Simulationssystem* sowie die *Bedienerschnittstelle* mit der Testfallgenerierung und -verwaltung.

An dieser Stelle werden Anforderungen von AMANN (1994) mit denen von BENDER & ALBERT (1999) und ZÄH et al. (2004) zusammengeführt. Unter durchgängiger Berücksichtigung des Abtasttheorems ergeben sich für die technische Ausrüstung einer VIBN-Abteilung die Anforderungen nach Abbildung 25. Die Anforderungsliste ist lösungsorientiert nach Funktionsgruppen gegliedert.

<b>Verfügbarkeit der Automatisierungstechnik</b>	
	Automatisierungs- und Steuergeräte
	Programmier- und Projektierungswerkzeuge
	Inbetriebnahme- und Diagnosewerkzeuge
<b>Abdeckung der Schnittstellentechnik</b>	
	Kopplung des Testobjekts mit dem Testbett
	Abdeckung der Technologien
	Sicherstellung der Reaktionszeit (Abtasttheorem)
	Sicherstellung der Bandbreite (Abtasttheorem)
<b>Funktionalität des Simulationssystems</b>	
	Integrationsarchitektur
	Bereitstellung erforderlicher Leistung (Abtasttheorem)
	Laufzeitdiagnose, -archivierung und -manipulation der Modellzustände
	Benutzerfreundliche und intuitive Visualisierung
<b>Umfang des Modells</b>	
	Unterstützung hoher Komplexität
	Sicherstellung der Abbildungstreue
	Wirtschaftlicher Rechenaufwand
	Mechanismen zur Modellstrukturierung
	Skalierbare Simulationsmodelle
<b>Effizienz des Modellerstellungsprozesses</b>	
	Unterstützende Modellierungswerkzeuge und Integration in die Entwicklung
<b>Effektivität des Inbetriebnahmeprozesses</b>	
	Nutzung von Checklisten im Rahmen einer systematischen Testplanung
	Form des Steuerungstests

Abbildung 25: Anforderungen an die Ausrüstung eines VIBN-Labors

## 6.2 Generische Funktionsstruktur

Für die Auslegung der Simulationstechnologie wird im Folgenden eine generische Funktionsstruktur als Basis eingeführt (siehe Abbildung 26). Sie beinhaltet den kleinsten gemeinsamen Nenner aller Ansätze der virtuellen Inbetriebnahme und bedient damit alle Anforderungsgruppen mit ihren Grundfunktionen.

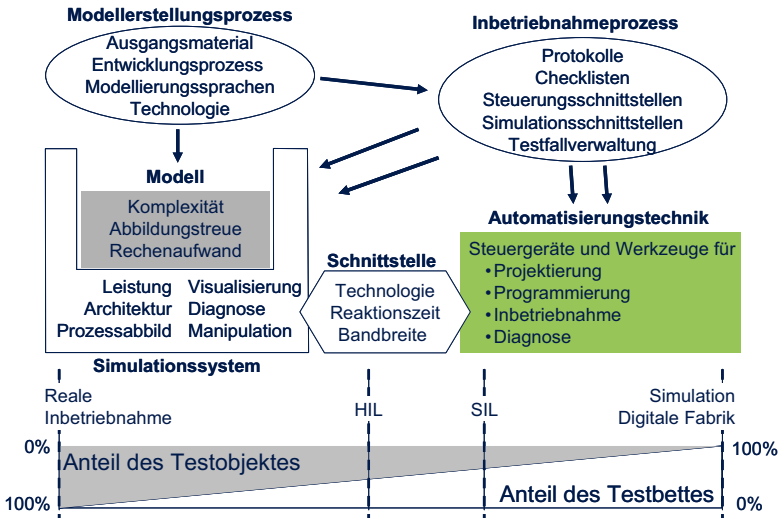


Abbildung 26: Generische Funktionsstruktur des VIBN-Labors, bestehend aus den Systemen „Automatisierungstechnik“, „Schnittstelle“, „Simulationssystem“, „Modell“ und den Prozessen „Inbetriebnahme“ und „Modellerstellung“; je nach Ausprägung des Testobjektes mit mehr oder weniger realen Komponenten verschiebt sich die Grenze auf den verschränkten Keilen von „Testbett“ und „Testobjekt“

Es setzt sich zusammen aus dem *Automatisierungssystem* als Testobjekt, einer *Schnittstelle* und dem Testbett, bestehend aus *Simulationssystem* und *Modell*. Die Funktionsstruktur wird durch die Funktionen des *Modellerstellungsprozesses* und des *Inbetriebnahmeprozesses* vervollständigt.

Je nach Implementierung dieses Modells verschiebt sich die Grenze zwischen Testobjekt und Testbett über die vier Grundelemente, angedeutet mit den verschränkten Keilen von *Testbett* und *Testobjekt*. Wird beispielsweise die Automatisierungstechnik in einer Hardware-in-the-Loop-Simulation (HIL) über die reale Feldebustechnologie mit einer Echtzeitsimulation gekoppelt, so verläuft die Grenze zwischen Testbett und Testobjekt durch die Schnittstelle. Wird die Automatisierungstechnik dagegen mit Hilfe von Emulatoren ebenfalls im Rechner nachgebildet, so genannte Software-in-the-Loop-Simulation (SIL), so verschiebt sich die Grenze weiter nach rechts in die Automatisierungstechnik und das Testobjekt reduziert sich auf die Steuerungssoftware.

## 6.3 Ausprägungen

In diesem Abschnitt werden für jede generische Grundfunktion des Simulationssystems die bekannten Ausprägungen diskutiert und im folgenden Abschnitt im Lösungsbaukasten systematisiert dargestellt.

### 6.3.1 Automatisierungstechnik

Unterschieden werden müssen Robotersteuerungen (RC), Bewegungssteuerungen (MC), Numerische Steuerungen (NC), Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS bzw. PLC), Leitsysteme (MES), Bedienterminals (HMI), Betriebs- und Maschinendatenerfassung (BDE/MDE) sowie Sicherheitstechnik (Sicherheits-SPS). Für einen Systemtest im Rahmen der virtuellen Inbetriebnahme müssen diese je nach verfolgtem Ansatz wahlweise als reale Hardware oder als Simulationsmodell vorliegen. Bei einer simulations-gestützten Abbildung der Steuerungstechnik ist, insbesondere bei dezentralen und verteilten Steuerungssystemen, sicherzustellen, dass die vollständige Automatisierungstechnik, inklusive der in der realen Anlage eingepflanzten Kommunikationstechnik, dargestellt werden kann. Der Lösungsraum im Anforderungsbereich *Automatisierungstechnik* ist in Abbildung 27 aufgeführt.

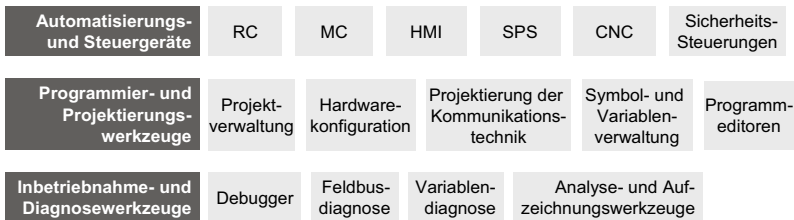


Abbildung 27: Teil des Lösungsbaukastens für die Verfügbarkeit der Automatisierungstechnik

Da sich in der Phase der Inbetriebnahme erfahrungsgemäß deutliche Änderungen gegenüber dem Stand aus der Konstruktion ergeben können, werden sämtliche Projektierungs- und Programmiergeräte aller in Betrieb zu nehmenden Steuergeräte benötigt. Dies umfasst Werkzeuge für die Hardwarekonfiguration, die Projektierung der Kommunikationstechnik sowie die Symbol- und Variablenverwaltung. Hinzu kommen sämtliche Programmeditoren und Werkzeuge zur Projektverwaltung mit Anbindung an die Versions- und Projektverwaltung.



Über diese Werkzeuge hinaus werden Diagnose- und Inbetriebnahmewerkzeuge benötigt, mit Hilfe derer die einzelnen Inbetriebnahmeschritte durchgeführt werden. Zu gängigen Inbetriebnahmewerkzeugen zählen Debugger, Variablendiagnose, Feldbusdiagnose und Analyse- bzw. Aufzeichnungs-Werkzeuge der einzelnen Zielsysteme.

Aus der verwendeten Steuerungs- und Automatisierungstechnik lässt sich auf die erforderliche reale Taktzeit für die Simulation schließen. Dazu muss zunächst die geringste reale Taktzeit und die Bandbreite der Steuergeräte ermittelt werden, mit denen der Prozess gesteuert wird. Falls die Größen stark divergieren, müssen hier im Sinne einer wirtschaftlichen Skalierung der Simulationstechnik Bereiche gleicher Taktung zusammengefasst werden. Üblicherweise fallen beispielsweise Bahnsteuerungen und Antriebsregler in den Bereich von 1 ms Taktzeit, während speicherprogrammierbare Steuerungen im Bereich von zehn bis 100 ms anzusiedeln sind. Aus der Forderung nach Einhaltung des Abtasttheorems aus Unterabschnitt 2.3.2 folgt für das simulierte Testbett dieselbe maximale Zykluszeit, die auch das Automatisierungssystem bestimmt.

Diese Forderung gilt für einen Test mit virtueller Zeitachse gleichermaßen wie für eine HIL-Echtzeitsimulation. Bei der Verwendung einer virtuellen Zeitachse wird durch die maximale Zykluszeit die Schrittweite festgelegt, mit der die Daten zwischen Steuerungs- und Maschinenmodell ausgetauscht werden. Bei einer HIL-Simulation entspricht die Taktzeit der real ablaufenden Zeit, was eine Leistungsanforderung an das Simulationssystem darstellt.

### 6.3.2 Schnittstellen

Die Schnittstellen dienen der Kopplung der zu testenden Steuerung mit der Peripheriesimulation, also der Verbindung von Testobjekt und Testbett. Zunächst muss dabei entschieden werden, ob ein reiner Test der Steuerungssoftware durchgeführt wird oder zusätzlich auch das Zusammenspiel von Hard- und Firmware (Firmware bezeichnet proprietäre Gerätesoftware, die meist eingebettet auf Microcontollern abläuft und i. d. R. nur vom Hersteller geändert wird) mit der Software sowie ggf. anderen Steuerungssystemen geprüft werden soll. Dies bedeutet die Entscheidung zwischen einem Ansatz mit virtueller Zeitachse nach Abschnitt 3.5 und dem Hardware-in-the-Loop-Ansatz nach Abschnitt 3.6, 3.7 oder 3.8. Der höheren Testtiefe beim HIL-Ansatz steht eine weniger aufwändige Architektur der Simulationsumgebung bei der Verwendung einer virtuellen Zeitachse gegenüber (siehe auch Abbildung 28).

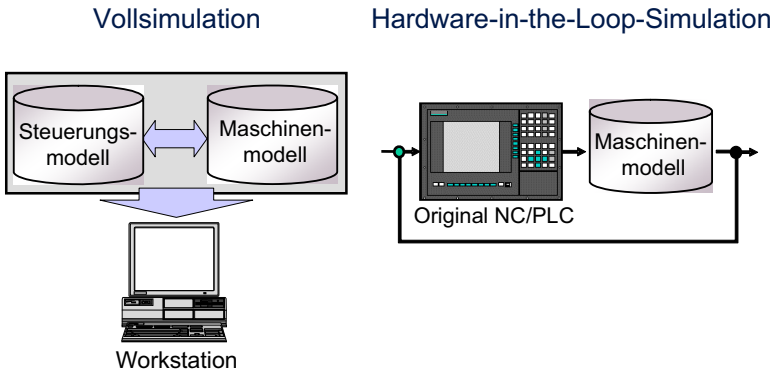


Abbildung 28: Ansätze der Vollsimulation und der Hardware-in-the-Loop-Simulation

Die verwendeten Schnittstellen orientieren sich an den im realen System einzusetzenden industriellen Kommunikationsschnittstellen (siehe auch Abbildung 29). Dabei ist zu garantieren, dass die erreichten Zykluszeiten über die Systemkette vom Automatisierungssystem über den Feldbus und die Schnittstelle bis in die Simulation die Zykluszeiten des Automatisierungssystems nicht überschreiten. Die kommunikationstechnische Ausrüstung einer VIBN-Abteilung muss die Abdeckung der in der Anlagentechnik verbauten Technologien ermöglichen. Diese liegen in den Grundvarianten einer direkten Verdrahtung der Peripherie an der Steuerung, gekapselt über digitale Antriebsbus-, Feldbus-, Ethernet-, Echtzeit-Ethernet- oder Sicherheitstechnologie. Im Falle einer Simulation mit virtueller Zeitachse oder generell mit im Rechner simulierter Steuerungshardware wird die Kopplung für gewöhnlich über einen gemeinsamen Speicherbereich oder eine TCP/IP-Kopplung realisiert.

Für den Fall einer HIL-Simulation muss das Simulationssystem über die passenden Schnittstellen verfügen, mit Hilfe derer die peripherieseitige Kommunikationstechnik gegenüber der Steuerungstechnik dargestellt werden kann. Essentielle Anforderungen sind dabei neben der Abdeckung der technischen Protokolle die Einhaltung von Zykluszeiten und die Bedienung der erforderlichen Bandbreite beim Signalaustausch.

Für die Bereitstellung von Zykluszeit und Bandbreite gibt es die Möglichkeit, neben einer Abbildung aller Signale auf einem Niveau Abstufungen einzelner Signale nach Funktion in der Anlage vorzunehmen. So können Leistungsreserven von langsam veränderlichen Signalen auf schnell veränderliche Signalgruppen transferiert werden, indem eine Abstufung nach Bandbreite und Zykluszeit erfolgt. Demgemäß wäre es sinnvoll, bei-

spielsweise für die Abbildung von Antriebssignalen eine feinere Taktzeit zu garantieren als für Zustandssignale von Hilfseinheiten, wie beispielsweise Versorgungsaggregaten. Ein Überblick über die diskutierten Lösungen findet sich in Abbildung 29:

<b>Kopplung Testobjekt mit dem Testbett</b>	Vollsimulation mit virtueller Zeitachse		Software-in-the-Loop-Kopplung	Hardware-in-the-Loop-Kopplung		
<b>Abdeckung der Technologien</b>	Gemeinsam. Speicher	Realtime Ethernet	Feldbus-systeme	Antriebsbus-systeme	Sicherheits-bussysteme	Direkte Verdrahtung
<b>Sicherstellung der Reaktionszeit (Abtasttheorem)</b>	1 ms	10 ms	100 ms	Virtuelle Zeitachse		
<b>Sicherstellung der Bandbreite (Abtasttheorem)</b>	Alle Signale auf gleichem Niveau		Abstufung nach Signalgruppen			

Abbildung 29: Teil des Lösungsbaukastens für die Abdeckung der Schnittstellentechnik

### 6.3.3 Simulationssystem

Die Anforderungen an das Simulationssystem divergieren je nach der in Unterabschnitt 6.3.2 getroffenen Entscheidung zwischen HIL- oder Vollsimulation mittels virtueller Zeitachse (ZÄH et al. 2004a).

Bei einer Entscheidung für die Vollsimulation mit Integration unterschiedlicher Simulationsanwendungen im Zeitbereich über eine virtuelle Zeitachse stellen nur die Rechenleistung und der Speicherplatz Einschränkungen in Modellgröße und –komplexität dar. So kann beispielsweise eine gekoppelte Simulation, bestehend aus NC-Steuerungssimulation, Simulation der Regelungstechnik und flexibler Mehrkörpersimulation nach BAUDISCH 2001 erfolgen (siehe auch Abbildung 30).

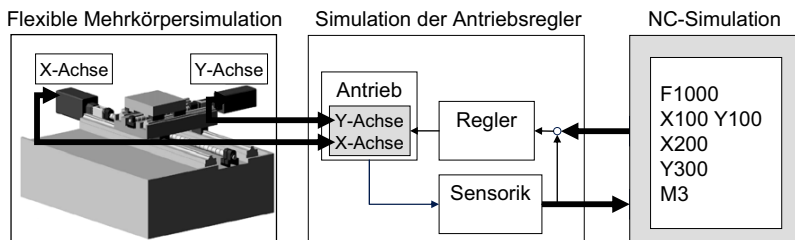


Abbildung 30: Gekoppelte Simulation eines Kreuztisches für die Durchführung eines virtuellen Kreisformtest

Durch ein intelligentes Zeitscheibenmanagement wird jedem der gekoppelten Simulationsmodelle jeweils für einen Basis-Zeitschritt die Initiative zugeteilt, die reihum weitergegeben wird. Die jeweils inaktiven Simulationsmodelle werden angehalten und warten jeweils auf die aktuellen Ergebnisse des aktiven Simulationsmodells. Dies führt zu einer aufwandsproportionalen Dehnung der virtuellen Zeitachse, wodurch die Konsistenz der Simulationsmodelle untereinander sichergestellt wird. Die Vorteile der Vollsimulation liegen dabei in der Möglichkeit, nicht echtzeitfähige Modelle einzubinden, sofern sie durch Solver im Zeitbereich lösbar sind, wie beispielsweise mit der Finite-Elemente-Methode oder Mehrkörpersystemen generierte Modelle. Ein weiterer Vorteil besteht in dem gegenüber einem HIL-Ansatz fehlenden Aufwand an steuerungsspezifischer Hardware, da die Steuerung in diesem Fall virtuell auf der Workstation abgebildet wird. Darin liegt allerdings auch der Nachteil begründet, dass ein derartiges Simulationsmodell des Steuerungssystems verfügbar sein muss. Wenn es sich dabei nämlich, wie es in der Regel der Fall ist, um proprietäre Steuerungssysteme handelt, kann die Simulation der Steuerungshard- und -firmware nur durch den Hersteller selbst zur Verfügung gestellt werden. Dies führt aufgrund der mit der Weiterentwicklung der Steuerungen ständig erforderlichen Aktualisierung zu weiteren Kosten, die letztendlich der Anwender zu tragen hat. Ein weiterer Nachteil kann mit der Notwendigkeit entstehen, dass die Steuerungssoftware angepasst werden muss, um auf der virtuellen Steuerung lauffähig zu sein. Des Weiteren sind insbesondere bei komplexen Automatisierungssystemen die Laufzeiten verteilter Programme auf mehreren Prozessoren nur mit erheblichem Aufwand abzubilden, wodurch der HIL-Ansatz durch die Bereitstellung aller Prozessoren im Kommunikationsverbund einen weiteren Vorzug bietet (ZÄH et al. 2004a).

Bei einer Grundsatzentscheidung für eine HIL ist die Architektur des Simulationssystems weitgehend festgelegt. Die zu testenden Steuerungen werden im realen Kommunikationsverbund aufgebaut und mit einem virtuellen Peripheriemodell gekoppelt. Dieses bildet das Verhalten der Prozessperipherie gegenüber der Steuerung ab (siehe Abbildung 31). Der Vorteil ist eine realistische Darstellung der Programmlaufzeiten auf den originalen Prozessoren, insbesondere im Steuerungsverbund. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Automatisierungstechnik auch bei der realen Inbetriebnahme im Zusammenspiel funktioniert. Die Hauptnachteile resultieren aus der Forderung nach einer Echtzeitfähigkeit des Maschinenmodells zur Einhaltung des Abtasttheorems, damit die Konsistenz zwischen Steuerung und Simulation gewahrt ist. Dies führt dazu, dass alle Modellteile auf echtzeitfähigen Simulationssystemen laufen müssen und dass die Modellierungstiefe durch die aktuelle Rechnerhardware begrenzt wird (ZÄH et al. 2004a).

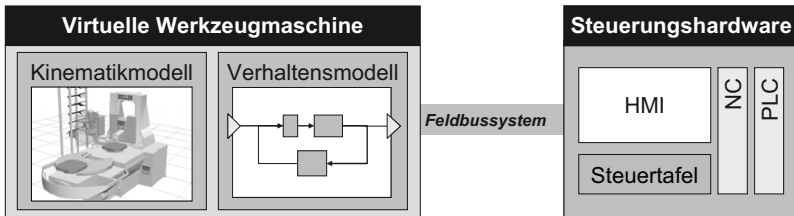


Abbildung 31: Hardware-in-the-Loop-Ansatz mit virtueller Werkzeugmaschine, bestehend aus Verhaltens- und Kinematikmodell, verbunden über ein Feldbussystem mit einer vollwertigen CNC-Steuerung, bestehend aus NC, PLC, Steuertafel und HMI

Nach Zäh et al. (2004b) sind insbesondere für komplexe, zusammengesetzte Steuerungssysteme, wie beispielsweise CNC-Steuerungen, die aus dem NC-Kern für die Bahnsteuerung, der SPS für die Ablauf- und Verriegelungssteuerung sowie dem HMI für die Bedieneroberfläche bestehen, in der Regel keine aktuellen Simulationssysteme verfügbar. In diesem Markt sind ggf. durch den Einzug PC-basierter Steuerungen im nächsten Jahrzehnt Vereinfachungen zu erwarten.

Nach der wesentlichen Entscheidung über den Grundaufbau des Simulationssystems werden im Weiteren die Anforderungen an das Simulationssystem gegliedert in die Bereiche

- Architektur bzw. Aufbau des Simulationssystems,
- Bereitstellung der Rechenleistung,
- Laufzeitdiagnose, -archivierung und -manipulation von Modelldaten und
- benutzerfreundliche, intuitive Oberfläche.

### 6.3.3.1 Architektur

Die Integration unterschiedlicher Simulationstechnologien in die Simulationsumgebung kann auf verschiedene Arten erfolgen: Einige Hersteller von VIBN-Umgebungen bieten geschlossene Komplettsysteme aus einer Hand, mit deren Hilfe eine Bandbreite an Simulationsszenarien abgedeckt wird. Vorteil dieser Komplettsysteme ist die Abstimmung aller Elemente auf den Nutzen. Der Nachteil liegt darin, dass eine Erweiterung dieser Systeme durch den Anwender schwierig zu bewerkstelligen ist.

## 6 Technologien für die Modellbildung

Anwender können durch die Kopplung unterschiedlicher Simulationsanwendungen über Standardschnittstellen wie Programmier-API, TCP/IP oder gemeinsame Speicherbereiche einen schnellen Mehrwert generieren. Handelt es sich beispielsweise bei einer Anlage um ein System mit umfangreichem, flexiblem Materialfluss oder veränderlicher Prozessführung, so muss dies auch im Verhaltensmodell abgebildet werden, um die Steuerungstechnik vollständig zu testen. Hier bietet es sich an, eine Trennung in kontinuierliche Verhaltensmodellierung mit regelungstechnisch-blockorientierter Modellierung der Antriebsperipherie und ereignisdiskreter Verhaltensmodellierung für die Abbildung des Materialflusses bzw. der Prozesse einer Anlage durchzuführen (siehe Abbildung 32).

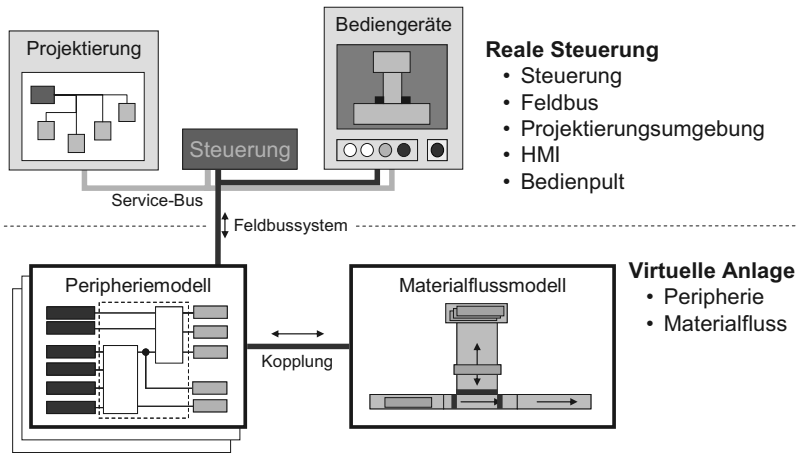


Abbildung 32: Systemaufbau für die Integration einer Materialfluss-Simulation

Weitere Formen der Offenheit werden durch modulare offene Systeme aus dem Bereich der numerischen Simulation gebildet. Insbesondere im wissenschaftlichen Umfeld existieren Systeme mit einem Quasistandard und umfangreichen offenen Bausteinbibliotheken. Die Möglichkeit, aus den Simulationsumgebungen Programme für Echtzeitsysteme zu generieren, erlaubt damit neben der Verwendung in einer gekoppelten Simulation nach Abbildung 30 auch den HIL-Test.

Eine weitere Alternative bei der HIL-Simulation besteht in der Verwendung eines Echtzeitsystems mit Zugriff auf die Quellcode-Ebene. Die Simulationsmodelle können, falls externe Programme in Form von Quellcode eingebunden werden können, um nahezu beliebige Simulationstechnologien erweitert werden. Das Simulationsmodell entsteht durch Kompilieren von Modellen aus unterschiedlichen Quellen für das Zielsystem.

Damit sind der technologischen Gestaltung der Simulationsumgebung keine Grenzen gesetzt. Dies wird allerdings damit erkauft, dass der Anwender sich ggf. mit der Treibergenerierung für die Feldbusanbindung und mit der Sicherstellung der Integration unterschiedlicher Simulationstechnologien beschäftigen muss.

### 6.3.3.2 Bereitstellung der erforderlichen Rechenleistung

Für die Bereitstellung der erforderlichen Leistung für langsame Zykluszeiten im Bereich von 100 ms und aufwärts sind windowsbasierte PC-Workstations ausreichend und derzeit die kostengünstigste Variante. Für Zykluszeiten von 10 ms abwärts sind Echtzeitsysteme erforderlich. Diese können von verschiedenen Herstellern zum Teil auf spezieller Hardware beschafft werden, wobei für die meisten Echtzeitsysteme mittlerweile Portierungen auf die PC-Plattform angeboten werden. Bei umfangreichen und komplexen Modellen kann es notwendig sein, Modelle auf echtzeitfähige Rechnercluster zu verteilen.

### 6.3.3.3 Diagnose, Archivierung und Manipulation der Modellzustände zur Laufzeit

Da sich die Phase der virtuellen Inbetriebnahme (vgl. Abbildung 8) im Wesentlichen aus denselben Schritten zusammensetzt, die bei der realen Inbetriebnahme ausgeführt werden, sind umfangreiche Diagnose- und Manipulationsmöglichkeiten notwendig. Dies umfasst neben einem transparenten Direktzugriff auf Modellvariablen auch die gezielte Definition spezifischer Sichten auf das Modell oder auf Modellteile. Damit lassen sich für unterschiedliche Inbetriebnahmevorgänge relevante Signale übersichtlich auf einem Bildschirm darstellen. Durch die Anwendung von Standards lassen sich diese Sichten ggf. automatisiert generieren. Eine wichtige Funktion stellt das direkte Beobachten und Steuern des Prozessabildes dar. Über die Beobachtung und Manipulation der Modellsignale hinaus muss es für eine gezielte Fehlersuche möglich sein, Signalverläufe aufzuzeichnen und diese miteinander zu vergleichen. Dies kann zur Ursachenanalyse eines fehlerhaften Laufzeitverhaltens genutzt werden.

### 6.3.3.4 Benutzerfreundliche und intuitive Visualisierung

Der Benutzer muss stets zur Laufzeit der Simulation eine intuitive Visualisierung der Modellzustände erhalten. Dies sollte in leicht verständlicher Form erfolgen, wozu je nach Informationsbeschaffenheit das geeignete Medium zu wählen ist. So liegt es nahe, dass die Schaltzustände der In-

stallationstechnik in Form der Installationspläne, also der Elektro- und Fluidokumentation, dargestellt werden. Dazu können beispielsweise die digitalen Signalklemmen einer elektrischen Baugruppe je nach momentanem Zustand im Modell mit einer definierten Farbe eingefärbt werden. Entsprechendes gilt für die Fluidpläne, die mit den aktuellen Druck- und Durchflusswerten angereichert werden. Der Materialfluss einer flächigen Logistikzelle sollte üblicherweise im 2D-Layout umgesetzt werden, während für eine Darstellung komplexer Bewegungen oder eines mehrdimensionalen Materialflusses eine 3D-Kinematik für eine schnelle, intuitive Erfassung des Modellzustandes vorteilhaft ist. In diesem Zusammenhang ist eine Darstellung der Signalzustände in der virtuellen Maschine in Form einer Gestaltänderung von zugehörigen 3D-Baugruppen hilfreich. Die Ausprägungen des Simulationssystems sind in Abbildung 33 zusammengefasst.

<b>Architektur</b>	Geschlossenes Komplettsystem	Gekoppelte Simulation	Offenes kompilierendes System	Offenes modulares System
<b>Bereitstellung erforderlicher Leistung (Abtasttheorem)</b>	PC-Workstation	Echtzeitsystem PC-basiert	Echtzeitsystem mit Spezial-Hardware	Echtzeitfähiger Rechnercluster
<b>Laufzeitdiagnose, -archivierung und -manipulation der Modellzustände</b>	Integration mit Hardware-konfiguration	Direktes Beobachten und Steuern	Laufzeit-paralleles Beobachten und Steuern	
<b>Benutzerfreundliche und intuitive Visualisierung</b>	Direktzugriff auf Modellvariablen	Manuelle Definition spezifischer Sichten	Automatische Generierung spezifischer Sichten	

Abbildung 33: Teil des Lösungsbaukastens für die Funktionalität des Simulationssystems

### 6.3.4 Modell

Ein Modell für den Test von Steuerungen umfasst die Antriebs- und Sensorperipherie sowie den Materialfluss und die Prozesse. Demnach lässt sich das Testmodell unterteilen in das so genannte Peripheriemodell und das Materialflussmodell oder auch Prozessmodell. Gegebenenfalls wird zusätzlich ein Visualisierungsmodell benötigt, um dem Benutzer durch eine 3D-Ansicht die kinematischen und materialflusstechnischen Zustände transparent darzustellen. Für eine wirtschaftliche virtuelle Inbetriebnahme komplexer Anlagen können skalierbare Simulationsmodelle es erlauben, den technischen und personellen Aufwand vertretbar niedrig zu halten, indem der Fokus auf die Inbetriebnahmebrennpunkte gelegt wird. Die unterschiedlichen Teilmodelle unterliegen verschiedenen Anforder-



rungen hinsichtlich Detaillierungsgrad und Modellzykluszeit und werden neben allgemeinen Gestaltungsrichtlinien im Folgenden einzeln beschrieben.

#### 6.3.4.1 Allgemeine Gestaltungsrichtlinien

Für die Gestaltung von Simulationsmodellen werden in diesem Unterabschnitt die Ausprägungen hinsichtlich der drei Aspekte *Unterstützung einer hohen Komplexität*, *Sicherstellung der Abbildungstreue* sowie *Begrenzung des Modellumfangs* dargestellt.

**Unterstützung einer hohen Komplexität:** Zur Unterstützung einer hohen Komplexität können Modelle auf prozedurale oder objektorientierte Weise strukturiert und hierarchisiert werden. Eine graphische Modellrepräsentation unterstützt das intuitive Erfassen der Modellzustände während des Softwaretests. Dabei werden durch eine gezielte Definition komplexitätsreduzierter Sichten auf das Modell die Inbetriebnahmevorgänge erleichtert.

**Sicherstellung der Abbildungstreue:** Die Abbildungstreue kann beispielsweise durch eine detaillierte Ableitung von Modellen aus Installationsplänen erfolgen. Damit wird gewährleistet, dass die Modelle der installierten Peripherie weitestgehend nachempfunden sind. Durch die Integration von 3D-Kinematiken in die Modelle können komplexe, geometrische Zusammenhänge intuitiv dargestellt werden und Kollisionen bzw. die Anordnung von Sensorik realistisch abgebildet werden. Mit der Integration einer physikalischen Modellierung der Kinematiken und des Materialflusses wird erreicht, dass in diesem Bereich keine Abbildungsfehler durch manuelle Simplifizierung entstehen.

**Begrenzung des Modellumfangs:** Durch die Wahl eines inbetriebnahmegerechten Detaillierungsgrades im Modell wird der Rechenaufwand auf ein minimal erforderliches Maß reduziert. Zusätzlich lassen sich durch die Einteilung der Modellkomponenten in Gruppen unterschiedlich hoher Zykluszeit Leistungsreserven des Rechners für zykluszeit- bzw. rechenintensive Modellteile bilden, während Modellteile mit geringeren Anforderungen entsprechend weniger Leistung verbrauchen. Diese Aufteilung des Modells in Modellteile kann so weit ausgedehnt werden, dass große Modellteile auf unterschiedliche PC-Systeme verteilt werden. Dazu müssen die Aufwände für die Kommunikation der Modellteile untereinander bezüglich der zur Verfügung stehenden Bandbreite berücksichtigt werden.

### 6.3.4.2 Modellstrukturierung

Die Modellstrukturierung wird wesentlich von der Architektur des Simulationssystems beeinflusst. Unabhängig davon sind erfahrungsgemäß folgende Teilmodelle in allen Gesamtmodellen vorhanden: Ein Peripheriemodell zur Abbildung des steuerungsnahen Peripherieverhaltens, ein Materialflussmodell zur Abbildung des Prozessverhaltens sowie eine Visualisierung zur 3-dimensional-intuitiven Darstellung komplexer Kinematiken und Materialflussprozesse.

**Peripheriemodell:** Dem Peripheriemodell kommt die Aufgabe zu, Antriebsbefehle und Statusrückmeldungen mit der Steuerung auszutauschen. Es dient damit dem Test der Steuerungs- und Überwachungsfunktionen sowie der Störungsbehandlungsroutinen der Steuerung. Dazu werden alle Antriebe derart abgebildet, dass sie auf Befehle der Steuerung mit einem realistischen Bewegungsverhalten reagieren. Gleichzeitig werden entsprechende Statusrückmeldungen über die Betriebsarten, den Zustand bzw. die Stellung an die Steuerung zurückgegeben. Auf diesem Weg lassen sich die antriebsseitigen Steuerungs- und Überwachungsfunktionen der Steuerung bereits testen. Abbildung 34 zeigt beispielsweise das Peripheriemodell eines geschwindigkeitsgeregelten Umrichterantriebs mit Überwachung durch einen Winkelschrittgeber (WSG). Das Modell besteht aus den Ausgängen der Steuerung auf der linken Seite der Abbildung, die für das Modell jeweils als Eingangsvariablen dienen. Die Modellbausteine für die Darstellung des Umrichters bzw. Winkelschrittgebers befinden sich in der Mitte, während die Ausgänge des Modells auf der rechten Seite zu sehen sind. Diese sind mit Steuerungseingängen verbunden und schließen so den Kreis zur Steuerung. Erteilt die Steuerung dem Umrichter einen Fahrbefehl, indem eine Sollgeschwindigkeit mit einer Sollwertrampe und der Freigabe im Steuerwort an den virtuellen Antrieb ausgegeben wird, so setzt sich dieser im Modell in Bewegung. Die aktuelle Geschwindigkeit des Läufers wird an das Modell des Winkelschrittgebers übergeben, der daraus durch Integration den zurückgelegten Weg berechnet. Der aktuelle Weg wird ständig an die Steuerung zurückgemeldet, so dass das Steuerungsprogramm bei Erreichen einer bestimmten Position den Umrichter abschalten kann. Auf diese Art können einfache Positionierprogramme der Steuerung getestet werden.

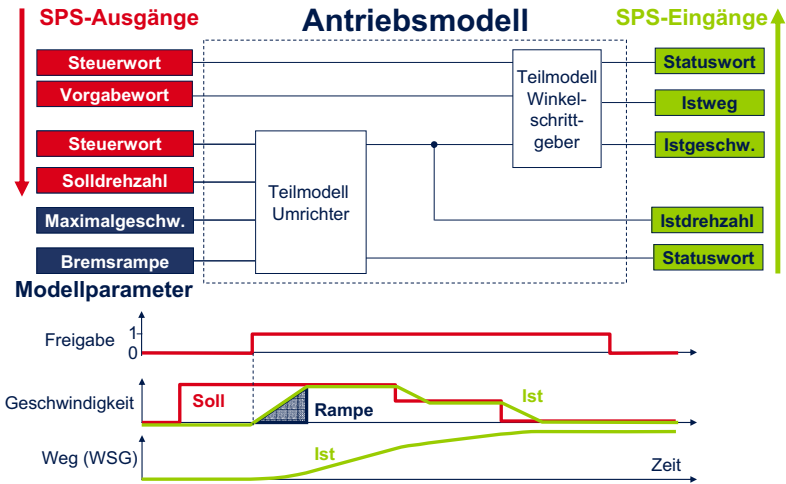


Abbildung 34: Peripheriemodell eines geschwindigkeitsgeregelt Antriebs

**Materialflussmodell:** Zur Prüfung von automatischen Abläufen in der Steuerung werden Sensorzustände benötigt, die durch den Materialfluss von Werkstücken, Fertigungshilfsmitteln oder Ähnlichem ausgelöst werden. Je nach Komplexität des Materialflusses in der zu testenden Maschine oder Anlage kann dieser direkt im Peripheriemodell integriert werden oder muss in einem weiteren Materialflussmodell der Anlage modelliert werden. Dies hat den Hintergrund, dass die Peripheriesimulation mit logischen und arithmetischen Modellierungskonstrukten erfolgt, während Materialflussphänomene in der Regel mit ereignisdiskreten Modellkonstrukten unter deutlich geringerem Aufwand abgebildet werden können. Dabei spielen geometrische Randbedingungen sowie materialflusstechnische Elemente eine wichtige Rolle. Bekannte Lösungen umfassen die Modellierung des Materialflusses in abstrakter Form durch eine ereignisdiskrete Simulation oder in konkreterer Form durch eine 3D-Simulation, die um ereignisdiskrete Konstrukte erweitert ist. Diese ist in der Lage, geometrische Umstände, wie beispielsweise die Anordnung einer Lichtschranke in einer fördertechnischen Komponente, genauer abzubilden als eine ereignisdiskrete 2D-Simulation (siehe Abbildung 35).

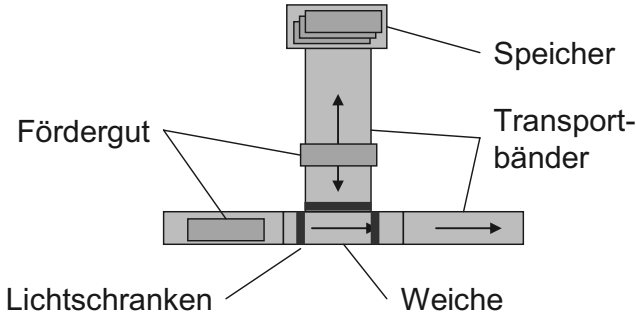


Abbildung 35: Zweidimensionales Materialflussmodell mit Elementen der Förder-technik

Dazu werden in der Peripheriesimulation im direkten Zusammenspiel mit der Steuerung Achsbewegungen in Form von Geschwindigkeiten oder Positionen generiert. Diese werden in einer echtzeitfähigen Online-Kopplung quasi-gleichzeitig an eine Materialfluss-Simulation übergeben und als Antriebsgrößen für fördertechnische Elemente genutzt. In der Materialfluss-Simulation werden damit die Bewegung des Fördergutes simuliert und Rückmeldungen der Sensorik erzeugt, wie beispielsweise von Lichtschranken oder Scannersystemen. Diese werden zunächst an die Peripheriesimulation und dann an die Steuerung weitergegeben. In Abbildung 36 ist beispielsweise ein Förderband mit Prozessgut und Lichtschranke dargestellt. Geprüft werden soll in diesem Fall die Steuerungsfunktion, die das Prozessgut auf einem Förderriemen bis zur Lichtschranke fördert. Die Steuerung erteilt dazu dem in der Peripheriesimulation abgebildeten Umrichterantrieb des Förderriemens einen Fahrbefehl mit Geschwindigkeitsvorgabe. Im Peripheriemodell fährt der Umrichterantrieb mit der vorgegebenen Rampe auf Soll-Drehzahl und gibt eine realistische Ist-Drehzahl sowie Statusmeldungen direkt an die Steuerung zurück. Die aktuelle Ist-Drehzahl wird dabei permanent an den zugehörigen Förderriemen in der Materialfluss-Simulation weitergegeben. Dort wird mit der aktuellen Geschwindigkeit die Position des Prozessgutes berechnet und bei Auslösen der Lichtschranke eine Rückmeldung an die Peripheriesimulation ausgegeben. Dort wird das Signal entsprechend der Sensorverschaltung gewandelt und an die Steuerung weitergegeben. Die Steuerung erteilt bei Auslösen der Lichtschranke dem virtuellen Umrichterantrieb einen Stoppbefehl.

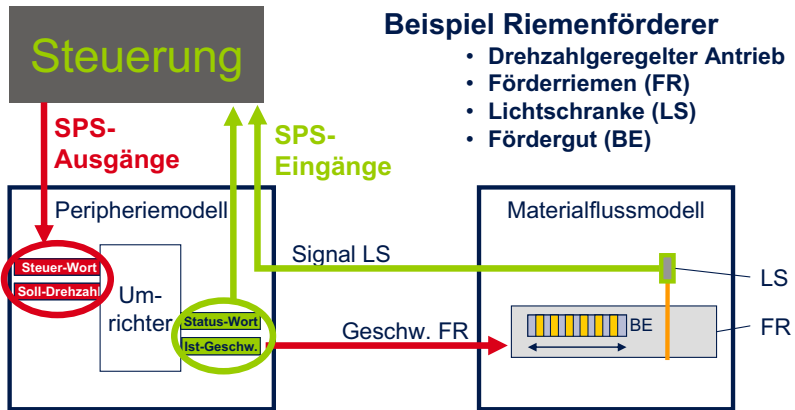


Abbildung 36: Zusammenspiel und funktionale Aufteilung von Peripherie- und Materialflussmodell am Beispiel eines drehzahl geregelten Antriebs für einen Förderriemen

**Visualisierung:** Für das intuitive Erfassen der Zustände einer virtuellen Maschine ist eine geeignete Visualisierung notwendig. Der Gegenstand der Visualisierung lässt sich einteilen in das Prozessabbild, nämlich den Zustand der Antriebs- und Sensorperipherie, den Lage- und Bewegungszustand der Maschinenkinematiken sowie den Materialfluss der Hilfsstoffe, Betriebsmittel und Werkstücke.

Eine Visualisierung der Signalzustände am Prozessabbild zwischen Steuerung und Simulation muss schnell zugänglich und direkt erfassbar sein. Die Manipulation der Signalzustände (siehe dazu auch Unterabschnitt 6.3.3) sollte nach Möglichkeit auch im Bereich der Visualisierung erfolgen können.

Die Darstellung der virtuellen Maschine kann je nach Beschaffenheit von einer rein zweidimensionalen Darstellung einer flächig aufgebauten Materialflussanlage (siehe Abbildung 35 und Abbildung 37) über eine 3D-Kinematik komplexer Maschinenstrukturen bis hin zu einer vollständigen Abbildung aller Kinematiken und des Materialflusses in einer 3D-Umgebung reichen.

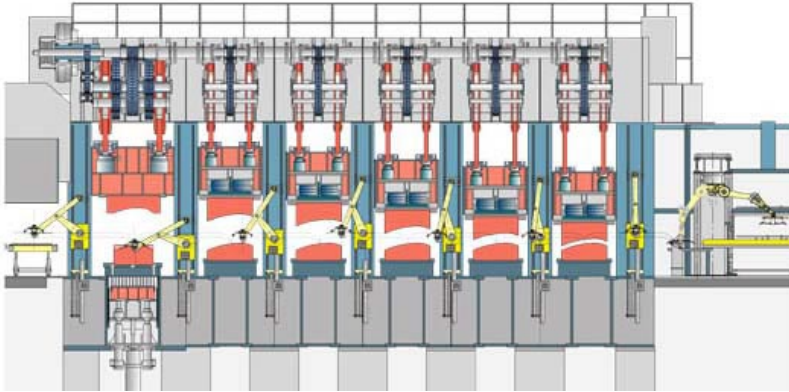


Abbildung 37: Zweidimensionale Darstellung des Materialflusses durch eine Transferpresse nach SIEVERDINGBECK (2006)

Zur Darstellung einer hohen Komplexität im Materialfluss kann die zweidimensionale Form übersichtlicher sein, insbesondere wenn sie der Problemlösung in der globalen Taktung eines Systems dient. Durch dreidimensionale Kinematiken mit Materialfluss wird die lokale, zeitliche Koordination von Maschinenbewegungen untersucht und verbessert (siehe Abbildung 38).

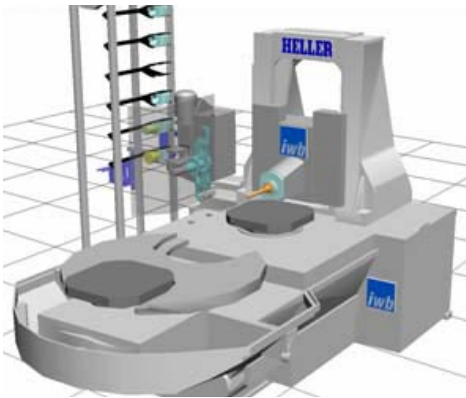


Abbildung 38: Dreidimensionale Darstellung einer Maschine mit Kinematik

### 6.3.4.3 Skalierbarer Detaillierungsgrad

Die unterschiedliche Skalierung von Modellen für die Untersuchung von Fragestellungen globalen Materialflusses und lokaler Kinematik wird be-

reits aus der Form der gewählten Visualisierung ersichtlich. In diesem Unterabschnitt werden die Möglichkeiten zur Analyse komplexer Produktionsanlagen auf unterschiedlichem Skalierungsniveau im Anlagenmodell erörtert. In diesem Zusammenhang sei auf das Konzept des Vergrößerungsglases nach ZÄH & REINHART (2004b) verwiesen (siehe Abbildung 39). Mit Hilfe einer flexibel skalierbaren Auflösung der Simulationstiefe lassen sich für ein komplexes Produktionssystem funktionale Untersuchungen mit begrenztem Aufwand an Ressourcen aus der Automatisierungs- und Simulationstechnik durchführen. Dies wird ermöglicht, indem vor dem Kontext eines anlagenübergreifenden Modells auf abstrakter Ebene jeweils ein Teilmodell in höherem Detaillevel in das abstrakte Modell eingebunden wird.

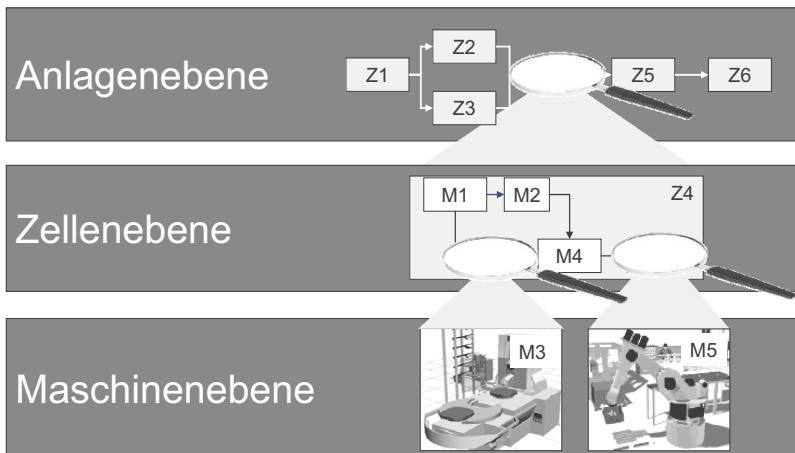


Abbildung 39: Konzept der skalierbaren VIBN als „Vergrößerungsglas“ an einem Beispiel: Die Zellen Z1 bis Z6 auf Anlagenebene werden mit Hilfe skalierbarer Modelle auf Zellenebene in ein System von Maschinen M1 bis M5 aufgelöst, die auf der Maschinenebene jeweils detailliert simuliert werden können

So kann ein komplexes Produktionssystem wie beispielsweise ein agiles Fertigungssystem im Detaillierungsgrad skalierbar abgebildet werden. Dazu wird dann nicht das gesamte Produktionssystem hochdetailliert auf E/A-Ebene modelliert. Dies wäre zum einen aufgrund des hohen, kapital- und flächenintensiven Hardwareaufwandes und zum anderen aufgrund der Modellkomplexität nicht beherrschbar. Ausgehend von einem anlagenübergreifenden Modell wird vielmehr in niedriger Detaillierungsstufe an den interessierenden Brennpunkten höher aufgelöst. Dies kann mit Hilfe der in Abbildung 40 dargestellten Systemstruktur erfolgen.

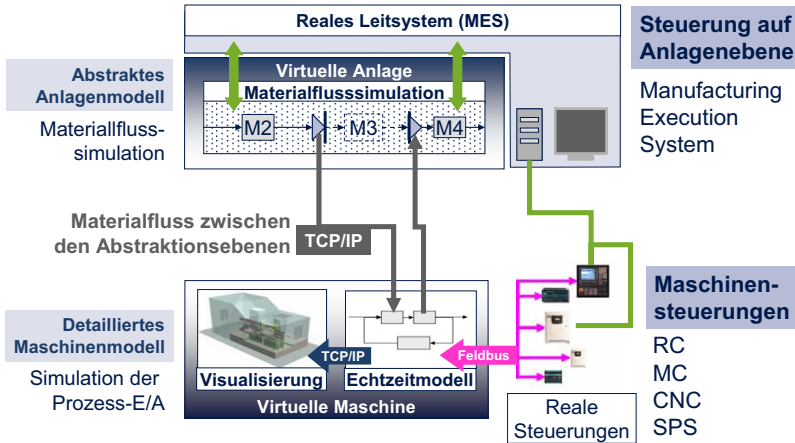


Abbildung 40: Beispiel einer HIL-Systemarchitektur für eine skalierbare virtuelle Inbetriebnahme

Es wird am Beispiel einer skalierbaren HIL-Simulation zunächst ein großes Ablaufsimulationsmodell des Produktionssystems analog zu RÖMBERG (2004) bzw. HEINRICH & WORTMANN (2004) erzeugt und mit dem realen Leitsystem verbunden. Die steuerungstechnisch interessanten Zellen bzw. Maschinen in diesem Modell können nun in jeweils getrennten Simulationsstudien aus dem Ablaufsimulationsmodell herausgelöst werden. An die Stelle der entfallenden Modellteile tritt nun eine Hardware-in-the-Loop-Simulationsumgebung nach BENDER & ALBERT (1999), BERGER (2005) PRITSCHOW (2002b) ODER ZÄH et al. (2004). Dazu müssen Materialflussobjekte aus dem Ablaufsimulationsmodell umgeleitet und über eine Systemkopplung in das HIL-Modell geleitet werden. Dort werden entsprechende Repräsentationen erzeugt und durch die auf E/A-Ebene detailliert abgebildete Maschinen- oder Zellperipherie virtuell bearbeitet. Dabei ist die reale Steuerungstechnik in Form von SPS, NC, MC (Motion Control) oder RC (Robot Control) eingebunden und steuert die Abläufe. Damit kann auch die Verbindung der beteiligten Maschinen- und Zellsteuerungen untereinander und mit dem Leitsystem bzw. weiteren Systemen der Anlagenebene aus informationstechnischer Sicht in Betrieb genommen werden. Die Ausprägungen der Lösungen für den Modellumfang sind in Abbildung 41 zusammenfassend aufgeführt.



Unterstützung hoher Komplexität	Prozedurale Strukturierung	Graphische Modellrepräsentation	Hierarchisierung	Definition komplexitätsreduzierter Sichten
Sicherstellung der Abbildungstreue	Detaillierte Ableitung von Modellen aus Installationsplänen	Integration von 3D-Kinematiken	Integration physikalischer Modellierung	
Wirtschaftlicher Rechenaufwand	Wahl eines Inbetriebnahme-gerechten Detaillierungsgrades	Einteilung von Modellgruppen unterschiedlich hoher Zykluszeit	Verteilung von großen Modellen auf mehrere Systeme	
Mechanismen zur Modellstrukturierung	Peripherie, Materialfluss und Visualisierung in einem Modell	Aufteilung auf unterschiedliche Anwendungen		
Skalierbare Simulationsmodelle	Gleichmäßiger Detaillierungsgrad	Gesamtmodell mit unterschiedlicher Auflösung	Intelligentes Management des Detaillierungsgrades	

Abbildung 41: Teil des Lösungsbaukastens für den Modellumfang

### 6.3.5 Modellerstellungsprozess

In diesem Unterabschnitt werden die Alternativen für die Modellerstellung dargestellt. Diese erfolgt aus Entwicklungsdokumenten oder -datenbanken manuell, teilweise oder voll automatisiert. Bei der manuellen Vorgehensweise werden Modelle durch Simulationsexperten, basierend auf Entwicklungsunterlagen der Maschinen und Anlagen, aufgebaut (siehe Unterabschnitt 6.3.5.1). Es kann das Vorgehensmodell für die Modellierung in drei Phasen von BENDER & ALBERT (1999) zugrunde gelegt werden. Zunächst wird eine Maschinenanalyse durchgeführt, auf die eine Komponentenmodellierung mit dem Ergebnis einer Modellbibliothek mit Schnittstellen und Verhalten folgt. Mit dieser wird durch Konfiguration die virtuelle Maschine aufgebaut.

Durch Wiederverwendung standardisierter Module verringert sich damit der Modellierungsaufwand und es werden für den letzten Schritt der Konfiguration keine Simulationsexperten benötigt. Die teilautomatisierte Modellerstellung (siehe Unterabschnitt 6.3.5.2) basiert auf derartigen Standards und wird mit Hilfe von Engineering-Werkzeugen umgesetzt, die aus einer Maschinenstruktur über intelligente Standardkomponenten Modelle konfigurieren können. Häufig wird diese Vorgehensweise irreführend als *Modellgenerierung* anstelle des treffenderen Begriffes *Modellkonfiguration* bezeichnet, denn es müssen noch nicht in einer Bibliothek standardisierte Komponenten, insbesondere Neuentwicklungen weiterhin manuell aufgebaut werden. Darüber hinaus entsteht ein nicht un-

erheblicher Zusatzaufwand durch die Erstellung und Pflege der Bibliothek mit intelligenten Standardkomponenten.

Eine automatische Modellgenerierung dagegen erfolgt beispielsweise durch intelligente Präprozessoren aus nativen Entwicklungsunterlagen und ersetzt die manuelle Modellerstellung vollends. Mit der Vorgabe zur Art der Modellerstellung ist der projektbezogene Aufwand festgelegt, wodurch die notwendige Vorlaufzeit und die Kosten der Modellerstellung beeinflusst werden (siehe dazu auch Unterabschnitt 6.3.5.3).

### 6.3.5.1 Manuelles Vorgehen

BENDER & ALBERT (1999) stellen methodisch-organisatorische Anforderungen an virtuelle Prototypen auf. Demnach sollte eine aufwandsarme Modellierung modular, intuitiv und hierarchisch erfolgen. Die Wirkstruktur der Maschine sollte mit einer leichten Variantenbildung auf Basis von Modellbibliotheken aufbaubar sein. Darüber hinaus ist eine Integration in bewährte Abläufe der Konstruktion und Entwicklung notwendig, wobei auf die Verwendung bereits vorhandener Informationen zurückgegriffen wird. Dies muss unter Berücksichtigung existierender Werkzeuge und Schnittstellen erfolgen sowie einfache Bedienbarkeit und Transparenz sicherstellen. Ziel ist ein geringer Modellerstellungsaufwand durch wiederverwendbare Simulationsmodelle oder -modellteile. Daraus folgt, dass bei Einführung der virtuellen Inbetriebnahme Modelle zunächst manuell erstellt werden müssen. In einem nächsten Schritt müssen Teilmodelle und Modellkomponenten entlang mechatronischer Funktionsgruppen standardisiert und modularisiert werden.

In Anlehnung an BENDER & ALBERT (1999) und ZÄH et al. (2004) kann der Prozess der Modellerstellung in folgende Abschnitte gegliedert werden:

- Analyse der Maschinenfunktionen
- Analyse des Störungsverhaltens
- Aufbau des Verhaltensmodells
- Aufbau des Kinematikmodells
- Aufbau des Materialflussmodells
- Integration der Teilmodelle
- Konfiguration der Schnittstellen

Im Weiteren wird näher auf die Besonderheiten der einzelnen Abschnitte eingegangen.

## 6.3.5.1.1 Analyse der Maschinenfunktionen

Geplante Funktionen werden anhand eines Mengengerüsts der Maschine analysiert und in Steuerketten eingeteilt. Meist liegt ein derartiges Mengengerüst in Form einer Funktionsliste vor (Abbildung 42). Eine Steuerkette stellt dabei eine abgeschlossene, logische Schleife von Steuerungsausgängen über das Peripherie- und das Prozessverhalten auf Steuerungseingänge dar. Gegebenenfalls sind mehrere zunächst unabhängige Steuerketten im Fertigungs- bzw. im Montageprozess miteinander gekoppelt.

Funktion	Baureihe			Komponententyp	Peripheriekomponente	Installation	
	Maschinentyp 1	Maschinentyp 2	Maschinentyp 3			Beschreibung Bauteilstandard	BMK
Nr. Funktionsbeschreibung							
1 Werkzeugschaft abblasen		1		5/2 F 1	Wegeventil, MN1H 5/2 D -1 -FR -C	-A50.1	A50.1
2 Innere Kühlmittelzufuhr WZ	1	1	1	5/2 F 1	Wegeventil, MN1H 5/2 D -1 -FR -C	-A60.2	A60.2
3 Werkzeug lösen	1			4/2 R 2	Wegeventil 4/2, D1 VW 20 DN JWL	-A50.1	A50.1
4 Arbeitsraum-Dusche aktivieren	1	1	1	2/5	Wegeventil 2/5 5VMK 25 NC G1 1/4	-A60.1	A60.1
5 Schmierung Druckluft aktivieren			1	5/2 F 1	Wegeventil, MN1H 5/2 D -1 -FR -C	-A50.1	A50.1
6 Schmierung Druckluft vorhanden	1			P	Druckschalter Pneumatik	-A50.0	E50.0
7 Lagertemperatur Spindel vorne	1	1		T	Tempsensor PT 100	-A60.3	E60.3
8 Lagertemperatur Spindel mitte			1	T	Tempsensor PT 100	-A60.3	E60.3
9 Getriebe in Stufe 1		1	1	I	Näherungsschalter	-A50.0	E50.0
10 Getriebe in Stufe 1 schalten	1	1	1	5/2 I 2	Wegeventil, JMN1H 5/2 D-1-C	-A50.2	A50.2
11 Getriebe in Stufe 2		1		I	Näherungsschalter	-A50.0	E50.0

Abbildung 42: Auszug aus der Funktionsliste einer Maschine

Die Steuerketten werden in einem zweiten Schritt nach der Inbetriebnahmereihenfolge gruppiert. Dies kann auf Basis einer so genannten Inbetriebnahmecheckliste durchgeführt werden, die den Technikern klassischerweise zu einem systematischen Vorgehen im Feld dient. Durch die Gruppierung nach Inbetriebnahmeschritten können bei der Modellierung Steuerketten auf einem Bildschirm dargestellt werden, die gleichzeitig bedient und beobachtet werden müssen. Dies beschleunigt die virtuelle Inbetriebnahme und erhöht die Testqualität.

Eine Maschineninbetriebnahme kann auf unterschiedliche Weise geschehen. Bei materialflusstechnischen Anlagen erfolgt diese abschnittsweise entlang des Materialflusses, bei komplexen Maschinen ggf. nach Einzel-funktionen oder auch gegliedert nach Antriebsmedien, wie beispielsweise Elektrik, Pneumatik und Hydraulik.

### 6.3.5.1.2 Analyse des Störungsverhaltens von Maschinenkomponenten

Neben der Inbetriebnahme des Gutablaufs von Maschinenfunktionen spielt bei der Inbetriebnahme der Test von Störungsbehandlungsroutinen der Steuerung eine wesentliche Rolle. Steuerungstechnische Maßnahmen gegen Störungen auf der Ebene der Einzelfunktionen lassen sich beispielsweise aufteilen in Laufzeitüberwachungen, Endlagenüberwachungen, Paarfehlerüberwachungen sowie Druckschalterüberwachungen (siehe Abbildung 43).

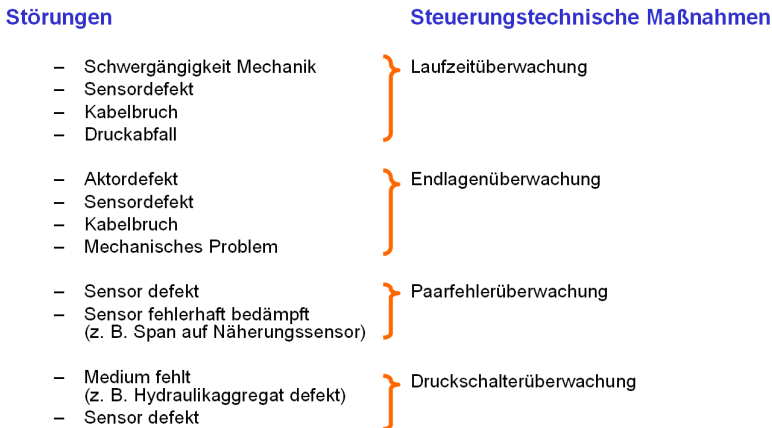


Abbildung 43: Klassifizierung von Störungen nach zugeordneten, steuerungstechnischen Maßnahmen

Im Maschinenbau können Komponenten wie Sensoren, Aktoren und Geber sowie hydraulische, pneumatische und elektrische Verbindungsleitungen als Basis für den Fehlertest dienen, da sie die kleinsten zu steuernden bzw. zu überwachenden Einheiten der Maschinenmechanik gegenüber der Steuerungssoftware bilden. Durch sie wird ein Modell gespannt, das zu dem der Steuerungstechnik konkurriert und gleichzeitig unabhängig davon ist. Es erlaubt die vollständige Prüfung der Steuerungsaufgabe aus Sicht der Maschinenfunktionen und damit letzten Endes der Anforderungen.

Die Störungen aus Abbildung 43 werden im Folgenden im Hinblick auf die Modellierung aus Komponentensicht weiter unterteilt. Dazu werden die Ausfallerscheinungen eingeteilt in die Kategorien *sporadisches Fehlverhalten*, *periodisches Fehlverhalten*, *dauerhafte Veränderung des Arbeitsverhaltens* und den *Totalausfall*. Ein Sensorausfall kann demnach von einem kurzfristigen Fehlverhalten über ein Signalfackern, eine Ver-

änderung des Empfindlichkeitsbereiches bis hin zu einem Totalausfall reichen (siehe Abbildung 44).

	Sensorik	Aktorik
<b>Sporadisches Fehlverhalten</b>	Vorübergehende Störung (z. B. Span auf Näherungssensor)	Unregelmäßige Ansprechverzögerung oder transiente Ausfälle
<b>Periodisches Fehlverhalten</b>	Flackern (z. B. Prellen)	Regelmäßiger Ausfall oder Versagen
<b>Dauerhafte Veränderung des Arbeitsverhaltens</b>	Verschiebung der Empfindlichkeitsbereiche	Mechanische Schwergängigkeit, Veränderung der Arbeitsbereichsgrenzen
<b>Totalausfall</b>	Signal fehlt oder liegt konstant an (z.B. Kabelbruch, Sensordefekt)	Keine Bewegung mehr möglich

Abbildung 44: Klassifizierung von Störungen

Aktordefekte äußern sich durch eine mechanische Schwergängigkeit bzw. einen Leistungsabfall bis hin zum Totalausfall. Dabei ist insbesondere die Unterscheidung zwischen analogen und binären Aktoren zu treffen. Bei analogen Aktoren ändern sich beispielsweise die Verfahrbereichsgrenzen oder die Verfahrgeschwindigkeit, während sich bei binären Aktoren, die lediglich diskrete Zustände aufweisen, die Übergangszeiten verändern.

Eine weitere Klasse von Störungen kommt über die Kommunikationstechnik hinzu, bei der wiederum unterschieden werden kann zwischen den Zuständen *Kommunikationssystem fehlerfrei* und *Kommunikationssystem gestört* (siehe Abbildung 45).

<b>Kommunikationssystem fehlerfrei</b>	Diagnosemeldungen liegen an
	Kommunikationsteilnehmer meldet Störung eines nachgeschalteten Aktors oder Sensors
<b>Kommunikationssystem gestört</b>	Ausfall eines Kommunikationsteilnehmers (z. B. Schnittstelle defekt)
	Hohe Fehlerrate in der Datenübertragung (z.B. defektes Kabel oder Störstrahlung)
	Totalausfall des Kommunikationssystems
	Ausfall eines Bussegments (z. B. Bus-Kabel gekappt)

Abbildung 45: Störungen an Kommunikationssystemen

### 6.3.5.1.3 Peripheriemodelle

Der erste Schritt zur Erstellung von Peripheriemodellen besteht im Export der Hardwarekonfiguration aus der Entwicklungsumgebung der Steuerung bzw. aus der Funktionsliste der Maschine. Die Hardwarekonfiguration wird in die Verhaltenssimulation importiert. Anschließend erfolgt die Übernahme der E/A-Signalliste aus der Entwicklungsumgebung.

Diese muss ebenfalls als Liste exportiert und anschließend in der Simulation importiert werden. Die E/A-Signalliste enthält die Zuordnung symbolischer Bezeichner zu den Ein- und Ausgängen der Steuerung und erleichtert die Zuordnung der physikalischen Signaladressen zu den damit verknüpften Komponenten in der Simulation.

Bei der Erstellung der Verhaltensmodelle können prinzipiell zwei Modellierungsstrategien unterschieden werden (siehe Abbildung 46). Bei der funktional orientierten Modellbildung erfolgt eine abstrakte Nachbildung der Maschinenfunktionalität. Wird beispielsweise das Ventil in der untenstehenden Abbildung einer hydraulischen Steuerkette angesteuert, so wird ein Timer gestartet. Nach Ablauf einer definierten Zeit, die der Ausfahrzeit des Zylinders entspricht, wird eine Rückmeldung an die Steuerung ausgelöst. Diese bildet das Ansprechen eines Sensors in der Steuerkette ab.

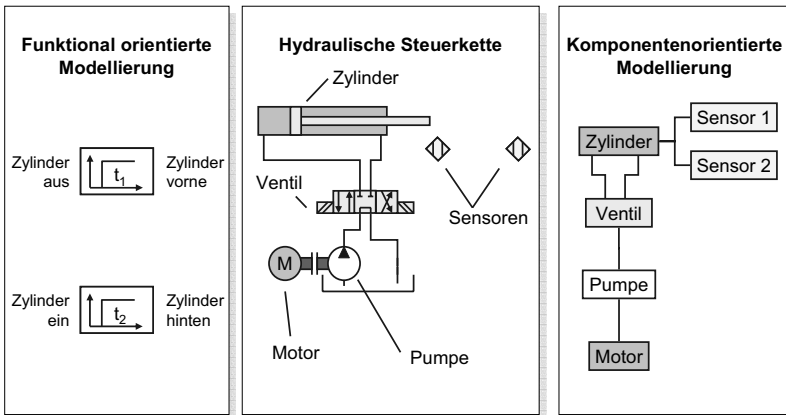


Abbildung 46: Hydraulische Steuerkette (in der Mitte) mit einem Vergleich der funktionalen (linke Seite) mit der komponentenorientierten Modellierungsstrategie (rechte Seite)

Die Strategie der komponentenorientierten Modellierung verfolgt die Kapselung und Modularisierung der Simulationsbausteine entsprechend den verbauten Maschinenelementen. Die Schnittstellen zwischen den Modellelementen bestehen in einer hinreichend genauen Abbildung derjenigen physikalischen Größen, die den Energie-, Stoff-, und Informationsfluss zwischen den Komponenten beschreiben.

Für die Simulation des Verhaltens von Maschinen wird eine komponentenorientierte Modellierung als geeignet betrachtet. Dies bietet gegenüber einer funktional orientierten Modellbildung folgende Vorteile:

- Durch die Wahl der Systemgrenzen analog zur Unterteilung der realen Maschine in Komponenten wird die Wiederverwendbarkeit der Simulationsbausteine gewährleistet.
- Eine komponentenorientierte Modellierung impliziert die Wiedergabe kausaler Wirkketten. Wird beispielsweise bei der in Abbildung 46 dargestellten hydraulischen Steuerkette der Pumpenmotor nicht eingeschaltet, so bewegt sich der Zylinder nicht nach vorne, obwohl das Hydraulikventil betätigt wird.
- Die Transparenz der Simulationsmodelle wird erhöht. Ein tiefgehendes Verständnis der Funktionen der Maschine wird dadurch gefördert.
- Das Abbilden möglicher Störungen der Maschinenkomponenten in Simulationsmodellen wird erleichtert, indem gängige Störungsarten je Komponente definiert sind. Dies ermöglicht einen systematischen Test der Steuerungs-Programmbausteine für die Störungsbearbeitung.

Um einen ökonomischen Aufbau der Modelle zu gewährleisten, müssen weitestgehend vorgefertigte Komponenten aus einer Bibliothek eingesetzt werden. Die Menge der notwendigen Komponenten kann durch den Einsatz parametrischer Modellierungstechniken reduziert werden (siehe Abbildung 47).

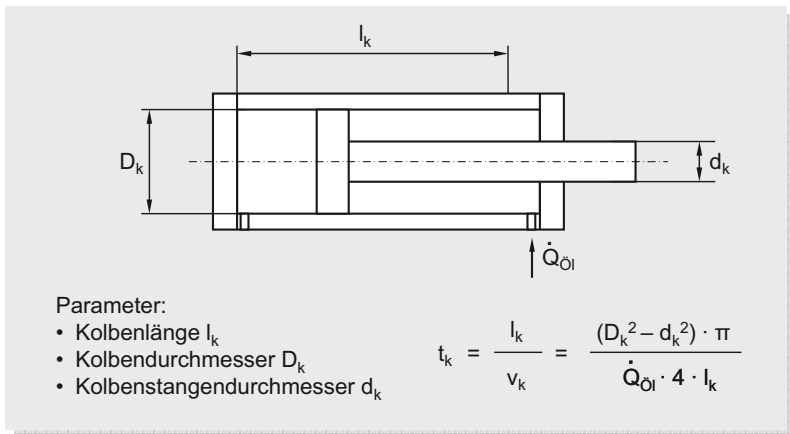


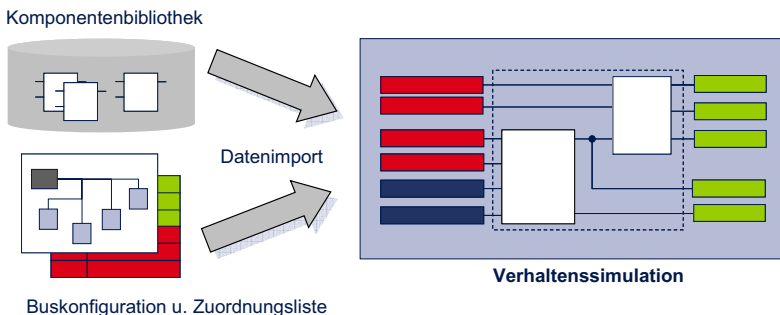
Abbildung 47: Parametrische Modellierung eines Hydraulikzylinders

Ein Hydraulikzylinder kann beispielsweise parametrisch abgebildet werden, indem sein Verhalten in Abhängigkeit vom eingehenden Ölvolumenstrom, seiner Ausfahrlänge, dem Kolbendurchmesser und dem Durch-

messer der Kolbenstange modelliert wird. Durch Anpassung der Parameter können Zylinder unterschiedlicher Hersteller mit variierenden Abmessungen dargestellt werden.

Der Aufbau von Verhaltensmodellen erfolgt in mehreren Schritten (siehe Abbildung 48). Nachdem die notwendigen Komponenten aus einer Bibliothek importiert worden sind, werden sie zu einem Gesamtmodell verknüpft. Dazu werden die an den Schnittstellen der Simulationsbausteine anliegenden Signale miteinander verbunden. Dies entspricht im Prinzip einer virtuellen Verkabelung der Maschinenelemente. Anschließend erfolgt die Anbindung der Simulationsmodelle an das Bussystem. Dadurch wird die Kommunikation zwischen dem Maschinenmodell und der Steuerung ermöglicht.

Mit Hilfe des vorgestellten Modellierungskonzeptes kann bereits der Gutablauf eines Steuerungsprogramms getestet werden. Für die Erweiterung auf die Darstellung des Störverhaltens der Maschine ist es notwendig, die Komponentenbibliothek um Komponenten zu erweitern, die es ermöglichen, Störungen zu simulieren. Dazu werden die Ergebnisse der in Unterabschnitt 6.3.5.1.2 dargestellten Analyse des Störungsverhaltens genutzt.



### Vorgehensweise

- Import der vordefinierten Komponenten aus einer Bibliothek
- Verknüpfung der einzelnen Komponenten (virtuelle Verkabelung bzw. Verrohrung)
- Import der Buskonfiguration und der Zuordnungsliste (E/A-Belegung)
- Anbindung an das Bussystem

Abbildung 48: Aufbau von Verhaltensmodellen

Die Klassifikation von Störungen der Sensorik und der Aktorik lässt es zu, das Fehlverhalten der Komponenten in vier allgemeine Störungsarten zu unterteilen, nämlich in



- ein sporadisches,
- sowie ein periodisches Fehlverhalten,
- eine dauerhafte Veränderung des Arbeitsverhaltens und
- den Totalausfall.

Grundsätzlich ist die Einspielung von Störungen durch Überschreiben der E/A-Peripheriesignale, insbesondere der Sensorik, möglich. Dies erfolgt durch einen direkten Zugriff auf die E/A-Peripherie wahlweise auf der Simulations- wie auf der Steuerungsseite. Liegen allerdings komplexere Störsituationen vor, so wird für eine derartige Störungssimulation wiederum ein Maschinenmodell notwendig, das das E/A-Prozessabbild einer komplexen Störung zur Verfügung stellt. Dazu kann das in der Echtzeitsimulation bereits komponentenorientiert vorliegende Maschinenmodell genutzt werden. Dies erfolgt durch Erweiterung der Simulationskomponenten um ein komponentenspezifisches Störverhalten, das extern ausgelöst werden kann. Dadurch bringt ein komponentenorientiert aufgebautes Simulationsmodell implizit bereits zahlreiche Störungsbilder aus der Aktorik, Sensorik und Feldbustechnik mit (siehe Abbildung 49).

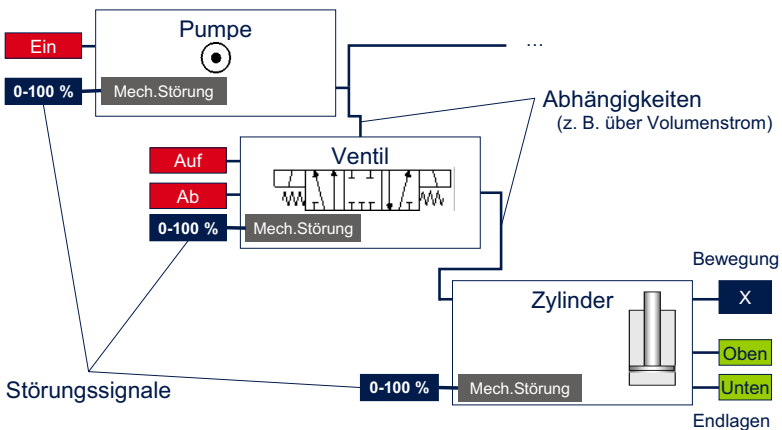


Abbildung 49: Komponentenorientierter Modellierungsansatz einer pneumatischen Steuerkette mit Störungszuständen

Die komponentenorientierte Programmierung des Störverhaltens ist angelehnt an objektorientierte Strukturen aus der PC-Programmierung. Es

wird hier analog zu den Methoden, die bei der objektorientierten Programmierung mit dem Objekt gespeichert werden, das Störverhalten in der Komponente selbst abgelegt. In der komponentenorientierten Abbildung des Störverhaltens in dem Beispiel aus Abbildung 50 wird mittels einer digitalen Variablen mit einem Wertebereich von 0 bis 100 % für jede Komponente das Störverhalten festgelegt.

Diese Variable wird als das *Störungssignal* bezeichnet und beinhaltet den Störungszustand der Komponente. Über das Störungssignal können die unterschiedlichen Störungsarten von außen ausgelöst werden, wobei „0 % gestört“ die ungestörte Funktion einer Komponente und „100 % gestört“ einen Totalausfall bedeutet. Eine mechanische Schwergängigkeit ließe sich demnach durch ein Störungssignal zwischen 0 und 100 % darstellen. Eine sporadisch oder periodisch auftretende Fehlfunktion wird mit einer zeitlichen Änderung des Störungssignals dargestellt.

Störungssignal	Bedeutung
0 %	Ungestörter Betrieb der Komponente
konstant 0-100 %, z.B. 50 %	Komponente zu 50 % in der Leistung reduziert
periodisch wechselnd 0-100 %	Periodischer Ausfall
intermittierend 0-100 %	Sporadischer Ausfall
100 %	Totalausfall der Komponente

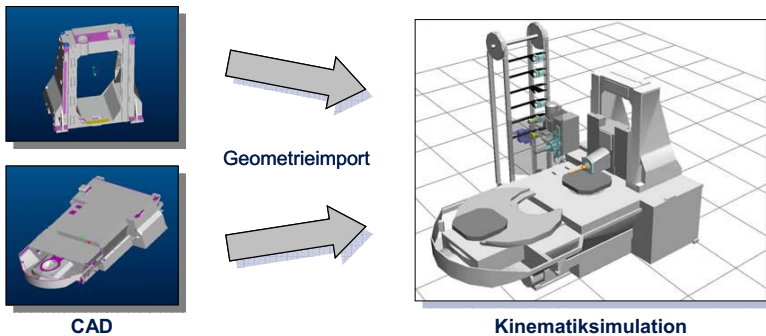
Abbildung 50: Bedeutung des Störungssignals an einer Komponente

Der Vorteil der komponentenorientierten Maschinenmodellierung zeigt sich besonders bei der Störungsmodellierung. Durch das systematische Vorgehen können, aufbauend auf der Funktionsmodellierung einer Maschine, bei Zuhilfenahme einer Komponentenbibliothek mit verhältnismäßig niedrigem Aufwand Simulationsmodelle zusammengestellt werden. Durch die in die Komponenten integrierten Störungszustände werden dem Testprogrammierer bereits viele Störungszustände implizit aus der Peripherie angeboten, die dann lediglich im jeweiligen Testfall verwendet werden müssen (siehe Abbildung 49).

### 6.3.5.1.4 Visualisierungsmodelle

Der Aufbau der Kinematikmodelle erfolgt auf der Grundlage der im Rahmen der mechanischen Konstruktion erzeugten CAD-Modelle (siehe Abbildung 51). Durch den Export der einzelnen Modellkomponenten über standardisierte Schnittstellen wie DXF (Drawing Exchange Format)

oder STL (Standard Transformation Language) werden die Modellkomponenten aus dem CAD zur Verfügung gestellt. Der Detaillierungsgrad der Modelle muss beim Export berücksichtigt werden. Fein detaillierte Modelle erhöhen die Aussagekraft nur in einem geringen Maße, können aber bei den aktuell verfügbaren Rechnerleistungen die Performance der Simulation stark beeinträchtigen. Der Aufbau der Kinematikmodelle muss somit bereits in der Konstruktionsphase berücksichtigt werden. Dies kann durch die Vorgabe firmeninterner Richtlinien zum Aufbau der CAD-Modelle geschehen. Eine ähnliche Vorgehensweise wird in der industriellen Praxis bereits bei der Ableitung von FEM-Modellen aus den CAD-Konstruktionsdaten erfolgreich eingesetzt.



### Vorgehensweise

- Geometrieexport aus dem CAD über Standardschnittstellen (IGES, STL, DXF, VRML)
- Import der Geometrie in die Kinematiksimulation
- Definition der kinematischen Achsen

Abbildung 51: Aufbau von Kinematikmodellen

Nach dem Import der Modellkomponenten in das Kinematiksimulationsystem erfolgt die Definition der rotatorischen und translatorischen Bewegungsachsen. Hierzu gilt es, die Freiheitsgrade der Modelle und gegebenenfalls Grenzwerte zu definieren. Wird beispielsweise eine rotatorische Achse modelliert, so müssen die Lage der Achse im Raum und der Verfahrbereich festgelegt werden.

#### 6.3.5.1.5 Materialflussmodelle

Aus dem Anlagen- oder Maschinenlayout ergibt sich der Materialfluss, der die Logistik der Werkstücke, der Werkzeuge, der Fertigungshilfsstoffe oder der Vorrichtungen zum Ziel hat. Der Materialfluss lässt sich, bezogen auf eine zu modellierende Maschinen- oder Anlageneinheit, in den inne-

ren und den äußeren Materialfluss aufteilen. Der innere Materialfluss stellt einen Gegenstand der Materialflussmodellierung dar, während der äußere Materialfluss als Randbedingung auf das System in Form von Quellen und Senken mit einem fördertechnischen Verhalten aufgeprägt wird (siehe Abbildung 52).

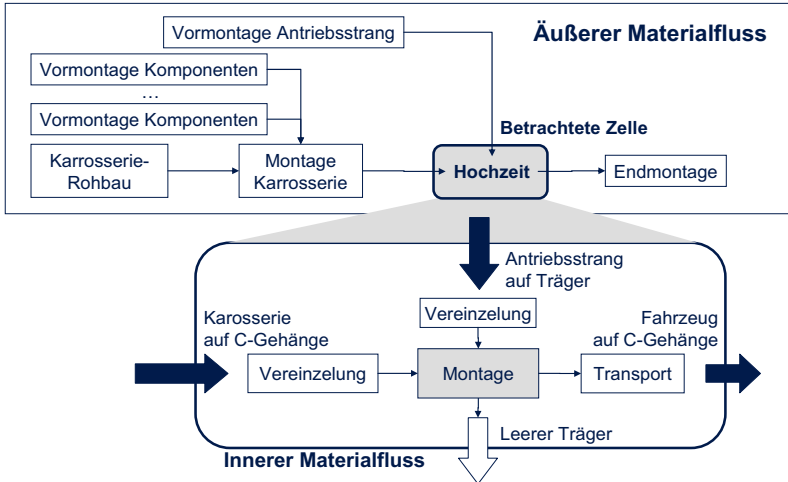


Abbildung 52: Innerer und äußerer Materialfluss am Beispiel einer Montagezelle

Abhängig von der Komplexität des inneren Materialflusses führt die Abbildung zu unterschiedlich aufwändigen Modellen. Handelt es sich um einfache Materialflussvorgänge, so kann der Materialfluss direkt in das Peripheriemodell integriert werden und wird in der Visualisierung lediglich angezeigt. Sind allerdings komplexe geometrische Bedingungen für den Verlauf des Materialflusses zu erfüllen, so ist es sinnvoll, den Materialfluss in eine 3D-Simulationsumgebung zu integrieren. Handelt es sich um logistische Zellen oder Linien, so wird die Integration einer layout-orientierten Ablaufsimulation notwendig. Dabei werden im Zellen-, Linien- oder Anlagenlayout die einzelnen Bausteine aufgebaut und durch Vorgänger-Nachfolgerbeziehungen zueinander in Beziehung gesetzt. Das Prozessverhalten der Materialflussobjekte, nämlich von Werkstücken, Werkzeugen und Betriebshilfsmitteln, wie beispielsweise Paletten, Vorrichtungen oder Hilfsstoffen, wird durch Transport-, Füge- und Trennvorgänge abgebildet.

Die Darstellung des äußeren Materialflusses, also der Materialflussobjekte, die jeweils von vor- oder nachgelagerten Systemen in das betrachtete System ein- bzw. ausströmen, kann ebenfalls auf unterschiedliche Weise

erfolgen. Der Aufwand der Modellierung des äußeren Materialflusses richtet sich nach der Bedeutung der von außen aufgeprägten Anregung des inneren Materialflussesystems. Die Abbildung kann mittels Listen entlang der Quellen auf der Systemgrenze generiert werden, in denen die zeitliche Abfolge von einlaufenden Materialflussobjekten dargestellt wird. In den Senken der Systemgrenzen ist ein realistisches Stauverhalten abzubilden. Besteht eine systematische Kopplung zwischen äußerem und innerem Materialfluss, beispielsweise durch eine kinematische Kopplung oder durch wechselseitig abhängige Steuerungsalgorithmen, so muss der äußere Materialfluss detaillierter modelliert werden. Dazu wird wiederum eine Ablaufsimulation genutzt, die auf abstraktem Niveau den Materialfluss des Gesamtsystems abbildet. Dieser stellt für das betrachtete System die Randbedingungen an den Systemgrenzen dar und kann so realistischer dargestellt werden (siehe Abbildung 40).

#### 6.3.5.1.6 Integration der Teilmodelle

Wie bereits in Unterabschnitt 6.3.4 beschrieben, stellen das Kinematikmodell sowie ggf. ein eigenständiges Materialflussmodell den aktuellen Zustand des virtuellen Maschinenmodells in Form einer zwei- oder dreidimensionalen Visualisierung dar (siehe Abbildung 36). Um dies zu ermöglichen, ist eine Verknüpfung zwischen dem Zustand der Maschine im Peripheriemodell und dem Zustand der Maschine im Kinematikmodell bzw. im Materialflussmodell erforderlich. Beispielsweise ist es notwendig, das Schalten eines Ventils, das im Verhaltensmodell einem gesetzten Ausgang der Steuerung gleichkommt, im Kinematikmodell mit einer farblichen Kennzeichnung darzustellen. Ebenso müssen die aktuellen Achspositionen durch eine entsprechende Positionierung der Achsen im Kinematikmodell visualisiert werden.

Falls keine integrierte Simulationsumgebung vorliegt, die Peripheriemodell, Kinematikmodell und Materialflussmodell in einer Anwendung vereint, benötigt das Simulationssystem einen Dienst, der die Informationen aus dem Peripheriemodell an die Kinematiksimulation bzw. an die Materialflusssimulation überträgt (siehe Abbildung 53). Ebenso ist eine Umgebung zur intuitiven Konfiguration dieser Verbindung notwendig.

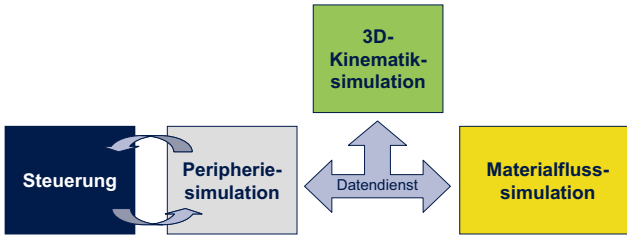


Abbildung 53: Dienst zum Datenaustausch zwischen Teilmodellen

Beispielsweise wird der aktuelle Wert einer kinematischen Achse aus einem Speicherabbild der Peripheriesimulation ausgelesen und mit der entsprechenden Achse in der Kinematiksimulation verknüpft. Die Zuordnung der Signale erfolgt durch die Interpretation einer eingelesenen Konfigurationsdatei. Nachdem das Speicherabbild vollständig abgearbeitet wurde, wird eine Aktualisierung der Ansicht des 3D-Modells durchgeführt.

### 6.3.5.2 Teilautomatisierte Modellgenerierung

Praktische Erfahrungen aus realen Projekten zeigen, dass der Aufbau von Simulationsmodellen analog zur Baukastenstruktur einer Maschinenbauerei erfolgen muss (BERGER 2005). Dabei kann anhand eines alle Bauereihen überspannenden Simulationsmodells ein und dasselbe Maschinenmodell für die virtuelle Inbetriebnahme verschiedener Ausführungen einer Maschine genutzt werden. Dazu wird eine konfigurierbare Abstraktionsschicht zwischen SPS-Prozessabbild und Modellprozessabbild gelegt. Diese ermöglicht die Verwendung eines Modells für den Test unterschiedlicher Steuerungskonfigurationen.

Bereits AMANN (1994) stellte fest, dass die Schnittstellen der Simulation zu Entwicklungswerkzeugen eine aufwandsarme Datenübernahme aus den Entwicklungsdaten ermöglichen müssen. Dieser Anforderung tragen die Arbeiten von GRÄTZ (2006) Rechnung, indem ausgehend von einer mechatronischen Funktionsmodellierung teilautomatisch Installationspläne generiert werden können. Durch Ausdehnung dieser Methode auf die Generierung von Simulationsmodellen können diese ebenfalls teilautomatisiert aus einem Funktionsmodell abgeleitet werden. Dazu wird die Definition von standardisierten Simulationsmodellbausteinen erforderlich, die jeweils Teilelementen des Funktionsmodells entsprechen.

Einen ähnlichen Weg verfolgen Hersteller von Engineering-Plattformen (zum Beispiel LITTO 2004 und SCHLÖGL 2005). Gemein ist dabei allen Ansätzen, dass in einem intelligenten mechatronischen Projektkonfigurator

zunächst eine abstrakte Komponentenstruktur der Produktionsmaschine aufgebaut wird. Dabei bilden standardisierte Komponenten die atomaren Elemente der Komponentenstruktur. Durch die Zuordnung von intelligenten Standard-Teilmodellklassen zu diesen kleinsten Komponenten wird es möglich, automatisiert Simulationsmodelle einer Anlage aus der Komponentenstruktur zu erzeugen. Dabei werden die Standardkomponenten jeweils wie Objekte aus einer Bibliothek instanziiert, mit Hilfe von intelligenten Skripten konfiguriert und parametrisiert.

Das Know-how dieses teilautomatisierten Prozesses liegt in der Definition intelligenter Standardkomponentenklassen in der Bibliothek. Damit verändern sich die Arbeitsweisen der beteiligten Organisationseinheiten grundlegend. Zunächst werden die Entwicklungskräfte in drei Gruppen eingeteilt, die *Entwickler*, die *Standardisierer* und die *Projektierer*.

Die *Entwickler* beschäftigen sich mit Neuentwicklungen und deren Erprobung im Versuch. Hat eine Entwicklung Marktreife erreicht, werden die zu ihrer Darstellung notwendigen Komponenten von der Gruppe der *Standardisierer* analysiert und ein mechatronischer Standard dazu definiert. Dieser enthält neben mechanischen Daten Vorlagen von Stromlauf- und Fluidplänen sowie SPS-Programmrümpfe. Zusätzlich wird jeder Standardkomponente ein Simulationsmodell zugeordnet. Ein derart neu geschaffener Standard wird in die Komponentenbibliothek mit aufgenommen.

Nach einer Auftragserteilung konfiguriert ein *Projektierer* in einem Engineering-Werkzeug mit der Bibliothek von Standardkomponenten die Komponentenstruktur des angefragten Produktionssystems. Wenn dabei nicht vollständig auf Standardkomponenten zurückgegriffen werden kann, müssen die entsprechenden Werte für Neuentwicklungen zunächst abgeschätzt und diese anschließend von Hand modelliert werden. Sie entziehen sich so dem automatischen Generierungsprozess. Nach Abschluss der Komponentenstruktur werden durch das Engineering-Werkzeug und die Bibliothek automatisch Simulationsmodelle generiert und um die manuelle Modellierung von neuartigen Komponenten ergänzt. Auf Basis des gewonnen Simulationsmodells kann eine virtuelle Inbetriebnahme durchgeführt werden.

### 6.3.5.3 Implizite oder physikalische Modellierung

Ein mit dem vorhergehenden konkurrierender Ansatz wird durch die so genannte physikalische Modellierung gebildet, bei der die physikalischen Simulationsmodelle durch automatisierte Präprozessoren aus nativen Entwicklungsdokumenten, wie beispielsweise Stromlauf- und Fluidpläne-

nen sowie den 3D-CAD-Modellen generiert werden. Dies lässt auch die Abbildung komplexer Materialflussphänomene zu.

Bei der impliziten oder auch physikalischen Modellierung wird der Funktions- bzw. Wirkzusammenhang der Modelle über eine Abbildung der in den Projektierungs- und Entwicklungsdaten enthaltenen physikalischen Eigenschaften realisiert.

ZÄH et al. (2006) beschreiben ein System zur automatischen Ableitung von Simulationsmodellen aus der Maschinendokumentation. Stromlauf- und Fluidpläne liefern die Information zum Aufbau eines Systems aus Zustandsdifferentialgleichungen, die auf einem leistungsfähigen Solver in Echtzeit gelöst werden. Eine Schnittstelle wandelt Signale, die von der Steuerung kommen, in virtuelle Spannungen, die an den Ausgängen des Modells anliegen. Umgekehrt werden virtuelle Spannungen an die Steuerungseingänge als Signale zurückgegeben.

Für die Erstellung der Simulationsmodelle wird ein Algorithmus zur Mustererkennung eingesetzt. Dieser ermittelt in Stromlauf- und Fluidplänen im PDF-Format die dokumentierten Komponenten und die Verbindungen untereinander. Durch die Verwendung dieses neutralen Datenformates ist es möglich, Daten aus nahezu beliebigen CAD-Systemen einzulesen.

Für die Mechanik führen ZÄH et al. (2005c) ihre Arbeiten im Bereich der impliziten Modellierung von kinematischen und materialflusstechnischen Phänomenen an. Durch eine Abbildung des Verhaltens mit Hilfe von Modellen aus der Starrkörpermechanik konnten einfache Materialflussvorgänge dargestellt werden, wie das Greifen, Transportieren und Ablegen von Objekten.

Die Ausprägungen zur Erfüllung der Anforderungen an den Modellerstellungsprozess sind in Abbildung 54 aufgeführt.

<b>Technologie der Werkzeuge und Integration in die Entwicklung</b>	Manuelles Vorgehen mit serverbasierter Dateiablage	Teilautomatisierte Modellgenerierung auf Basis von Standards	Implizite oder physikalische Modellierung
---	---	---	---

Abbildung 54: Teil des Lösungsbaukastens für den Modellerstellungsprozess

### 6.3.6 Inbetriebnahmeprozess

Die virtuelle Inbetriebnahme stellt im Wesentlichen einen der realen Inbetriebnahme sehr ähnlichen Prozess dar. Dabei erfolgt ein kontrolliertes, schrittweises Aktivieren und Testen von Einzelfunktionen einer Maschinensteuerung und im weiteren Verlauf des Zusammenspiels der Einzel-



funktionen. In diesem Unterabschnitt wird die generelle Vorgehensweise, angelehnt an den realen Inbetriebnahmeprozess, beschrieben. Außerdem wird auf die notwendige fachliche Qualifikation des Personals eingegangen und im weiteren Verlauf zwischen einem manuellen Test und einem automatisierten Test bei hoher Wiederholrate unterschieden.

### 6.3.6.1 Grundlegende Vorgehensweise

In der Praxis der realen Inbetriebnahme haben sich dazu Checklisten bzw. Testprotokolle bewährt (KOHRING 1993, S.66 und AMANN 1994, S. 66), die auf dieselbe Weise bei der virtuellen Inbetriebnahme zum Einsatz kommen müssen. Ein derartiges Testprotokoll kann je nach Detaillierungsgrad mehrere hundert Seiten umfassen und stellt eine ausführliche Liste von Testschritten dar, die an einer Maschine durchgeführt werden müssen, um eine Freigabe zur Auslieferung erteilen zu können. Es kann aus Maschinensicht nach Maschinenfunktionen oder nach Komponenten gegliedert werden (siehe Abbildung 55).

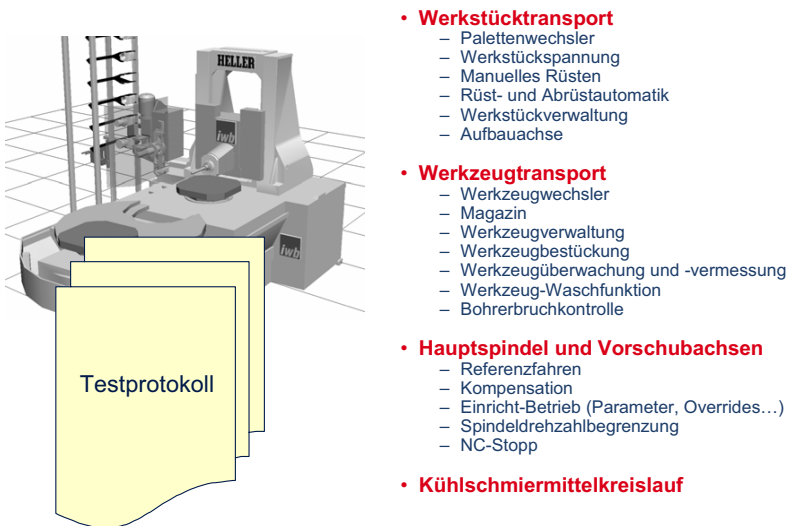


Abbildung 55: Gliederung eines Testprotokolls nach Komponenten bzw. Maschinenfunktionen

Aus steuerungstechnischer Sicht kann ein Testprotokoll auch basierend auf einer Einteilung nach Zielsystemen wie NC, HMI, PLC und MSTIT aufgebaut werden (siehe Abbildung 56). Dadurch kann die Inbetriebnahme

mit besonderem Bezug auf das jeweils zu testende Zielsystem ausgelegt werden.

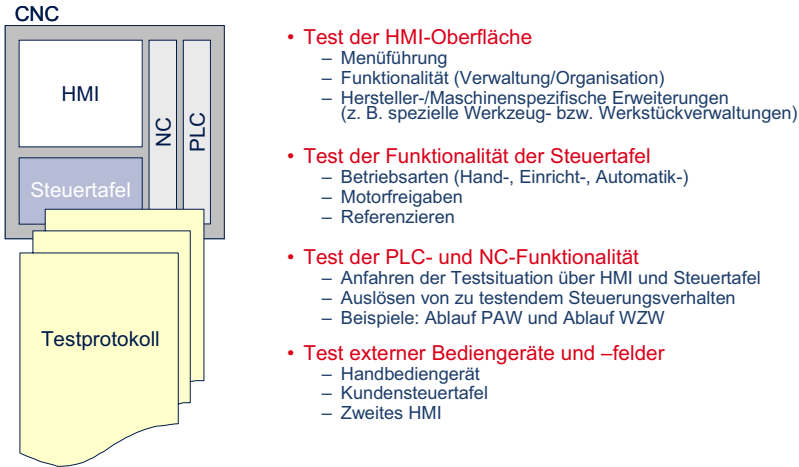


Abbildung 56: Gliederung eines Testprotokolls nach Zielsystemen

Die Einteilung in zwei Sichtweisen, die Maschinensicht und die Zielsystemsicht, ist analog auch aus der Entwicklung von Steuerungssystemen im Automobilbau bekannt. Dort werden, wegen der wesentlich früher geforderten und auch tatsächlich stattfindenden Amortisation der Aufwände, die HIL-Simulation und der Systemtest bereits seit einiger Zeit erfolgreich eingesetzt (SCHIEBER & DERICHSWEILER 2004).

### 6.3.6.2 Qualifikation des Personals

SCHIEBER & DERICHSWEILER (2004) beschreiben die Rollenverteilung bei der Auslegung von Systemen zur Testautomatisierung, zur Testfallgenerierung und -abarbeitung. Es wird im Hinblick auf die Ausbildung und Qualifikation unterschieden zwischen den Rollen des Systemkonfigurators, des Funktionsprogrammierers, des Testdesigners, des Testkonfigurators und des Testanwenders.

Der Systemkonfigurator entwirft die Testumgebung aus steuerungstechnischer Sicht. Er stellt sicher, dass die Steuerungssysteme aus dem Testsystem angesprochen werden können und die steuerungstechnischen Anforderungen eingehalten werden, wie beispielsweise minimale Reaktionszeiten oder verwendete Schnittstellen. Der Funktionsprogrammierer kennt beide Sichtweisen, die steuerungstechnische Sicht und die Maschi-

nensicht. Dazu stellt er sicher, dass die Maschinenzustände und -funktionen auf dem Testsystem abgebildet werden können. Den Ausgangspunkt stellt ein funktions- bzw. komponentenorientiertes Maschinenmodell dar, das vom Testdesigner entwickelt wird. Für ihn steht die Maschinsicht im Vordergrund. Er legt über die Funktionen und Komponenten der Maschine eine möglichst vollständige Sammlung von Testszenarien fest. Der Testkonfigurator wählt aus dieser Sammlung für den jeweiligen Testfall eine Untermenge von Tests aus und fügt diese zu einem Testpaket zusammen. Dieses Testpaket wird im Anschluss vom Testanwender beispielsweise in einer HIL-Simulationsumgebung abgearbeitet.

Für den Maschinen- und Anlagenbau entsteht durch eine derartige Rollenverteilung ein Personalaufwand, der vermutlich in keinem wirtschaftlichen Verhältnis zum Nutzen der virtuellen Inbetriebnahme steht. Aus diesem Grund müssen bei kleinen Unternehmen mehrere Rollen von einer Person übernommen werden. Wichtig ist die Trennung der Rollen des Entwicklers der Steuerungssoftware und des Systemtesters, der die Software in einer Testumgebung auf ihre Funktionen hin prüft. Dadurch wird sichergestellt, dass beim Systemtest zwischen der Modellbildung zur Erstellung der Steuerungssoftware und der Modellbildung zum Systemtest unterschieden wird. Für einen ganzheitlichen Systemtest müssen die Modellierungsgrenzen um die Maschine durch Prozess- und Benutzereingaben gezogen werden, während die Programmierung der Steuerungssoftware durch die Schnittstelle zwischen Benutzer und Steuerung sowie Maschine und Steuerung eingegrenzt wird. Es ist im Hinblick auf die Qualitätssicherungsaufgabe des Systemtests nicht zulässig, beim Entwurf eines Testfalles von dem Modell der Steuerungssoftware auszugehen, da dadurch lediglich abgeprüft werden kann, ob das Modell korrekt in eine Software umgesetzt wurde. Das Ziel eines ganzheitlichen Systemtests einer Maschine geht bei weitem darüber hinaus und muss den Test der Maschinenfunktionalität im Zusammenspiel von Mechanik, Elektrotechnik und Steuerungstechnik beinhalten.

Die notwendige Qualifikation des Systemtesters umfasst neben einem umfangreichen Querschnittswissen über die Maschinenteknik, als wesentliches Element praktische Erfahrung aus der realen Inbetriebnahme. Damit stellen erfahrene Inbetriebnehmer als Systemtester für die virtuelle Inbetriebnahme die optimale Besetzung dar.

### 6.3.6.3 Manueller Steuerungstest

Eine einfache, manuelle Form der Qualitätssicherung von Steuerungssoftware kann bereits am virtuellen Maschinenprototyp durchgeführt

werden. In erster Linie erlaubt es ein virtueller Prototyp, die Steuerungssoftware im realitätsnahen Ablaufverhalten zu betreiben und zu beobachten (siehe Abschnitt 6.2). Die Funktionstests des Gutablaufs können dadurch direkt durchgeführt werden. Für den Test der Reaktionsfähigkeit auf Störsituationen erlaubt das virtuelle Maschinenmodell mit dem gezielten Überschreiben einzelner Signale den manuellen Eingriff in die E/A-Peripherie und die simulierten Maschinenkomponenten oder -prozesse.

Für Softwaretests an virtuellen Maschinen können aus dem Grundzustand der Maschine nach dem Einschalten und Referenzieren der NC-Achsen sämtliche Fehlermeldungen getestet werden. Ein Beispiel stellt der Test einer steuerungstechnischen Laufzeitüberwachung für Endlagenschalter an hydraulischen oder pneumatischen Achsen dar. Für den Test am HIL-Simulator werden zunächst aus dem Grundzustand einzelne Endlagenschalter im virtuellen Modell ausgelöst. Nach einer in den Maschinenanforderungen definierten Zeit muss die Laufzeitüberwachung einen Fehler auslösen. Erfolgt die Fehlermeldung nicht innerhalb dieser Zeit, kann davon ausgegangen werden, dass die Laufzeitüberwachung fehlerhaft ist.

Den Ablauf eines manuellen Störungstests zeigt Abbildung 57. Es wird zum Beispiel der aktuelle Softwarestand auf die Teststeuerung geladen, der Ausgangszustand im Modell und in der Steuerung hergestellt und die virtuelle Maschine in einen Zustand gefahren, von dem aus eine Komponentenstörung oder Fehleingabe eines Benutzers ausgelöst wird. Die Steuerungsreaktion wird erfasst, beurteilt und ggf. Änderungsmaßnahmen abgeleitet. Nach Abschluss des Testfalles beginnt die Prozedur von neuem mit dem nächsten Testfall.

### 6.3.6.4 Automatisierter Steuerungstest

Gängige Testprotokolle für Maschinenfamilien umfassen je nach Detaillierungsgrad bis zu 200 Seiten an Testfällen. Insbesondere bei der heute stark verbreiteten Modul- oder Baukastenstruktur von Serienmaschinen gliedert sich die Steuerungssoftware in der Regel ebenfalls in Module, die den jeweils projektierten Maschinenmodulen entsprechen (siehe Abbildung 58). Dabei kann es häufig vorkommen, dass eine auszuliefernde Kombination von Modulen sowohl maschinenbauseitig als auch softwareseitig noch nicht im jeweiligen Zusammenspiel getestet worden ist. Das manuelle Durchlaufen des gesamten Testprotokolls an der realen Maschine führt zu einem erheblichen Zeitaufwand kurz vor Auslieferung der Maschine, der oft aufgrund von Terminnot nicht mehr geleistet werden kann. Damit ist die Qualität von Steuerungssoftware nicht in ausrei-

chendem Maß gesichert, wodurch mit Maschinenausfällen bzw. Stillstandzeiten weitere Folgekosten riskiert werden.

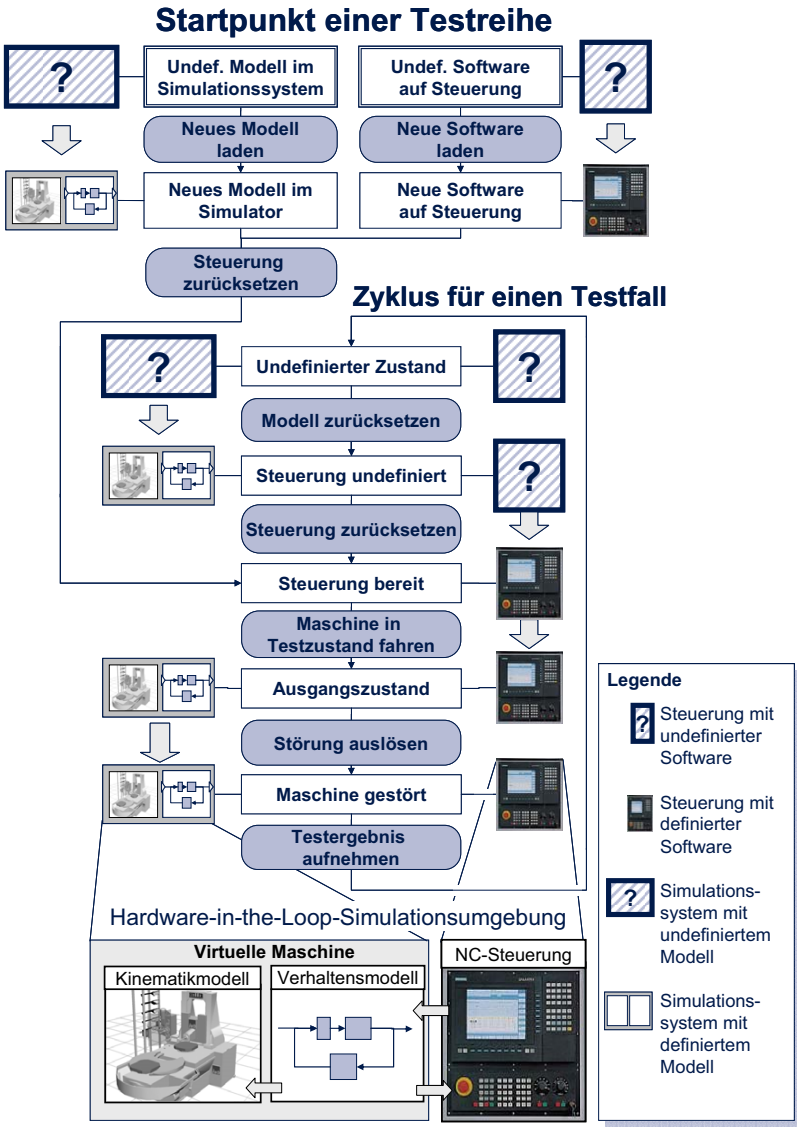


Abbildung 57: Ablaufplan für die manuelle Vorgehensweise beim Störungstest von Werkzeugmaschinen mittels einer Hardware-in-the-Loop-Simulationsumgebung

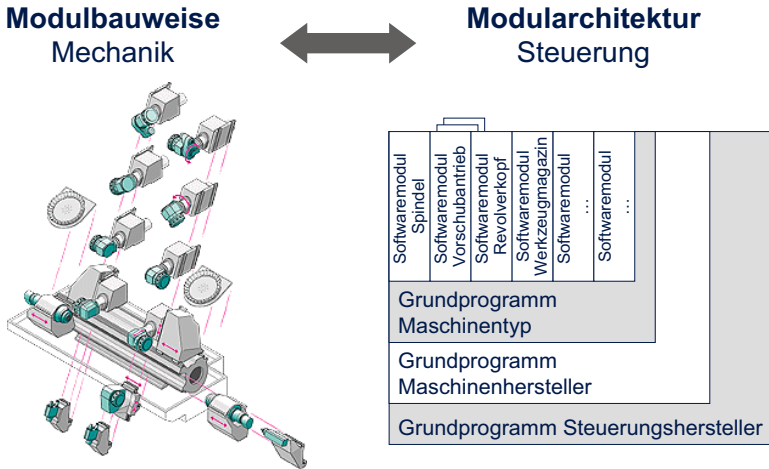


Abbildung 58: Modulbauweise und Modularchitektur in der Steuerungssoftware

Durch die Definition von den Maschinenmodulen zugeordneten Testfällen lässt sich der Steuerungstest dahingehend automatisieren, dass eine Maschinensoftware aus neuen und bewährten Modulen zusammengesetzt wird und diese dann für die jeweiligen Module notwendige Testfälle durchläuft. Ein Ziel des automatisierten Störungstests ist es, sicher zu stellen, dass die Kombination der Softwaremodule nicht zu unerwünschten Nebeneffekten führt.

#### 6.3.6.4.1 Ermittlung der Testszenarien

Aufbauend auf einer Checkliste aus Einzelfunktionen, für die jeweils der Gutablauf und die möglichen Störungen je Funktion getestet werden, gilt es in einem weiteren Schritt die Kombinatorik möglicher Ausfälle und Störungen zu prüfen. Zur Ermittlung der Testfälle können zunächst auf Basis der Einzelfunktionen aus den Anforderungen bzw. dem Lastenheft repräsentative Testszenarien abgeleitet werden. Diese werden durch diejenigen ergänzt, die aus dem Kundenservice über reale Störungsfälle zurückgemeldet werden. In einem Störfall, bei dem ein Softwarefehler erst im Betrieb der Maschine beim Kunden aufgetreten ist, müssen zu dessen Behebung weitere Softwareentwicklungsschleifen durchlaufen werden. Die Dokumentation der Änderungen im Feld kann genutzt werden, um für die Zukunft Testszenarien zu erstellen, die es erlauben, neue Software mit derartig simulierten Störungen zu testen. Dies ist insbesondere von Vorteil, wenn *neue* Steuerungssoftware aus *alten* Modulen zusammengesetzt wird. Durch ein routinemäßiges Prüfen dieser alten Module auf bekannte Fehler kann vermieden werden, dass fehlerhafte Soft-

wareteile wieder aktiviert werden. Eine ergänzende Möglichkeit, systematisch Testszenarien zu generieren, ist der gezielte Einsatz von Qualitätsmanagementmethoden wie zum Beispiel FMEA oder Fehlerbaumanalysen.

### 6.3.6.4.2 Systemanforderungen

Im Folgenden werden die Anforderungen an ein System zum automatisierten Softwaretest aufgestellt. Dazu wird zunächst von einem verallgemeinerten Ablauf eines automatisierten Steuerungstests ausgegangen (siehe Abbildung 59). In einem ersten Schritt wird die Konfiguration von Steuerung und Simulation in der generischen VIBN-Umgebung hergestellt. Dies bedeutet, dass das Steuerungsprojekt auf die Steuerung und das passende Maschinenmodell in das Simulationssystem geladen werden. Ein weiterer Schritt stellt jeweils über die Benutzerschnittstellen der Steuerung einen Ausgangszustand der Maschine her. Im folgenden Teil des Testfalles, dem Nutzteile, werden in zuvor definierter, zeitlicher Reihenfolge Benutzeraktionen über die Steuerung und Störungen über das Simulationsmodell in die VIBN-Umgebung eingespielt. In einem abschließenden Schritt werden die Reaktionen der Steuerung auf die Bedieneraktionen bzw. Störungen aus der Maschinenperipherie aufgezeichnet und für die Testfallbewertung interpretiert.

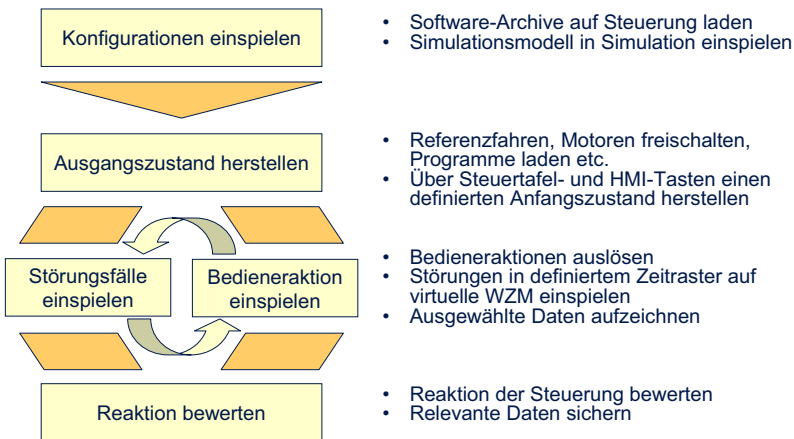


Abbildung 59: Ablauf eines automatisierten Softwaretests

Grundsätzlich soll der automatisierte Softwaretest am virtuellen Prototyp der Maschine erfolgen. Das bedeutet, dass Maschinenmodelle nach Unterabschnitt 6.3.4 eingesetzt werden. Damit muss zunächst die echtzeitfähige Abbildung der elektrotechnischen und mechanischen Komponenten einer Anlage bis zum Prozessabbild möglich sein. In Erweiterung dazu



werden die Komponenten um ein Störungsverhalten analog zu Unterabschnitt 6.3.5.1.3 ergänzt. Dies bedeutet, dass die Möglichkeit geschaffen wird, Störungen komponentenweise abzubilden, um die Störungserkennung, das Störverhalten und entsprechende Ausweichstrategien der Steuerung zu testen. Der Zugriff auf das Störungsverhalten der mechanischen, hydraulischen und elektrischen Komponenten muss für das Testautomatisierungssystem zugänglich sein. Im Hinblick auf eine durchgängige Modellierung soll das Auslösen einer Störung an einer beliebigen Komponente in standardisierter Form erfolgen.

Neben der komponentenorientierten Störungsmodellierung muss für eine flexible Testfallgestaltung auch eine direkte Manipulation von E/A-Peripheriesignalen möglich sein. Damit wird dem Testfallprogrammierer die Möglichkeit gegeben, für Ausnahmefälle in einem Testfall ein eigenes Störungsmodell zu hinterlegen, das alternativ zum komponentenorientierten Maschinenmodell steht.

Ein weiteres Gebiet der abzubildenden Effekte rührt aus der Feldbustechnik her. Hier ist insbesondere die Abbildung des Diagnose- und Störverhaltens von Feldbusgeräten bzw. gesamter Feldbusstränge erforderlich. Mit dem Gutverhalten werden Antworten auf Diagnoseanforderungen aus der Steuerung simuliert, während sich das Störverhalten über die Störung einzelner Signalbaugruppen eines Feldgerätes, den Ausfall des Feldgerätes, des Feldbussegmentes oder gar des gesamten Feldbusstranges erstreckt. Damit lassen sich Störsituationen nachstellen, die beispielsweise durch einen Busfehler begründet sind (siehe auch Unterabschnitt 6.3.5.1.2, Abbildung 45).

Der Zugriff auf die Störungsauslösung durch ein Testautomatisierungssystem muss die durch das jeweilige Zielsystem festgelegte Echtzeitbedingung einhalten (siehe Abtasttheorem in Unterabschnitt 2.3.2). Dies bedeutet, dass im Falle des Tests von PLC-Signalen eine Reaktionszeit in der Größenordnung von zehn Millisekunden erforderlich ist. Im Bereich der NC-Achsen sind schnellere Systemantworten von ca. einer Millisekunde und darunter notwendig.

Die Definition von Testfällen erfordert eine zeitliche Koordination der unterschiedlichen Schritte aus Abbildung 59. Insbesondere die Phasen der Testvorbereitung, -durchführung und -bewertung müssen es zulassen, basierend auf einer Zeitskala diverse Funktionen in der Steuerung und im Simulationsmodell auszulösen. Dies kann, vergleichbar einer Filmschneidesoftware, anhand einer Zeitskala erfolgen, die eine Definition von Testfällen erlaubt (siehe Abbildung 60).

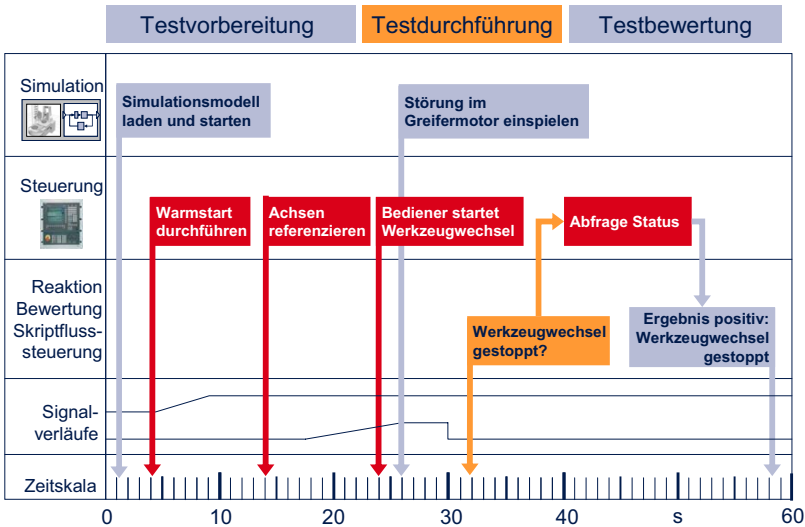


Abbildung 60: Zeitskalabasierter automatisierter Steuerungstest

### 6.3.6.4.3 Konzept einer Testumgebung

Unter Berücksichtigung der Anforderungen und mit besonderem Blick auf die in der Praxis im Einsatz befindlichen Zielsysteme ergibt sich das Konzept für einen Testautomaten als Anwendung, die das Simulationsmodell und die Steuerung gleichermaßen bedienen kann. Für den komplexen Fall der HIL-Simulation einer Werkzeugmaschinensteuerung stellt Abbildung 61 das Konzept dar.

Die Steuerung besteht aus mehreren Zielsystemen mit jeweils unterschiedlichen Programmiersprachen. Das HMI wird in einer Hochsprache programmiert, während die PLC nach IEC 61131 programmiert wird (siehe DIN EN 61131-3 2003). Die NC-Steuerung wiederum wird über herstellereigene, strukturierte Programmiersprachen sowie über G-Code und Maschinendaten programmiert. Die echtzeitfähige Maschinensteuertafel MSTT dient der Benutzerinteraktion und stellt ein weiteres Zielsystem mit eigenen, proprietären Programmiersprachen dar.

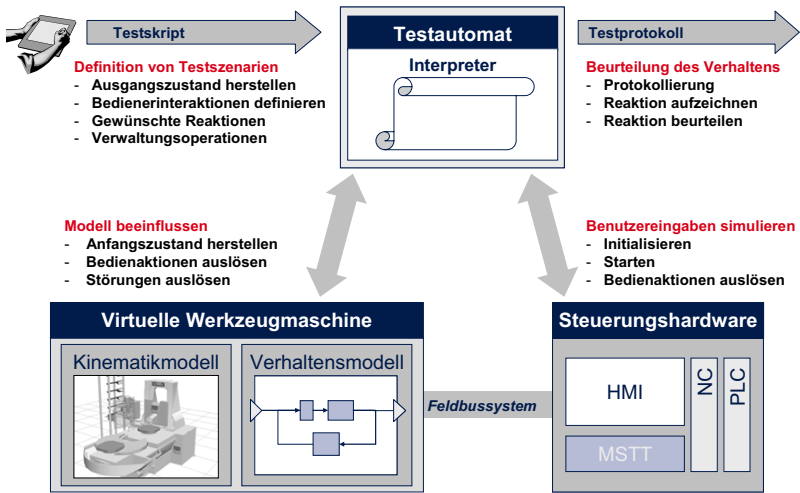


Abbildung 61: Testautomaten-Konzept für Werkzeugmaschinen

Die Möglichkeiten zum Datenaustausch zwischen den Systemen HMI, PLC, NC und einer zusätzlichen Anwendung sind für den Maschinenbauer als Steuerungsanwender aus Sicherheitsgründen zunächst stark eingeschränkt und nicht ohne Eingriffe des Steuerungsherstellers in die Systeme zugänglich. Als offener Standard zum Datenaustausch mit der Steuerung bietet sich der Standard OPC an. Dieser wurde für den Datenaustausch zwischen Steuerungen und der Leitsystemebene entwickelt. Die verschiedenen Steuerungshersteller bieten zusätzlich ihre eigenen Lösungen an, die über die Leistungsfähigkeit von OPC hinausgehen. Die Zusammenfassung der Ausprägungen für den Inbetriebnahmeprozess sind der Abbildung 62 zu entnehmen.

<b>Nutzung von Checklisten im Rahmen einer systematischen Testplanung</b>	Klassische Inbetriebnahme-Checklisten	Rückmeldungen von Kundenservice und Instandhaltung	FMEA	Stochastische Generierung Von Störungen (Virtueller Dauerlauf)	Systematische Kombination von Störungen	Modellbasierte Ableitung von Störungstests
<b>Form des Steuerungstests</b>	Manuelle Bedienung der nativen Steuerungsschnittstelle	Automatische Bedienung der nativen Steuerungsschnittstelle	Automatisierte Bedienung der Schnittstelle zwischen HMI und Steuerung	Automatisiertes Protokollieren von Systemzuständen	Automatisierte Beurteilung der Steuerungsreaktion	

Abbildung 62: Teil des Lösungsbaukastens für die Effektivität des Inbetriebnahmeprozesses

### 6.4 Lösungsbaukasten

Für die technische Ausstattung einer Virtuelle-Inbetriebnahme-Abteilung sind eine Reihe interdisziplinärer Werkzeuge aus verschiedenen Bereichen der Simulations-, Visualisierungs-, Kommunikations- und Steuerungstechnik erforderlich. Diese sind in Abbildung 63 in Anlehnung an ZÄH & REINHART (2004b) aufgeführt.

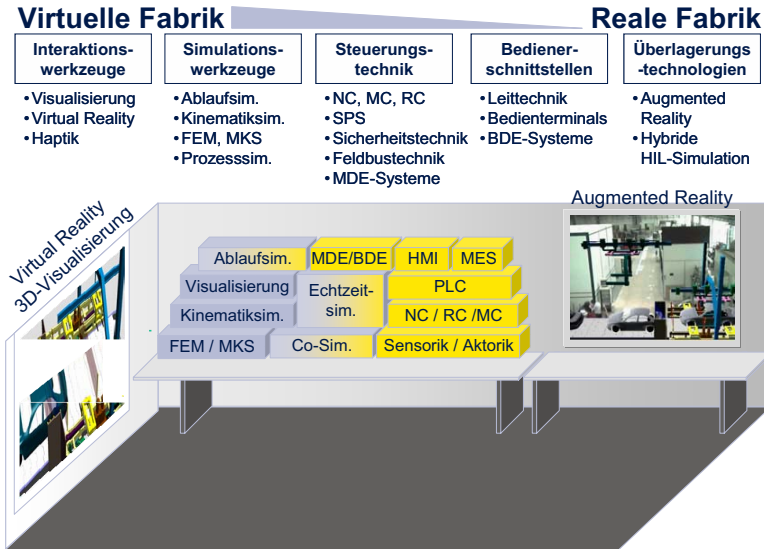


Abbildung 63: Teilsysteme eines Simulationslabors nach ZÄH & REINHART (2004b)

Sie werden sowohl aus den Bereichen der virtuellen Fabrik als auch der realen Fabrik hinzugezogen. Zentral für die virtuelle Inbetriebnahme sind die Systeme aus dem Bereich der Steuerungstechnik. Aus dem Bereich der realen Bediener-schnittstellen von Produktionssystemen sind Leitsysteme, Bedienterminals und BDE-Systeme vorhanden. Für die Darstellung der Modellzustände sind diverse Visualisierungswerkzeuge einsetzbar, von einer 3D-Kinematikvisualisierung über VR-Umgebungen bis hin zu Augmented-Reality-Technologien. Ein systematischer Überblick über die beschriebenen Ausprägungen der Einzelfunktionen in der generischen Funktionsstruktur findet sich im Anhang als Lösungsbaukasten für die virtuelle Inbetriebnahme.

## 7 Anwendung auf Projektbeispiele

In diesem Kapitel werden vier Anwendungsbeispiele für eine virtuelle Inbetriebnahme dargestellt. Sie sind bewusst aus einem breiten Spektrum gewählt, um die universelle Anwendbarkeit des Technologiebaukastens zu belegen. Es handelt sich um eine NC-gesteuerte Werkzeugmaschine aus der spanenden Fertigung, um eine komplexe Großanlage für die Blechumformung, um eine Fördertechnikzelle aus dem stückgutverarbeitenden Anlagenbau und um eine Fördertechnikzelle aus der Endmontage im Automobilbau. Die Beispiele werden in den folgenden Abschnitten 7.1 bis 7.4 jeweils einzeln beschrieben und im abschließenden Abschnitt 7.5 wirtschaftlich bewertet, um die Anwendung der Methode aus Kapitel 5 zu verdeutlichen. Für jedes Beispiel erfolgt eine kurze Beschreibung des Inbetriebnahmeobjektes, also der Maschine bzw. Anlage. Neben der in der Anlage verbauten Steuerungs- und Automatisierungstechnik wird die eingesetzte VIBN-Technologie skizziert und der Umfang der VIBN erläutert. Die Beschreibung eines jeden Beispiels schließt mit einer qualitativen Aufwand-Nutzen-Bewertung

### 7.1 Werkzeugmaschine

Werkzeugmaschinen stellen als Einzelmaschinen das Zentrum einer Werkstatt dar und können in verketteter Form als kleinste Bausteine von flexiblen Fertigungszellen bis hin zu agilen Fertigungssystemen mit hunderten von Maschinen fungieren. Damit bieten sie zahlreiche Einsatzmöglichkeiten und kommen für nahezu jedes Produkt an einer Stelle der Wertschöpfung zum Einsatz.

#### 7.1.1 Beschreibung

Bei der in diesem Anwendungsbeispiel beschriebenen Maschine handelt es sich um ein automatisiertes Bearbeitungszentrum. Es wird als Element eines agilen Fertigungssystems für die spanende Bearbeitung von Gussteilen genutzt. Das Werkstückspektrum erstreckt sich von Zylinderblöcken über Getriebegehäuse bis hin zu Kupplungsgehäusen für die Automobilindustrie. Für die Fertigung von V6-Zylinderköpfen werden beispielsweise 82 Bearbeitungszentren zu einem agilen Fertigungssystem zusammengefasst (BERGER 2005).

### 7.1.2 Steuerungs- und Automatisierungstechnik

In der Maschine kommt eine CNC-Steuerung der Firma Siemens vom Typ Sinumerik 840 D zum Einsatz. In dieser CNC ist neben der NC für die Verarbeitung der Geometriedaten und der Bahnsteuerung zusätzlich die PLC für die Steuerung der Maschinenabläufe von Haupt- und Nebenfunktionen sowie der Sicherheits-Verriegelungen vorhanden. Diese strikte Trennung liegt in der Realität häufig nicht mehr vor, da aus Gründen der Performance zum Teil Funktionalität nicht mehr klar einem Bereich zuzuordnen ist. So löst beispielsweise die NC aufgrund von Werkzeugwechselbefehlen im NC-Programm die Bereitstellung von neuen Werkzeugen und den eigentlichen Werkzeugwechsel aus. Der Werkzeugwechselablauf selbst wird wiederum häufig durch die peripherienahe PLC gesteuert. Damit müssen beide Steuerungen ein jederzeit aktuelles und konsistentes Abbild des Materialflusses der Werkzeuge mitführen, wodurch eine starke Verzahnung der Software von NC und PLC notwendig wird. Ein weiteres Element der CNC stellt die Bedienerschnittstelle dar, das HMI. Hier muss ebenfalls ein ständig aktuelles Prozessbild mitgeführt werden, wodurch auch das HMI, in der Regel ein Industrie-PC, mit den beiden Steuerungen kommunizieren muss. Jedes weitere Bedienterminal der Maschine muss ebenfalls mit den bestehenden Systemen kommunizieren. Dadurch sind in den Hauptsteuerungsfunktionen der Maschine, ohne dezentralisierte Antriebe, bereits mindestens vier unabhängige, prozessorgesteuerte Systeme miteinander in Einklang zu bringen.

### 7.1.3 Eingesetzte VIBN-Technologie

Beschrieben wird ein Teststand für die virtuelle Inbetriebnahme des Bearbeitungszentrums, bestehend aus der realen CNC-Steuerung sowie einem Simulationsrechner mit einer echtzeitfähigen Blocksimulation mit 3D-Kinematiksimulation und Kopplung zur Steuerung über Profibus. Das Modell umfasst ca. 50 Funktionseinheiten mit logisch verknüpften Steuerketten, die die Ausgänge der Steuerung lesen und die realistischen Eingangssignale generieren. Die virtuelle Inbetriebnahme einer CNC stellt durch die Vielzahl der miteinander kommunizierenden Prozessorsysteme eine Herausforderung dar. Sie kann nicht mehr mit einer Simulation der Zielprozessoren durchgeführt werden, da sich die Interaktion dieser Systeme im Rechner nur sehr aufwändig nachbilden lässt. Abbildung 64 zeigt den Aufbau der eingesetzten HIL-Umgebung. Die reale Steuerungshardware wird in Form einer CNC, bestehend aus NC, PLC und HMI sowie den weiteren Bediengeräten, an ein echtzeitfähiges Simulationsmodell der Maschinenperipherie gekoppelt. Die Kopplung wird über den Feldbus re-

alisiert, im Echtzeitmodell wird das gesamte Ein- und Ausgangs-Prozessabbild der Maschine dargestellt.

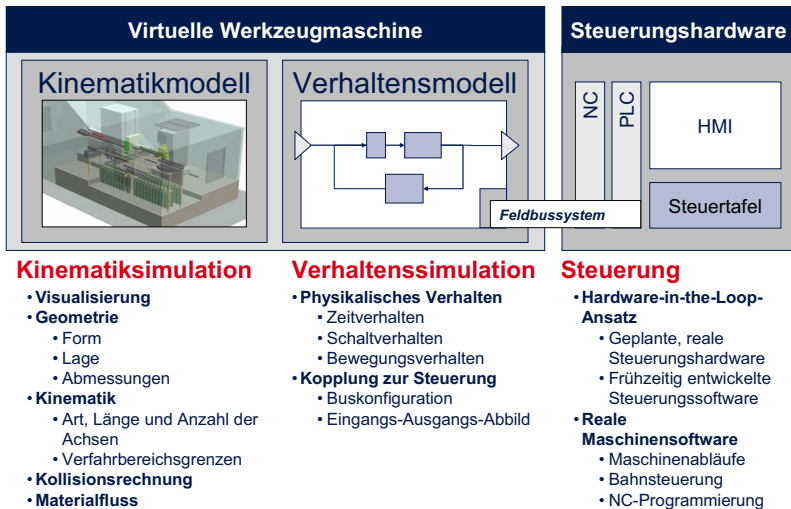


Abbildung 64: Hardware-in-the-Loop-Simulation eines Bearbeitungszentrums

So kann die in der Elektrokonstruktion entwickelte Steuerungssoftware auf der realen Hardware ohne Änderungen betrieben werden. Zum leichteren und schnelleren Einschätzen der Maschinenzustände und zur Darstellung des Materialflusses wird ein 3D-Kinematikmodell der wesentlichen Kinematiken der Maschine an die Echtzeitsimulation gekoppelt.

### 7.1.4 Umfang der durchgeführten VIBN

Die VIBN erfolgte anhand zweier Inbetriebnahme-Checklisten, der so genannten statischen und der dynamischen Checkliste. Die statische Checkliste dient in der realen IBN der Überprüfung der Signalkopplung von Steuerung und Automatisierungsperipherie, also der Antriebe und der Sensorik. Damit werden Verdrahtungs- und Konfigurationsfehler in der Elektrik und der Steuerung aufgedeckt. Bei der virtuellen Inbetriebnahme kann die statische Checkliste dazu genutzt werden, die Kopplung zwischen Steuerung und Simulation zu prüfen und die Simulationslogik der Steuerketten zu testen. Das Ergebnis ist ein Teststand, bei dem sichergestellt ist, dass die Steuerungsfunktionen mit dem Simulationsmodell der

Peripherie konsistent verbunden sind, also Polungen, Vorzeichen, Koordinatensysteme und Skalierungsfaktoren übereinstimmen.

Mit einer derart überprüften Testumgebung konnte im nächsten Schritt die eigentliche virtuelle Inbetriebnahme anhand der dynamischen Checkliste erfolgen. Diese dient in der realen Inbetriebnahme der Überprüfung der Steuerungsabläufe und führt schrittweise vom ersten Einschalten der Maschine über das Aktivieren der Versorgungseinheiten, den Test von Sicherheitsfunktionen bis hin zu manuell gesteuerten und automatischen Abläufen.

Bei der VIBN des Bearbeitungszentrums konnten zahlreiche Tätigkeiten aus der realen IBN vorweggenommen werden. Es wurden die Hard-, Firm- und Software der verschiedenen Zielsysteme HMI, PLC und NC in einen lauffähigen Zustand versetzt und Konsistenz zwischen den Softwareständen und Maschinendaten hergestellt. Beim Lampentest wurde die korrekte Ansteuerung der Lampen an der Maschine und den Bedientafeln geprüft. Nach dem Test der Schutzeinrichtungen und der Not-Aus-Funktionen konnte die Ansteuerung der Versorgungseinheiten von Pneumatik, Hydraulik und des Kühlmittels geprüft und getestet werden.

Darauf aufbauend wurde das Werkzeugspannsystem geprüft und die Handfunktionen über das HMI getestet. Dadurch konnte die Konsistenz der Steuerungsfunktionen mit den Handbedienbildschirmen gewährleistet werden. In diesem Rahmen wurden die Betriebsarten und die automatischen Maschinenabläufe wie Schmierprogramme, der Werkzeug- oder der Werkstückwechsel durchgespielt werden. Die dabei gefundenen Fehler beinhalten neben inkompatiblen Systemsoftwareständen diverse E/A-Zuordnungsfehler sowie fehlende Überwachungen und Fehler in Abläufen, wie dem Werkzeugwechsel. Außerdem wurden die Ablaufzeiten am Teststand optimiert.

### **7.1.5 Qualitative Aufwand-Nutzenbewertung**

Durch den Einsatz der Testumgebung für die virtuelle Inbetriebnahme sind ca. drei Wochen reine Zeit gespart worden und es ist im Anschluss keine Betreuung durch die Elektrokonstruktion mehr notwendig gewesen (BERGER 2005). Die Spannstation wurde innerhalb von zwei Tagen in Betrieb genommen.

Bezüglich der Qualitätssicherung konnte festgestellt werden, dass alle Systemsoftwarepakete mit unterschiedlichen Versionsständen im Feld sofort funktionierten und alle Bausteine der PLC korrekt eingebunden und parametrisiert waren.



Allgemein kann gefolgert werden, dass mit einem derartigen Simulationsaufbau der Funktionsumfang im Vorhinein sichergestellt und verifiziert werden kann. Außerdem kann ein Test aller programmierten Funktionen ohne Schäden an der Maschine durchgeführt werden. Des Weiteren können in beschränktem Umfang Zykluszeit- und Taktzeitbetrachtungen durchgeführt werden.

Durch den Betrieb der HIL-Umgebung parallel zur Inbetriebnahme der folgenden, nahezu baugleichen Maschine konnte im Fall von auftretenden Störungen oder Rückfragen bzw. Funktionserweiterungen die Simulationsumgebung zum Testen genutzt werden. Dadurch war es der Elektrokonstruktion möglich, parallel zu Belegzeiten an der realen Maschine durch Montagetarbeiten Steuerungsabläufe am Simulationsmodell zu testen.

Mit der VIBN wird die IBN der Software von der Mechanik abgekoppelt. Durch das vorzeitige Erkennen nicht funktionierender Vorgaben seitens der Mechanik können frühzeitig evtl. notwendige Änderungskonstruktionen angestoßen werden. Insbesondere die Simulation von zeitintensiven Funktionen, wie z.B. das Beladen des Werkzeugmagazins, werden so vorab getestet. Insgesamt wurde die reale Inbetriebnahmezeit und somit die Durchlaufzeit der Maschine um ca. drei Wochen verkürzt. Der erforderliche Mehraufwand bestand im projektbezogenen Modellaufbau von ca. acht Wochen, aufgrund der Wiederverwendung von Modellteilen mit stark sinkender Tendenz.

Im konkreten Fall liegt zwischen den Tageskosten eines Produktionsausfalles aufgrund einer verlängerten IBN und den Tageskosten, die mit einer VIBN verbunden sind, etwa ein Faktor von 10. Dies bedeutet, dass sich eine VIBN bei gegebenem Aufwand schon bei einer Einsparung von einer Woche rentiert. Mit einer Einsparung von 3 Wochen liegt das Beispiel also deutlich im positiven Bereich.

## **7.2 Komplexe Großanlage**

Das Beispiel für eine komplexe Großanlage liefert eine mehrstufige Pressenanlage aus dem Automobilbau. Die Umsetzung des Anwendungsbeispiels wird bis zur Fertigstellung der vorliegenden Arbeit lediglich bis zum theoretischen Konzept einer Testumgebung durchgeführt.

### **7.2.1 Beschreibung**

Eine Transferpresse stellt im heutigen Automobilbau das Herzstück eines Werkes dar. Durch die Presse müssen nahezu alle tragenden Teile der Ka-

rosserie aus einfachen Blechen durch Umformung erzeugt werden. Aufgrund der hohen Anforderungen moderner Fahrzeuge an Steifigkeit und Design können die geforderten Umformgrade oft nur durch sechs Stufen von Einzelpressen erreicht werden (siehe Abbildung 65). Um einen maximalen Durchsatz an Werkstücken zu erreichen, wird die Taktung des Materialflusses optimal auf den Pressentakt abgestimmt. Dies führt dazu, dass beinahe jede Funktion der Presse auf den Grundtakt abgestimmt werden muss. Dadurch ist ein äußerst komplexes Steuerungsnetzwerk mit einer hohen informationstechnischen Integration der Teilmodule erforderlich.

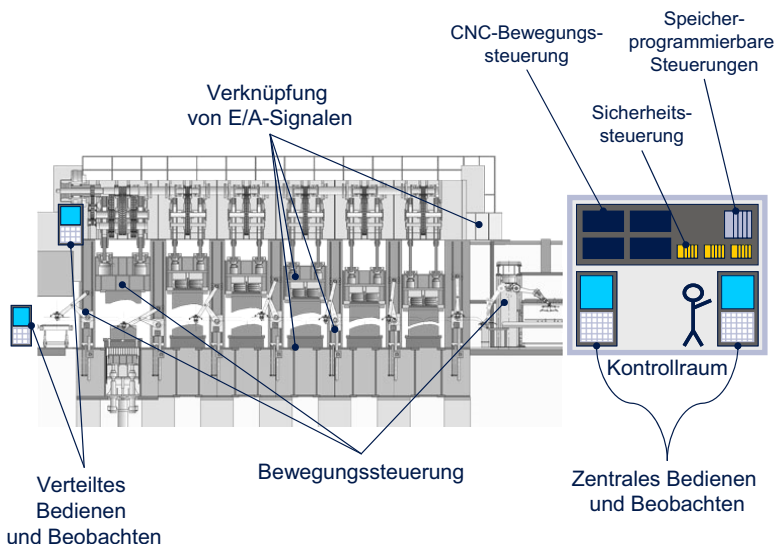


Abbildung 65: Seitenansicht einer sechsstufigen Transferpresse mit schematischem Kontrollraum

### 7.2.2 Steuerungs- und Automatisierungstechnik

Die Steuerungstechnik einer modernen Transferpresse setzt sich aus unterschiedlichen Systemen zusammen (siehe Abbildung 66):

- Bedienterminals für die Funktionen des Bedienens und Beobachtens
- SPS-Steuerungen für die Funktionen der Ablaufsteuerung, der Materialflussverfolgung und der Qualitätsüberwachung

- Sicherheitssteuerungen für die Überwachung der Sicherheitstechnik
- CNC-Steuerungen für die Steuerung und Koordination der Bewegungsabläufe

Der Umfang der Installationstechnik einer Transferpresse schließt Schaltschränke mit einer Länge von ca. 50 m ein, in denen zahlreiche geregelte Achsen und mehrere tausend Peripherieein- und -ausgänge verschaltet sind.

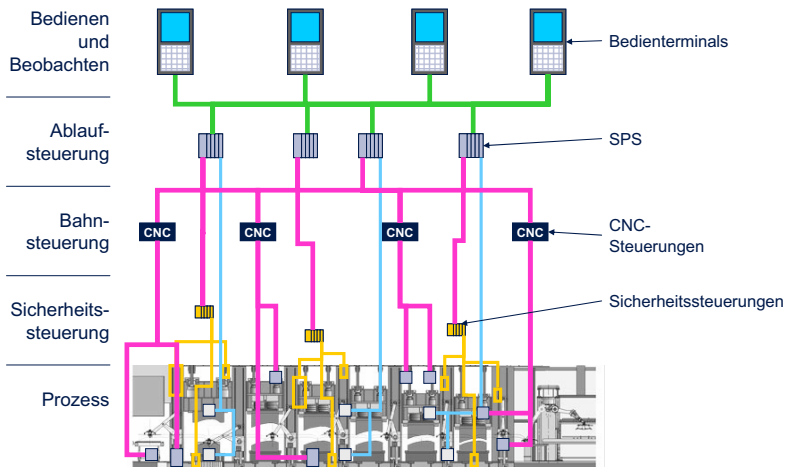


Abbildung 66: Vereinfachte Darstellung der Steuerungstechnik einer Transferpresse

Die komplexe Steuerungstechnik ist über Feldbussysteme und Ethernet vernetzt und in einem abgesetzten Kontrollraum untergebracht, der vor Erschütterungen geschützt ist. Für die Inbetriebnahme einer Transferpresse müssen alle Teilsysteme einzeln und insbesondere das Zusammenspiel dieser Teilsysteme untereinander korrekt funktionieren. Aus diesem Grund müssen für die Umsetzung der virtuellen Inbetriebnahme in einem ganzheitlichen Ansatz alle steuerungstechnischen Elemente berücksichtigt werden. Dies umfasst die steuerungstechnischen Funktionsebenen *Bedienen und Beobachten*, *Ablaufsteuerung*, *Bahnsteuerung* und *Sicherheitssteuerung* bis hin zur digitalen Ein- und Ausgabe auf Prozessebene.

### 7.2.3 VIBN-Technologiekonzept

Die für die virtuelle Inbetriebnahme konzeptionierte Testumgebung ermöglicht den Aufbau einer echtzeitfähigen Prozesssimulation der Presse, die über die feldbustechnischen Schnittstellen mit der realen Steuerungstechnik gekoppelt wird (siehe Abbildung 67).

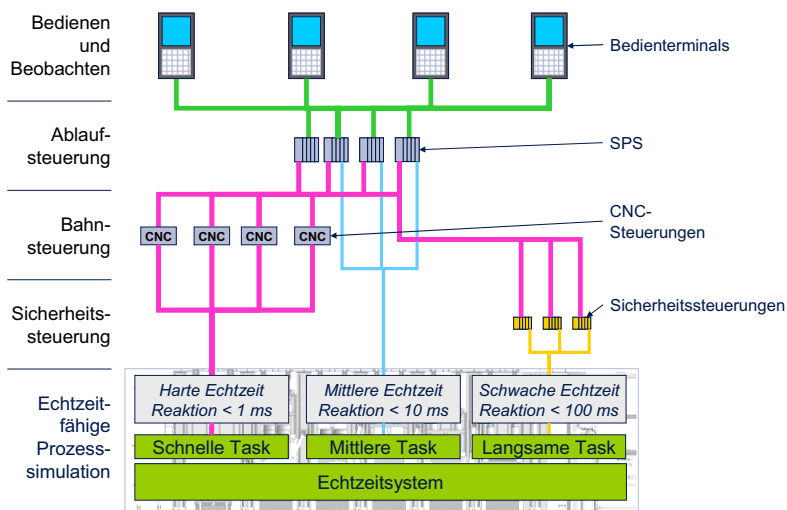


Abbildung 67: Reale Steuerungstechnik, gekoppelt mit einer Echtzeit-Prozess-Simulation

Für die Echtzeitfähigkeit der Prozess-Simulation muss das Abtasttheorem gelten. Dies bedeutet, dass alle Ein- und Ausgangssignale von der Simulation in der Steuerungszykluszeit zur Verfügung gestellt werden müssen. Aus diesem Grund werden zunächst die E/A-Signale in Bereiche unterschiedlicher Reaktionszeit unterteilt. Demnach gibt es schnelle Signale mit Reaktionszeiten des Simulationsmodells von unter 1 ms, mittelschnelle Signale mit einer Reaktionszeit von unter 10 ms und langsame Signale mit einer Reaktionszeit von kleiner als 100 ms. Dementsprechend ist ein skalierbares Simulationssystem auf der Basis eines Echtzeitsystems vorgesehen, bei dem schnelle Signale durch eine schnelle Task, mittlere und langsame Signale jeweils durch eine mittlere und langsame Task berechnet werden. Für die Visualisierung der Maschinenzustände ist eine 3D-Kinematiksimulation vorgesehen, in der die Achsen, der Materialfluss und der Bearbeitungsprozess intuitiv abgebildet werden.

Die Systemarchitektur des konzeptionierten Pilot- und Testcenters setzt sich aus einem Labor zusammen, das mehrere, räumlich integrierte Arbeitsplätze für das Inbetriebnahmepersonal zur Verfügung stellt (siehe Abbildung 68).

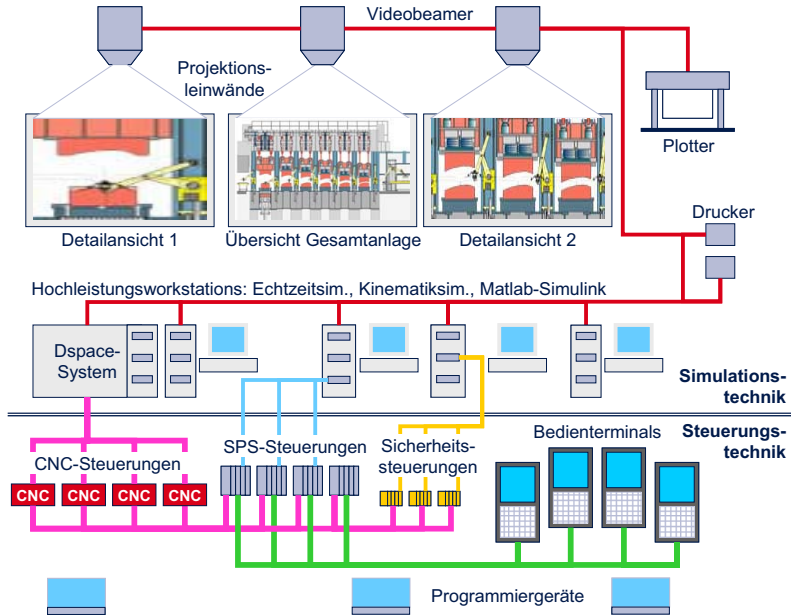


Abbildung 68: Pilot- und Testcenter für die virtuelle Inbetriebnahme

In dem Bereich der Steuerungstechnik werden CNC, SPS, Sicherheitssteuerungen und Bedienterminals leicht zugänglich untergebracht. Dem gegenüber stehen die Simulationsrechner, auf denen in einem Netzwerkverbund das verteilte, echtzeitfähige Simulationsmodell entwickelt, bedient und beobachtet werden kann. Auf einer Projektionsfläche mit Videoprojektoren können beliebige Bildschirmhalte von Simulationsmodellen und Steuerungstechnik wiedergegeben werden. Damit wird eine flexible Plattform geschaffen, auf der die Fachleute unterschiedlicher Disziplinen eng vernetzt an der Inbetriebnahme der Steuerungstechnik arbeiten können.

### 7.2.4 Umfang der VIBN

Auf Basis des vorgestellten Simulationskonzeptes wird es möglich, die in einer Presse zu verbauende Steuerungs- und Automatisierungstechnik

vorab als Gesamtsystem in Betrieb zu nehmen. Damit kann sichergestellt werden, dass die auf unterschiedliche Zielsysteme verteilte Steuerungssoftware lauffähig und konsistent ist.

Nach Grundfunktionen wie Not-Aus, Schnellstopp, Sicherheitssystemen, Betriebsarten und Handbedienfunktionen im Zusammenspiel von Steuerungen und Bedieneinheiten können auch komplexe Maschinenabläufe wie beispielsweise ein Produktionsanlauf, -stopp oder -wiederanlauf sowohl manuell als auch automatisch gesteuert und getestet werden.

Nach Abschluss der Inbetriebnahme kann dasselbe System dazu genutzt werden, Inbetriebnahme-, Betriebs- und Instandhaltungspersonal mit der Bedienung der Anlage vertraut zu machen. Dabei können insbesondere komplexe Vorgänge wie beispielsweise ein Werkzeugwechsel am realen Bediensystem geübt werden.

### **7.2.5 Qualitative Aufwand-Nutzen-Bewertung**

Eine Aufwand-Nutzen-Bewertung kann nur auf Basis von Überlegungen erfolgen. Der Nutzen einer virtuellen Inbetriebnahme besteht in der Möglichkeit, die Steuerungs- und Automatisierungstechnik ohne den mechanischen Aufbau der Großanlage in Betrieb zu versetzen und dennoch im Zusammenspiel zu testen. Ein weiterer Nutzen wird durch Schulungen und Simulationsmodelle für den Vertrieb generiert.

Dem Nutzen steht ein nicht unerheblicher Aufwand bei der Modellerstellung gegenüber. In diesem Zusammenhang muss die Komplexität einer derartigen Großmaschine beherrscht werden. Durch den Modellierungsvorgang wird der gesamte Entwicklungsumfang einer Konsistenzprüfung unterzogen, bei der nicht zusammenpassende Entwicklungsstände der Mechanik, Elektrik und Fluidtechnik sowie der Steuerungstechnik aufgedeckt werden. Insbesondere angesichts des Risikos beim Hersteller wie auch beim Kunden scheint der Nutzen den Aufwand auszugleichen.

## **7.3 Sondermaschinenbau**

Aus dem Sondermaschinenbau wird in diesem Anwendungsbeispiel eine komplexe Fördertechnikzelle einer automatisierten Ziegelei dargestellt (siehe APPEL 2006). Die Herausforderung bei der virtuellen Inbetriebnahme dieser Anlage besteht in der echtzeitfähigen Darstellung des Materialflusses von über 10.000 Ziegeln und 1.000 Paletten, die sich gleichzeitig darin befinden.

### 7.3.1 Beschreibung

Der Ablauf des Materialflusses in der Fördertechnikzelle ist schematisch in Abbildung 69 dargestellt. Es werden zunächst in zwei unabhängigen Linien durch jeweils zwei Pressen aus der rohen Tonmasse Ziegel abgepresst und auf Paletten abgelegt, die auf Förderbändern weiter transportiert werden.

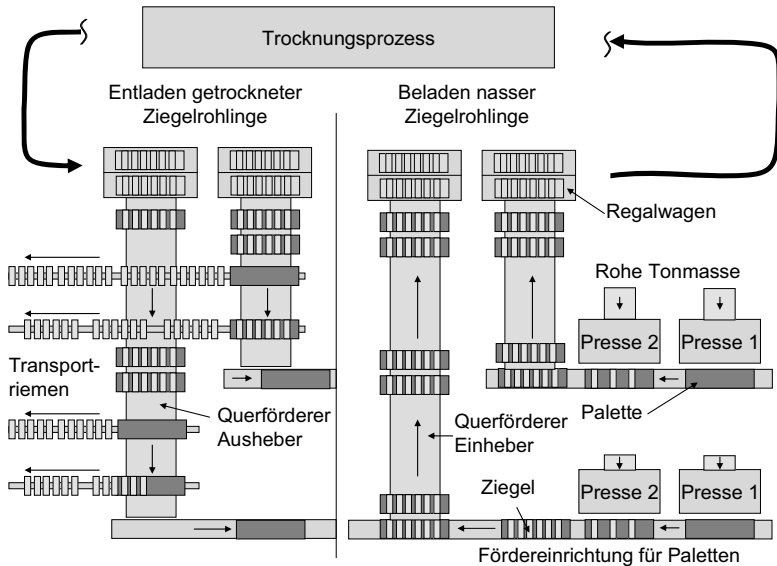


Abbildung 69: Schematische Darstellung einer Fördertechnikzelle in einer Ziegelei

Die derart beladene Palette wird über die Fördertechnik zu einer Übergabeposition transportiert. Dort wird die Palette durch den Querförderer übernommen und mit einer weiteren Palette in Zweiergruppen weitertransportiert. Die Zweiergruppen werden am Ende des Querförderers in einen freien Einschub eines bereit stehenden Elevators eingefördert. Ein Beladerechen sorgt für die Umsetzung des Inhaltes aus dem Elevator in den Trocknerwagen, dessen Fassungsvermögen doppelt so hoch ist wie das des Elevators. Die beladenen Wagen werden durch den Trocknungsprozess geleitet und gelangen anschließend an den Entladerechen. Dieser hebt den Inhalt des Trocknerwagens in einen weiteren Elevator. Dort werden die Paletten wieder in Zweiergruppen auf einen Querförderer abgesetzt. Anschließend werden die Ziegel durch einen Abräumgreifer zur Setzanlage vereinzelt. Die entladenen Paletten gelangen in einem Rück-

föhrkreislauf entweder wieder direkt zu den Pressen oder in einen vorge-lagerten Speicherelevator, der als Palettenpuffer dient.

### 7.3.2 Steuerungs- und Automatisierungstechnik

Die Automatisierung der Zelle wird mit einer SPS mit geregelten und un-geregelten Antrieben umgesetzt. Die Kopplung der Peripherie über ca. 300 Ausgänge und 700 Eingänge an die SPS wird aus Performancegründen mit insgesamt vier Feldbussystemen realisiert. Im ersten Feldbus-strang wird die gesamte E/A-Peripherie über dezentrale Peripheriean-schaltungen angesteuert, darunter beispielsweise ca. 60 Ventile, 30 unge-regelte Antriebe sowie etwa 250 induktive Näherungsschalter und etwa 30 Photozellen. In zwei weiteren Feldbussträngen sind 60 geregelte An-triebe, im vierten Feldbusstrang sind ca. 16 Winkelschrittgeber unterge-bracht. Die Sicherheitstechnik in Form von Sicherheits-SPS bzw. Schütz-technik ist, entkoppelt von der SPS-Technik, als diskreter Schutzfilter ausgeführt, der in unsicheren Situationen, wie beispielsweise Not-Aus oder dem Betreten von Sicherheitsbereichen, die Antriebe der Anlage stromlos bzw. kraft- oder bewegungsfrei schaltet. Aus diesem Grund wur-de die Sicherheitstechnik bei der virtuellen Inbetriebnahme nicht berück-sichtigt.

Die Frequenzumrichter der geregelten Antriebe werden über E/A-Adressen direkt aus der SPS mit den gewünschten Sollgeschwindigkeiten programmiert. Mit der SPS wird der Materialfluss der Zelle gesteuert. Damit ist ein wesentlicher Inhalt der SPS-Software die Überwachung und Steuerung der im Materialfluss stattfindenden Vorgänge. Ein idealisiertes Schema, insbesondere der Verknüpfungspunkte der unterschiedlichen Materialflussebenen von Werkstücken und Hilfsmitteln, ist in Abbildung 70 dargestellt.



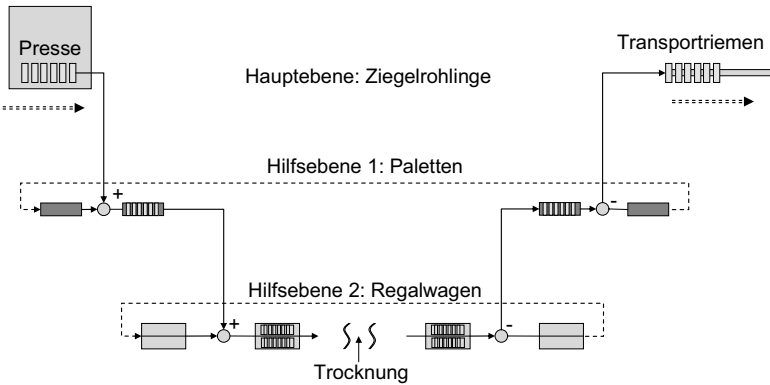


Abbildung 70: Schematische Darstellung des Materialflusses in der Ziegelei

Zum Test der SPS-Software ist eine realistische Abbildung des Materialflusses in Echtzeit erforderlich.

### 7.3.3 Eingesetzte VIBN-Technologie

Angesichts der Komplexität der Materialflussvorgänge hinsichtlich der Anzahl der darzustellenden Objekte sowie von Verbindungs- und Trennungspunkten ist eine Abbildung in marktüblicher Echtzeitsimulationssoftware nicht mehr möglich. Aus diesem Grund wurde eine hybride Testumgebung analog zu Abbildung 32 aufgebaut, bestehend aus der realen SPS mit dem realen Bedienpult inklusive HMI sowie einer signalorientierten Peripherie- und einer ereignisdiskreten Materialfluss-Simulation.

Das Peripheriemodell setzt auf der Struktur der Hardware-Konfiguration des Projektes mit vier Feldbussystemen auf und bildet das Antriebsverhalten mit dem realen Ansteuerungs- und Verzögerungsverhalten ab. Außerdem wird die Sensorik mit realistischem Verzögerungsverhalten und realistischer Verschaltungslogik dargestellt. Die Voraussetzung für die Umsetzung des Peripheriemodells ist die Unterteilung in folgende Funktionsgruppen:

- Drehzahlgeregelte Frequenzumrichter
- Positionsgeregelte Frequenzumrichter
- Zwei-Wege-Ventile für pneumatische Zylinder
- Hydraulikantriebe für Hub- und Senkbewegungen

- Induktive Endlagenschalter für Zylinderpositionierungen
- Winkelschrittgeber
- Kettenantriebe für Hub- und Senkbewegungen

Das Materialflussmodell bildet den Materialfluss der Ziegelrohlinge, der Paletten, der Trocknerwägen und die Verschachtelung der Materialflüsse ab und generiert abhängig vom materialflusstechnischen Geschehen entsprechende Endlagen- bzw. Lichtschrankensignale, wie in Abbildung 36 dargestellt. Die bidirektionale Kopplung zwischen Peripherie- und Materialflussmodell wurde über TCP/IP realisiert und überträgt die Zustände der Antriebsachsen aus der Echtzeitsimulation als Parameter an die Materialflusssimulation. In die andere Richtung werden Sensorsignale aus der Materialflusssimulation an die Peripheriesimulation zurückgegeben.

### 7.3.4 Umfang der durchgeführten VIBN

Es wurde eine vollständige HIL-Simulation der Zelle aufgebaut, mit der der Test von Handbedienfunktionen im Zusammenspiel der simulierten Anlage mit der SPS und dem Bedienpult durchgeführt werden kann. Darüber hinaus können Steuerungsabläufe für den Automatikbetrieb getestet werden. Die gefundenen Fehler lassen sich einteilen in:

- Fehler im Bedienpult oder in der Verbindung zwischen Bedienpult und SPS, wie vertauschte Schalter, falsch adressierte Datenwörter, fehlerhafte Melde- und Anzeigetexte
- Ansteuerung für negative Drehrichtung, fehlerhafte Funktionsaufrufe, vertauschte Zuordnung von Datenbausteinen
- Fehlerhafte Parameter im Bedienpult, Antriebe ohne Sollwerte oder keine Freigaben
- SPS-Logik-Fehler, fehlerhafte Verknüpfungen, Verriegelungen, Änderungen im Ablauf, fehlerhafte Merkeradressen

Die Suche und Beseitigung dieser Fehler quer durch das gesamte SPS-Projekt dauerte 5 Wochen. Unter Berücksichtigung von Arbeiten am Modell kann von ca. zwei Wochen Zeiteinsparung auf der Baustelle ausgegangen werden.

### 7.3.5 Qualitative Aufwand-Nutzen-Bewertung

Dem Nutzen einer reduzierten Inbetriebnahmezeit bzw. einer höheren Softwarequalität bei Inbetriebnahme steht der Aufwand des Modellaufbaus gegenüber. Im vorliegenden Projekt sind ca. 80 Menschtag auf die

Modellierung und 50 Menschstage auf die virtuelle Inbetriebnahme verwendet worden.

Mit diesem Aufwand konnten ca. zwei Wochen Inbetriebnahmezeit eingespart werden. Aus dem Projekt ist ersichtlich, dass der Modellierungsaufwand verkürzt werden muss, um den rentablen Bereich zu erreichen. Dies ist insbesondere dadurch möglich, dass vorhandene Modelle wieder verwendet bzw. diese mit einem geringen Mehraufwand erweitert werden. Eine Abschätzung des Potentials einer solchen virtuellen Inbetriebnahme ist aber schon jetzt möglich.

Dem reinen Zeitgewinn sind noch weitere, so genannte weiche Nutzenfaktoren in Form von Vertrauensgewinn beim Kunden und einer besseren Planbarkeit der Inbetriebnahme hinzuzurechnen. Darüber hinaus kann das Simulationsmodell genutzt werden, um z. B. den Teleservice zu unterstützen.

Aus einem Projekt-Rückblick mit Technikern der Inbetriebnahme geht hervor, dass die SPS-Software einen qualitativ höheren Stand hat als ohne VIBN üblich. Der Inbetriebnehmer konnte zudem 85% der Änderungen, die er auf der Baustelle noch vornehmen muss, anhand eines Code-Reviews tätigen. Er benötigte dazu ca. 4 Tage auf der Baustelle. Rückwirkend kann festgestellt werden, dass 13% dieser Fehler in der VIBN identifiziert werden konnten, aber aus Erfahrungsmangel nicht korrekt behoben werden konnten. 7% der Änderungen waren auf mechanische Änderungen auf der Baustelle zurückzuführen und konnten deshalb prinzipiell nicht durch eine VIBN beseitigt werden. Wiederum 13% der Änderungen hingen direkt mit dem Prozessgut zusammen und konnten systematisch nur in der realen IBN ausgeführt werden. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 71 dargestellt.

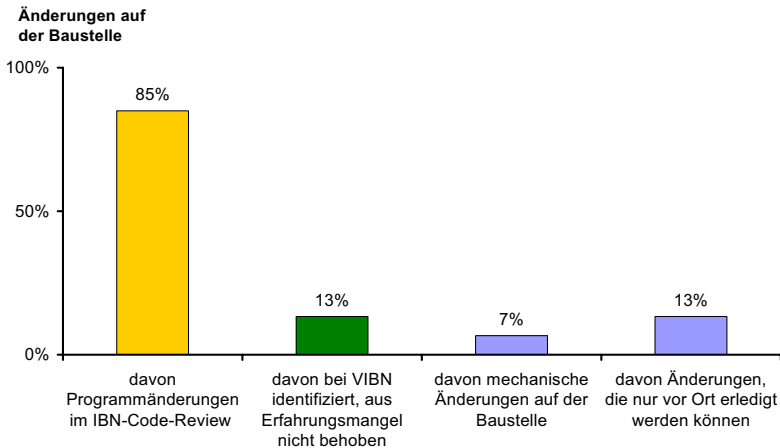


Abbildung 71: Ergebnis des IBN-Code-Reviews durch den Inbetriebnehmer auf der Baustelle einer Ziegelei (Quelle: APPEL 2006)

Aus dem Anwendungsbeispiel lassen sich für die Einführung einer VIBN in eine Organisation folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Erfahrung der Techniker mit der realen Anlagentechnik ist für die erfolgreiche Inbetriebnahme einer Anlage entscheidend. Der Erfahrungsrückfluss aus der Inbetriebnahme in die Elektrokonstruktion muss durch organisatorische Maßnahmen unterstützt werden.
- Die SPS-Software kann durch Code-Reviews vom Inbetriebnehmer vorab zu 85% korrigiert werden. Dadurch könnten im Fall dieser Anlage ca. 4 Tage auf der Baustelle eingespart werden.
- Da 13% der Änderungen auf der Baustelle auch in der VIBN als Fehler erkannt wurden, aber aufgrund des Erfahrungsmangels der Konstruktion mit der realen Anlagentechnik nicht korrekt behoben wurden, muss die VIBN von einem felderfahrenen Inbetriebnehmer durchgeführt werden, am besten von demselben Techniker, der die Anlage im Feld in Betrieb nehmen muss.
- Die Zahl der Änderungen, die nur auf der Baustelle vorgenommen werden können, beläuft sich lediglich auf 13%. Daraus lässt sich die Forderung ableiten, die Inbetriebnahmezeit durch Code-Reviews im Stammwerk und eine VIBN auf diesen Anteil abzusenken.

## 7.4 Umsetzer in der Endmontage

Die VIBN der Steuerungstechnik von Montageanlagen in der Automobilindustrie wird am Beispiel des Umsetzers in der Endmontage dargestellt. Die Logistikzelle dient dem Absetzen der fertig montierten Karosserien auf dem Endmontageband, auf dem letzte Montagearbeiten durchgeführt werden, bevor das Fahrzeug vom Band rollt.

### 7.4.1 Beschreibung

Dem Umsetzer vorgelagert findet die Montage von Ober- und Unterbau der herzustellenden Fahrzeugtypen statt, was auch als „Hochzeit“ bezeichnet wird. Die Karossen werden auf C-Gehängen einer Elektrohängebahn (EHB) an die Umsetzstation herangeführt. Der Umsetzer dient dazu, die verschiedenen Karosstypen aus der EHB zu übernehmen und im Fließbetrieb auf das Plattenband abzusetzen. Beim Einfördern ist jeweils ein minimaler Quetschabstand zwischen den Fahrzeugen gewährleistet, um Verletzungen von Werkern auszuschließen. Auf dem Plattenband wird anschließend die Medienbefüllung der Fahrzeuge durchgeführt. Dazu gehören z.B. die Betankung mit Kraftstoff oder die Einleitung von Bremsflüssigkeit.

Den Aufbau der Umsetzstation zeigt Abbildung 72. Sie besteht aus zwei Hubtischen (HT), auf denen jeweils zwei Verschiebeschlitten (VS) montiert sind. Auf jedem Verschiebeschlitten ist wiederum jeweils eine Hubgabel (HG) angebracht.

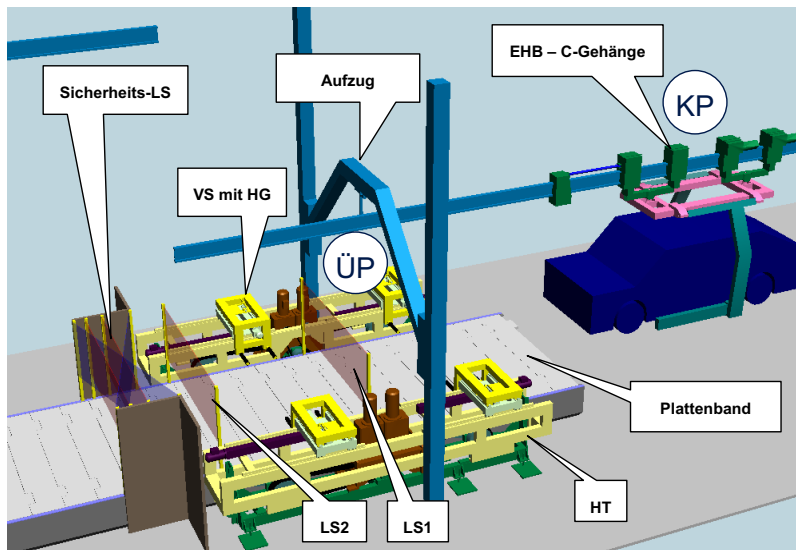


Abbildung 72: Modell des Umsetzers mit Elektrohängebahn und Plattenband in der Endmontage eines Automobilwerkes

Die Hubbewegung wird dazu benötigt, die Fahrzeuge aus dem Gehänge zu heben. Im Fließbetrieb dienen die VS der Einstellung des Achsabstandes der unterschiedlichen Karossen sowie zu deren Übergabe auf das Plattenband. Die HG können auf die Spurbreite des aufzunehmenden Fahrzeugs eingestellt werden. Die Regelung der Antriebe der HT und der VS erfolgt frequenzgesteuert, d.h. die Geschwindigkeiten können stufenlos eingestellt werden, während die HG unregelt mit einer festen Frequenz angetrieben werden.

Wenn die Lichtschranken eine freie Zelle melden, wird ein Umsetzvorgang durch das Einfördern einer Karosserie im C-Gehänge auf der EHB eingeleitet. Nach Einlesen des Fahrzeugtyps wird der Umsetzer auf die Dimensionen eingestellt und hebt mit den Hubgabeln das Fahrzeug aus dem C-Gehänge. Nachdem dieses gespreizt worden ist, wird es durch den Aufzug nach oben abtransportiert. Der Umsetzer senkt das Fahrzeug bis kurz vor Aufsetzen auf dem Plattenband ab und leitet die Synchronisation der Geschwindigkeiten ein. Laufen Plattenband und Verschiebeschlitten in derselben Geschwindigkeit, so wird das Fahrzeug abgesetzt.

Das Plattenband fördert die Karossen weiter durch die Sicherheitslichtschranken zu den Befüllanlagen, wo sie im Fließbetrieb befüllt werden.

Dabei werden die jeweiligen Daten mit der Karosse mitgeführt und beim Erreichen der Befüllanlage an diese übergeben. Die Sicherheitslichtschranken setzen die Anlage still, falls Personal den Umsetzbereich betritt.

### **7.4.2 Steuerungs- und Automatisierungstechnik**

Die Steuerung der Anlage wird mit einer leistungsfähigen SPS mit zwei Feldebussystemen realisiert. Das eine Feldebussystem dient der Ansteuerung und dem Auslesen der E/A-Peripherie, während über das andere Daten mit den Anzeige- und Bediengeräten ausgetauscht werden. Da die Umsetzstation für Werker auf dem Endmontageband frei zugänglich ist, kommt der Sicherheitstechnik in der Anlage eine hohe Bedeutung zu. Deshalb ist zusätzlich zur Ablauf- und Verriegelungssteuerung eine Sicherheitsschicht in Form einer Sicherheits-SPS in die Anlage integriert. Diese stellt mit Hilfe eines umfangreichen Lichtschranken- und Not-Aus-Kreises sicher, dass in Gefahrensituationen die Antriebe gestoppt werden.

### **7.4.3 Eingesetzte VIBN-Technologie**

Das Ziel des Projektes war es, die Machbarkeit einer VIBN für den vorliegenden Anlagen- und Steuerungstyp nachzuweisen. Die Herausforderung bestand dabei in zwei wesentlichen Punkten: Zum einen musste die Sicherheits-SPS in die Testumgebung eingebunden werden, zum anderen waren mehr als 1200 E/A-Signale in der Simulation in Echtzeit zu bedienen. Die Sicherheitstechnik wird über spezielle Sicherheitsperipheriemodule über einen redundanten Sicherheitsbus ausgelesen bzw. angesteuert.

Aus rechtlichen Gründen gibt es derzeit keine auf dem Markt verfügbare PC-Schnittstellenkarte für das Sicherheitsbussystem. Deshalb müssen die Signale des Sicherheitssystems auf einem Umweg mit der Simulation verbunden werden. Dazu werden diese in der Sicherheits-SPS von dem Anschluss am Sicherheitsbus auf eine Adresse am Feldebuss umgeleitet und über diesen mit der Simulation ausgetauscht.

Der Vorteil liegt dabei in der Möglichkeit, bei der VIBN die Logik der Sicherheits-SPS im Zusammenspiel mit der Zellen-SPS zu testen, der Nachteil in einem notwendigen Eingriff in das Kommunikationssystem der Zelle.

### 7.4.4 Umfang der durchgeführten VIBN

Als Ergebnis des Modellaufbaus liegt eine funktionsfähige Hardware-in-the-Loop-Simulation des Umsetzers vor (ZÄH et al. 2004d). Damit kann durch das Aktivieren von Signalen, wie z.B. von Not-Aus-Schaltern oder unterbrochenen Lichtschranken, das Anlagenverhalten unter realen Bedingungen getestet werden. Es können somit alle Ereignisse, die beim Betreiben der realen Anlage auftreten, auf korrekte Steuerungsreaktion durch die Zellen-SPS und die Sicherheits-SPS getestet werden. Weiterhin ist es möglich, alle Achsen des Umsetzers und des Plattenbandes mit Hilfe der realen Bedienterminals im Handbetrieb anzusteuern. Im Automatikbetrieb kann die benötigte Taktzeit und der eingestellte Taktabstand für die beim Fahrzeughersteller übliche Bandbreite überprüft werden. Bei einem Vergleich der Simulation mit den Ergebnissen eines Leistungstests wurde festgestellt, dass sich die Simulation in hohem Maße dem Verhalten der Originalanlage annähert.

### 7.4.5 Qualitative Aufwand-Nutzen-Bewertung

Der Zeitaufwand für den Modellaufbau umfasste 48 Manntage und für die VIBN 25 Manntage. Beim Modellaufbau ist zu berücksichtigen, dass dieser für zukünftige Projekte bei Wiederverwendung von Modellteilen deutlich niedriger ausfallen wird. Zusätzlich zu den Personalkosten von etwa 44.000 Euro ergaben sich Kosten durch die Investition in die Simulationstechnologie von ca. 10.000 bis 20.000 Euro und die früher erfolgende Lieferung der Steuerungstechnik.

Die Hardware-in-the-Loop-Simulation bildet alle wesentlichen Komponenten der Originalanlage realitätsgetreu nach. Das simulierte Anlagenverhalten entspricht dem realen Vorbild, weshalb Optimierungsmaßnahmen an der Simulation ein hohes Maß an Übertragbarkeit auf die reale Anlage aufweisen. Durch die Anbindung des originalen Human-Machine-Interface und die verständliche Anordnung der Kommunikationsstrukturen findet eine Hardware-in-the-Loop-Simulation eine wesentlich höhere Akzeptanz bei den an der Entwicklung beteiligten Personen, als eine weniger transparente Software-in-the-Loop-Lösung.

Die Einsparungen von Test- und Inbetriebnahmezeit auf der Baustelle betragen maximal 25 Menschtage, also ca. fünf Wochen Baustelleninbetriebnahme.

Dabei ergeben sich neben der VIBN weitere Einsatzszenarien als Projektmeilenstein mit einem Nachweis erbrachter Funktionalität in der Steuerungssoftware, für die Schulung des Personals, für eine Taktzeitoptimierung parallel zum laufenden Betrieb oder zur Ableitung von kon-



strukturellen und steuerungstechnischen Maßnahmen zur Leistungssteigerung. Auch die Umrüstung bestehender Anlagen auf neue Steuerungstechnik kann durch die Erprobung am virtuellen Modell parallel zur laufenden Produktion vorbereitet werden (Zäh et al. 2004c).

## 7.5 Zusammenfassende Bewertung

In diesem Abschnitt wird für die Anwendungsbeispiele mit Hilfe der in Kapitel 5 entwickelten Methode die Wirtschaftlichkeit abgeschätzt. Dazu wird für die Ermittlung des Aufwands die Anzahl der zu modellierenden Ein- und Ausgänge nach Gleichung 1 herangezogen. Tabelle 28 zeigt die Messgrößen des Referenzprojektes und der Anwendungsbeispiele in Form einer Tabelle.

Anwendungsbeispiele		Zahl der Ein- und Ausgabevariablen $Z_{E/A,i}$	Projektgröße (in fiktiver Währung) $G_i$	Bedeutung $B_i$	Anteil der Steuerungstechnik $S_i$
7.1	Werkzeugmaschine	170	100	50%	25%
7.2	Komplexe Großanlage	2000	700	100%	30%
7.3	Fördertechnikzelle	903	300	100%	45%
7.4	Umsetzer Endmontage	1150	200	100%	30%

Tabelle 28: Messgrößen für die Anwendungsbeispiele der Arbeit

Nach Unterabschnitt 5.3.4 können aus den Kenngrößen jeweils die Bewertungsgrößen errechnet werden, nämlich der spezifische Aufwand  $\underline{A}_i$ , der spezifische Nutzen  $\underline{N}_i$  und die spezifische Rentabilität  $\underline{R}_i$  errechnet werden. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 29 aufgeführt und in dem Wirtschaftlichkeitsportfolio in Abbildung 73 graphisch dargestellt.

## 7 Anwendung auf Projektbeispiele

Anwendungsbeispiele	spezifischer Aufwand $A_i$	spezifischer Nutzen $N_i$	spezifische Rentabilität $R_i$
7.1 Werkzeugmaschine	170	13	0,074
7.2 Komplexe Großanlage	2000	210	0,105
7.3 Fördertechnikzelle	903	135	0,150
7.4 Umsetzer Endmontage	1150	60	0,052

Tabelle 29: Kenngrößen spezifischer Aufwand, spezifischer Nutzen und spezifische Rentabilität für die Anwendungsbeispiele

Aus dem Wirtschaftlichkeitsportfolio lässt sich im Sinne einer Entscheidungsfindung vor Projektdurchführung eine Rangfolge bezüglich der Rentabilität ablesen. Demnach ist eine VIBN der Fördertechnikzelle am lohnendsten, gefolgt von der komplexen Großanlage, der Werkzeugmaschine und schließlich dem Umsetzer als dem Projekt mit der geringsten Rentabilität. Zusätzlich kann eine Reihenfolge für den Aufwand bzw. die Modellierungskomplexität beispielsweise für ein Einführungsverfahren gebildet werden. Demnach wäre die Werkzeugmaschine das VIBN-Projekt mit dem geringsten Aufwand, die Fördertechnikzelle und der Umsetzer im Mittelfeld, während die komplexe Großanlage den höchsten Aufwand bei der Modellierung verursachen würde.

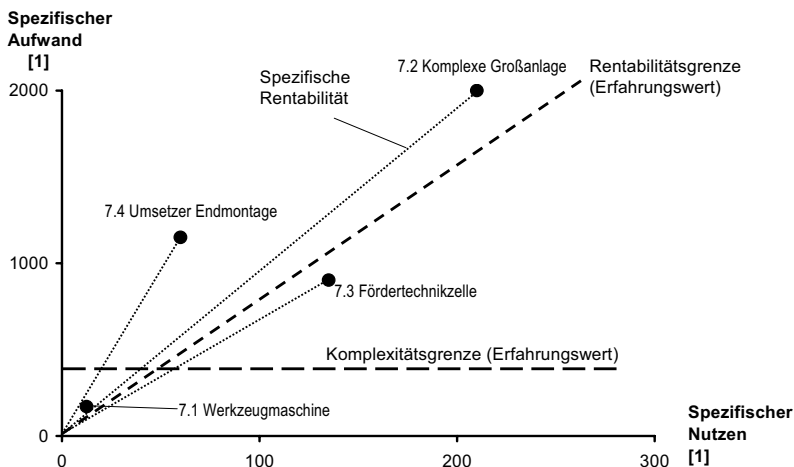


Abbildung 73: Wirtschaftlichkeitsportfolio für die Anwendungsbeispiele der Arbeit mit der angedeuteten Rentabilitäts- und der Komplexitätsgrenze (basierend auf Erfahrungswerten)

## 8 Fazit

In diesem Kapitel wird die vorliegende Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick für künftige Forschungsarbeiten gegeben.

### 8.1 Zusammenfassung

In der Einleitung ist die Ausgangssituation des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus und die steigende Bedeutung eines reibungslosen Anlaufes von Anlagen ausgeführt: Durch den starken weltweiten Wettbewerb, der infolge der Globalisierung, d. h. aufgrund der hohen Beweglichkeit von Menschen, Waren und vor allem Informationen, entsteht, führen verkürzte Produktlebenszyklen zu einer wachsenden Bedeutung des Produktionsanlaufs, der seinerseits aus Inbetriebnahme und Hochlauf besteht. In immer höherem Maße wird eine Verkürzung von Inbetriebnahme und Hochlauf als ein Mittel zum Erfolg gesehen. Wissenschaftliche Untersuchungen ergeben einen hohen Einfluss der Betriebsmittel auf Verzögerungen in Inbetriebnahme und Anlauf.

Davon ausgehend wurde der Handlungsbedarf für die Inbetriebnahme herausgearbeitet und die Ziele der Arbeit abgeleitet. Geeignete Maßnahmen aus Sicht der Ingenieurwissenschaft stellen das Concurrent Engineering insbesondere mit einer konsistenten, parallelisierten Entwicklung mechatronisch hochgradig integrierter Systeme dar. Dies kann durch die realistische Simulation der noch nicht verfügbaren Mechanik und Elektrik mittels Software erfolgen, indem Steuerungsfunktionen frühzeitig in einer virtuellen Inbetriebnahme geprüft werden. Zwar gibt es zahlreiche Ansätze der virtuellen Inbetriebnahme, allerdings existiert derzeit kein Vorgehen zur Einführung der virtuellen Inbetriebnahme in die unternehmerische Praxis. Diese Arbeit verfolgt drei Ziele, nämlich ein an die individuelle Situation eines Unternehmens anpassbares Einführungsvorgehen, eine Methode zur wirtschaftlichen Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme und eine Methode zur Auslegung der Ausrüstung für eine virtuelle Inbetriebnahme (VIBN). Das Vorgehen der Arbeit gliedert sich analog der Zielsetzung in folgende Kapitel:

- > **Kapitel 1:** Einleitung
- > **Kapitel 2:** Grundlagen
- > **Kapitel 3:** Stand der Technik
- > **Kapitel 4:** Einführung in eine Organisation
- > **Kapitel 5:** Wirtschaftliche Skalierung

> **Kapitel 6:** Technologien für die Modellbildung

> **Kapitel 7:** Anwendung auf Projektbeispiele

Nach der Einleitung in Kapitel 1 erläutert Kapitel 2 für das Verständnis wichtige Begriffsdefinitionen aus den Bereichen Produktion, Qualitätssicherung und Steuerungstechnik.

In Kapitel 3 ist der Stand der Technik der virtuellen Inbetriebnahme aufgezeigt. Dazu werden zunächst für das Verständnis wichtige Grundlagen wie das Prinzip einer virtuellen Zeitachse, die Betrachtung der minimalen Abstrakte und der Begriff der Echtzeitfähigkeit erklärt. In einem weiteren Abschnitt werden bekannte Maßnahmen zur Qualitätssicherung bei der Inbetriebnahme beschrieben. Dazu zählen neben organisatorischen Maßnahmen die Standardisierung im Entwicklungsprozess, die Vorabinbetriebnahme von Teilsystemen und der Test von Steuerungssoftware. Ein weiterer Abschnitt stellt die Ansätze der virtuellen Inbetriebnahme dar und erläutert das allgemeingültige Grundprinzip. Im Weiteren sind die Ansätze mit rein virtueller Zeitachse sowie die Echtzeitansätze, gegliedert nach Prozessebene, Maschinenebene, Zellen- und Anlagenebene, aufgeführt.

In Kapitel 4 wird ein allgemeines Einführungsvorgehen ausgeführt. Dazu werden zunächst Anforderungen an eine Organisation dargestellt, die für eine wirtschaftliche VIBN erfüllt sein müssen. Basierend darauf wird ein Einführungsfahrplan entwickelt, der den Weg zur VIBN skizziert. Mit Hilfe eines Assessments zur Bestimmung des Reifegrades kann die eigene Position auf diesem „Fahrplan“ bestimmt werden, um konkrete Maßnahmen abzuleiten. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion der organisatorischen Einordnung einer VIBN-Abteilung in ein Unternehmen bzw. ein Unternehmensnetzwerk. Mit Hilfe dieses Kapitels kann ein Unternehmen seinen Entwicklungsstand auf dem Weg zu einer effektiven virtuellen Inbetriebnahme selbst bestimmen und die erforderlichen Schritte ableiten.

In Kapitel 5 wird die Arbeit um eine Methode für die wirtschaftliche Bewertung der virtuellen Inbetriebnahme auf Projektebene erweitert. Sie ermöglicht es einem Maschinenbauunternehmen, die VIBN projektbezogen derart zu skalieren, dass ein maximaler wirtschaftlicher Nutzen generiert wird. Dazu muss die Methode das Dilemma umgehen, dass prinzipiell weder vor noch nach Projektdurchführung der tatsächliche wirtschaftliche Nutzen einer virtuellen Inbetriebnahme exakt und verlässlich ermittelt werden kann. Dies resultiert aus der Tatsache, dass jedem Maschinenbauprojekt individuelle organisatorische, technische und personelle Randbedingungen zugrunde liegen. Dadurch ist ein Vergleich der Auftragsabwicklung mit und ohne VIBN hinsichtlich der Wirtschaftsgrößen Zeiteinsparung, Qualitätssteigerung und Kostenreduktion generell

unmöglich. Da also der Nutzen nicht exakt messbar ist, kann nur eine relative Methode angewandt werden, die den potentiellen Nutzen von VIBN-Projekten zueinander vergleichbar macht.

Das Ziel hierbei ist es, eine einfache Handhabung der Methode zu erreichen. Deshalb basiert die Methode auf Kenngrößen, die vor Projektdurchführung bekannt sind und einfach ermittelt werden können. Hierzu wurde ein bekanntes Bewertungsverfahren aus der Betriebswissenschaft an die Bedürfnisse und Gegebenheiten der VIBN angepasst. Die Methode wird zunächst anhand eines fiktiven Beispiels erklärt und später auf die Anwendungsbeispiele aus Kapitel 7 angewandt. Die Umsetzung kann mit Standardsoftware erfolgen und das Ergebnis der Bewertung wird grafisch dargestellt. Außerdem ergeben sich durch die vor die VIBN-Bewertung geschaltete Projekteinteilungsmethode Synergieeffekte, wie eine Verbesserung der Systemkenntnis, die Bildung von VIBN-Alternativen und eine Standardisierung des VIBN-Prozesses selbst.

Damit steht für die Projektabwicklung erstmals ein Werkzeug zur Verfügung, das es ermöglicht, vor Projektbeginn abzuschätzen, welche Anlagenteile aus wirtschaftlicher Sicht mittels VIBN auf die reale Inbetriebnahme vorbereitet werden sollten und welche nicht.

Im sechsten Kapitel wird die technologische Ausführung einer VIBN-Abteilung anhand eines Technologiebaukastens erläutert, der es erlaubt, ausgehend von geschäftsabhängigen Anforderungen und einer generischen Funktionsstruktur die auf das Geschäftsportfolio abgestimmten Ausprägungen einer VIBN-Abteilung zu bestimmen. Dazu ist für die generischen Elemente Automatisierungstechnik, Schnittstellen, Simulationssystem, Modell sowie Modellerstellungs- und Inbetriebnahmeprozess jeweils die Bandbreite an technologischen Lösungen aufgeführt. Das Kapitel schließt mit einem Lösungsbaukasten für eine Simulationsumgebung. Das Neue an dieser systematisierten Aufbereitung der verfügbaren Ansätze ist die Verwendbarkeit als Grundlage zur individuellen Konzeptionierung der technischen Ausrüstung einer VIBN-Abteilung. Anhand dieses Kapitels können die umsetzenden Organisationseinheiten im Unternehmen die zur bearbeiteten Produktionstechnik passende Simulationstechnik bestimmen und gezielt aufbauen.

In Kapitel 7 sind unterschiedliche Umsetzungen der Simulationstechnik anhand von Anwendungsbeispielen erklärt. Die Beispiele decken weite Bereiche der Produktionstechnik ab, indem eine Werkzeugmaschine, eine komplexe Großanlage, eine Fördertechnikzelle, eine Rohbauzelle und eine Logistikzelle aus der Endmontage mit den technischen Lösungen skizziert werden. Jedes Beispiel ist mit der zu testenden Steuerungs- und Automatisierungstechnik, der eingesetzten VIBN-Technologie sowie nach dem

Umfang der durchgeführten VIBN-Tätigkeiten beschrieben. Abschließend erfolgt jeweils eine qualitative Aufwand-Nutzen-Bewertung.

### 8.2 Ausblick

Auf dem Gebiet der virtuellen Inbetriebnahme gibt es derzeit zahlreiche Lösungsanbieter sowohl aus dem professionellen Umfeld der Digitalen Fabrik als auch aus dem universitären Umfeld. Es ist eine Konsolidierung durch die Bildung von Standards oder Quasistandards mit der Etablierung einiger weniger Marktführer zu erwarten. Dabei bestehen gute Chancen für kleine, spezialisierte Anbieter, da die Lösungen großer Anbieter erhebliche Schwachstellen aufweisen.

Zum einen wird durch die meisten Simulationssysteme das Abtasttheorem verletzt, was dazu führt, dass bei einem Ablauffehler im Test unklar bleibt, ob dieser im Modell oder tatsächlich in der Steuerung begründet ist. Damit wird eine gewisse Ernüchterung bezüglich der zu erreichenden Vorteile durch eine VIBN einhergehen, da nicht gesichert ist, wie hoch die realisierbaren Zeit- und Qualitätsvorteile sind. Deshalb ist eine weitere Verschärfung der Anforderungen an die Systeme zu erwarten.

Eine andere Stoßrichtung der Forschung liegt in der Modellbildung der Anlagenperipherie, die durch die Anbieter von 3D-Planungswerkzeugen und die Steuerungshersteller hinsichtlich der Abbildung der Fluidik, Elektrik und Sicherheitstechnik vernachlässigt wird. Auf diesem Gebiet sind Entwicklungen zu erwarten, in denen Installationsplanungswerkzeuge eine wichtige Rolle spielen werden.

Dabei muss der Aufwand der Modellerstellung, sei es manuell bzw. auf digitalen Standards basierend, deutlich reduziert werden. Wirtschaftliche Vorteile der VIBN werden durch den Aufwand der Modellerstellung teilweise oder vollständig aufgebraucht und es ist gleichzeitig ein präzises Projektmanagement erforderlich, um die Vorteile der VIBN zu realisieren. Eine automatisierte Modellerstellung aus Entwicklungsunterlagen bzw. -datenbanken kann hier Abhilfe schaffen.

Ggf. wird für die VIBN eine neue Begriffsbildung stattfinden müssen, um den verschärften Anforderungen Gewicht zu verleihen. Vergleichbares ist mit Ansätzen aus der rechnerintegrierten Produktion der 90er Jahre passiert, die um die Jahrtausendwende unter dem Begriff „Virtuelle Produktion“ geführt wurden und derzeit in der „Digitalen Fabrik“ aufgehen.

Generell ist dabei die Offenheit der Werkzeuge sehr wichtig, damit die Ingenieure als Mitglieder einer lernenden Organisation ihre Werkzeuge stetig anpassen und mitgestalten können. Dazu werden auch bei den An-

lagenherstellern gut ausgebildete Entwickler und Techniker benötigt, die sich schnell an neue Werkzeuge gewöhnen und die selbst neue Anforderungen an diese Werkzeuge stellen.

Die entwickelte Methodik für die Einführung in ein Unternehmen bzw. für das Projektmanagement wurde zwar anhand verschiedenster Beispiele evaluiert, allerdings steht eine konkrete Erprobung im Feldversuch aus.

Um VIBN-Neueinführungen zu unterstützen, sollte die Projektmanagementmethode speziell auf die Auswahl von Pilotprojekten adaptiert werden. Da VIBN-Neueinführungen meist gestützt auf erfahrene Ingenieure abgewickelt werden, kann die Methode so von Anfang an als Standardentscheidungshilfe in den VIBN-Prozess integriert werden.





---

## 9 Literatur

ALBERT 1998

Albert, J.: Software-Architektur für virtuelle Maschinen. Diss. Technische Universität München (1998). München: Utz 1998. (Informationstechnik im Maschinenwesen 25).

ALBERT & TOMASZUNAS 1998

Albert, J.; Tomaszunas, J.: Rapid Prototyping von speicherprogrammierbaren Steuerungen an virtuellen Maschinen. *Industrie Management* 14 (1998) 5, S. 36-40.

AMANN 1994

Amann, W.: Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen. Diss. Technische Universität München (1994). Berlin, Heidelberg: Springer 1994. (*iwb* Forschungsberichte 71).

APPEL 2006

Appel, F.: Die virtuelle Inbetriebnahme im Anlagenbau - ein Erfahrungsbericht. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?, Garching. München: Utz 2006, S. 1-20. (Seminarberichte *iwb* 84).

BÄR & HAASIS 2003

Bär, T.; Haasis, S.: Steps towards the Digital Factory. 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. Saarbrücken, 03.-05. Juni 2003.

BAUDISCH 2001

Baudisch, T.: Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine. Diss. Technische Universität München (2001). München: Utz 2001. (Forschungsberichte *iwb* 179).

BAUMANN & LOOSCHELDERS 1982

Baumann, H. G.; Looschelders, K. H.: Systematisches Projektieren und Konstruieren : Grundlagen und Regeln für Studium und Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer 1982.

BENDER 1999

Bender, K.: Echtzeitsimulation zum Test von Maschinensteuerungen. München: Utz, 1999.

### BENDER & KAISER 1995

Bender, K.; Kaiser, O.: Simultaneous Engineering durch Maschinenemulation. *CIM Management* 11 (1995) 4, S. 14-18.

### BENDER et al. 1996

Bender, K.; Kaiser, O.; Tomaszunas, J.: SPS-Softwaretest an virtuellen Maschinen. In: Schraft, R. D. et al. (Hrsg.): *SPS/IPC/Drives '96*. Sindelfingen: VDE-Verlag 1996.

### BERGER 2005

Berger, A.: Virtuelle Inbetriebnahme eines Bearbeitungszentrums. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): *Mechatronik - Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen*, Garching. München: Utz 2005. (Seminarberichte *iwb* 78).

### BREITENBACH & SCHWAB 2004

Breitenbach, F.; Schwab, J.: Funktions- und unternehmensübergreifende Zusammenarbeit bei Produktionsanläufen. In: *Karlsruher Arbeitsgespräche Produktionsforschung 2004*. Karlsruhe, 11.-12. März 2004, S. 46 - 65.

### BROOS 2005

Broos, A.: SIMCAT 2005. <<http://www.simcat.org>>

### CHMIELNICKI 1985

Chmielnicki, S.: Flexible Fertigungssysteme: Simulation der Prozesse als Hilfsmittel zur Planung und zum Test von Steuerprogrammen. Diss. Universität Stuttgart (1985). Berlin, Heidelberg: Springer 1985. (ISW Forschung und Praxis 57).

### CUIPER 2000

Cuiper, R.: Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen. Diss. Technische Universität München (2000). München: Utz 2000. (Forschungsberichte *iwb* 143).

### DALLINGER et al. 2006

Dallinger, G.; Datenreport 2006 : Zahlen und Fakten über die Bundesrepublik Deutschland. Bonn 2006. (Schriftenreihe der Bundeszentrale für politische Bildung 544).

### DASSAULT SYSTÈMES 2005

Dassault Systèmes: Delmia V5 Automation. 2005.

---

DENKENA et al. 2005

Denkena, B.; Tracht, K.; Rehling, S.: Concept for a comprehensive operator training based on an interactive machine tool simulation model. In: Reinhart, G.; Zäh, M. F. (Hrsg.): CARV 05. 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production, Garching, 22.-23.09.2005. München: Utz 2005.

DENKENA et al. 2001

Denkena, B.; Liu, Z.; Volkwein, G.; Gose, H.; Baudisch, T.; Landwehr, R.: Konzeption einer integrierten Werkzeugmaschinen-Simulationsumgebung. In: Krause, F.-L. et al. (Hrsg.): Fortschrittsbericht zum Leitprojekt integrierte Virtuelle Produktentstehung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2001, S. 135 - 140.

DIERSSEN 2002

Dierßen, S.: Systemkopplung zur komponentenorientierten Simulation digitaler Produkte. Diss. ETH Zürich (2002). Düsseldorf: VDI Verlag 2002. (Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Nr. 358).

DIETRICH et al. 2002

Dietrich, U.; Schulz, T.; Yaramanoglu, N.: Bringing Real and Virtual Worlds Together in the Manufacturing Process. Journal of Advanced Manufacturing 1 (2002) 1, S. 51- 65.

DIN 19246 1991

DIN 19246: Abwicklung von Projekten - Begriffe, Berlin: Beuth 1991.

DIN 32541 1977

DIN 32541: Betreiben von Maschinen und vergleichbaren technischen Arbeitsmitteln: Begriffe für Tätigkeiten, Berlin: Beuth 1977.

DIN EN 61131-3 2003

DIN EN 61131-3: Speicherprogrammierbare Steuerungen - Teil 3: Programmiersprachen, Berlin: Beuth 2003.

ENGESSER & CLAUS 1993

Engesser, H.; Claus, V.: Duden Informatik: ein Sachlexikon für Studium und Praxis. Mannheim [u.a.]: Dudenverlag 1993.

EVERSHEIM et al. 1990a

Eversheim, W.; Koerth, D.; Gentzcke, J.: Inbetriebnahme komplexer Maschinen und Anlagen: Strategien und Praxisbeispiele zur Rationalisierung in der Einzel- und Kleinserienproduktion. Düsseldorf: VDI Verlag 1990.

**EVERSHEIM 1990b**

Eversheim, W.: Die Inbetriebnahme komplexer Produkte in der Einzel- und Kleinserienfertigung. In: VDI (Hrsg.): Inbetriebnahme komplexer Maschinen und Anlagen. Tagung Frankfurt, 28. Juni 1990. Düsseldorf: VDI Verlag 1990, S. 1-26. (VDI-Berichte 831).

**EVERSHEIM 2002**

Eversheim, W.: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik: Aachener Perspektiven. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium. Aachen 6. bis 7. Juni 2002.

**EVERSHEIM & SOSENHEIMER 1987**

Eversheim, W.; Sossenheimer, K.: Flächenorientierte Termin- und Kapazitätsplanung in der Montage. VDI-Z 129 (1987) 5, S. 82-86.

**EVERSHEIM & SCHUH 1996**

Eversheim, W.; Schuh, G.: Produktion und Management. Betriebs-hütte. Berlin [u.a.]: Springer 1996.

**FRANKLIN 1748**

Franklin, B.: Advice to a young tradesman. Philadelphia: Printed by Daniel Humphreys 1748.

**FREUND et al. 2000**

Freund, E.; Hypki, A.; Pensky, D.: Innovative Systeme zur durchgängigen Simulation und Steuerung robotergestützter Arbeitszellen. In: VDI (Hrsg.): Robotik 2000. Berlin: 2000, S. 127-132. (VDI-Berichte 1552).

**FRITSCHKE 1998**

Fritsche, R.: Bewertung und Verkürzung von Anlaufprozessen für Betriebsmittel. Diss. Technische Universität Berlin (1998). Berlin: 1998. (Berichte aus dem PTZ Berlin).

**FRÜHAUF 1990**

Frühau, K.: Die ältesten Fehler sind die teuersten. Technische Rundschau (1990) 28, S. 32-36.

**GENTZCKE 1990**

Gentzcke, J.: Vorabprüfung und Vorab-Inbetriebnahme von Bau-gruppen - Praxisbeispiele. In: VDI (Hrsg.): Inbetriebnahme komplexer Maschinen und Anlagen. Tagung Frankfurt, 28. Juni 1990. Düsseldorf: VDI Verlag 1990, S. 49-70. (VDI-Berichte 831).

---

GLAS 1993

Glas, J.: Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellen-rechnersoftware. Diss. Technische Universität München (1993). Berlin, Heidelberg: Springer 1993. (*iwb* Forschungsberichte 61).

GORBATSCHOW 1989

Gorbatschow, M.: 40-Jahr-Feier der DDR. DDR-Fernsehen 1989.

GRÄTZ 2006

Grätz, F.: Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme. Diss. Technische Universität München (2006). München: Utz 2006. (Forschungsberichte *iwb* 200).

GRIMM 1995

Grimm, K.: Systematisches Testen von Software : eine neue Methode und eine effektive Teststrategie. Diss. Technische Universität Berlin (1995). München [u.a.]: Oldenbourg 1995. (GMD-Berichte 251).

HAMM & MENZEL 2004

Hamm, C.; Menzel, T.: Produktivitätssteigerung durch Simulation. In: Steuerungstechnisches Forum `04 - Mit den Schwerpunkten Motion Control und Virtuelle Maschine. Stuttgart: Selbstverlag FISW GmbH 2004, S. 1-14.

HEINRICH & WORTMANN 2004

Heinrich, S.; Wortmann, D.: Virtuelle Inbetriebnahme: Entwicklung von Layout- und Steuerungskonzepten mit Hilfe von Simulation. In: 2. Symposium "Digitale Fabrik", 24. Juni 2004. Leipzig: 2004, S. 1-20.

KAISER 1999

Kaiser, O.: Echtzeitanforderungen zur Simulation technischer Produkte. Diss. Technische Universität München (1999). München: Utz 1999. (Informationstechnik im Maschinenwesen 27).

KOÇ et al. 2002

Koç, A.; Xu, L.; Hansen, J.: Entwicklungsprozesse bewerten: Wirtschaftlichkeitsabschätzung beim Simultaneous Engineering. Qualität & Zuverlässigkeit 47 (2002) 1, S. 30-32.

KOERTH 1990

Koerth, D.: Inbetriebnahmegerechte Produkt- und Prüfstandgestaltung. In: VDI (Hrsg.): Inbetriebnahme komplexer Maschinen und Anlagen. Tagung Frankfurt, 28. Juni 1990. Düsseldorf: VDI Verlag 1990, S. 27-47. (VDI-Berichte 831).

### KOHEN 1990

Kohen, E.: Informationsverarbeitung in FSS; Information Management in flexible Manufacturing Systems (FMS). In: VDI (Hrsg.): Rechnerintegrierte Konstruktion und Produktion. Düsseldorf: 1990, S. 263-280. (VDI-Berichte 830).

### KOHRING 1993

Kohring, A.: Systematisches Projektieren und Testen von Steuerungssoftware für Werkzeugmaschinen. Diss. RWTH Aachen (1993). Aachen: Shaker 1993. (Berichte aus der Produktionstechnik 13).

### KRANZ 1995

Kranz, M.: Flexibles und offenes Prüfkonzept für Maschinenprototypen. Diss. Technische Universität München (1995). Düsseldorf: VDI Verlag 1995. (Informationstechnik im Maschinenwesen 15).

### KUHN 2002

Kuhn, A.: Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten. Dortmund: Verlag Praxiswissen 2002.

### LANZA 2005

Lanza, G.: Simulationsbasierte Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen. Diss. Universität (TH) Karlsruhe (2005). Karlsruhe: wbk 2005. (Forschungsberichte aus dem wbk 127).

### LITTO 2004

Litto, M.: Föederal. informations-architektur.  
<<http://www.foederal.de/>> - 20.12.2005.

### LITTO & LEVEK 2005

Litto, M.; Levek: Interdisziplinäres, funktionales Engineering konventioneller Maschinen und Anlagen. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): 3. Workshop „Intelligente mechatronische Systeme“, Paderborn. 2005, S. 101-112.

### MAUDERER 1996

Mauderer, M.: Dezentralisierung - Entwicklungstendenzen im Maschinenbau. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme. München: Utz 1996, S. 8-20. (Seminarberichte *iwb* 20).

---

**MEIER & KREUSCH 2000**

Meier, H.; Kreusch, K.: Virtuelle Maschinen für eine realistische Simulation. *wt Werkstatttechnik Jahrgang 90 (2000) 1/2*, S. 19-21.

**MEWES 2004**

Mewes, J.: WinMOD für den Maschinen- und Anlagenbau. Hennigsdorf: Mewes 2004.

**MEWES 2005a**

Mewes, J.: Virtuelle Inbetriebnahme mit realen Automatisierungssystemen und virtuellen Maschinen. Hennigsdorf: Mewes 2005.

**MEWES 2005b**

Mewes, J.: WinMOD für Materialfluss, Transport und Logistik. Hennigsdorf: Mewes 2005.

**MEWES & SCHUBERT 2004**

Mewes, J.; Schubert, T.: Simulation im Umbruch. *Computer & AUTOMATION 6 (2004) 11*, S. 56-61.

**MILBERG 1992**

Milberg, J.: Von CAD/CAM zu CIM: Leitfaden zum Erfolg. Berlin [u.a.]: Springer 1992. (CIM-Fachmann).

**MILBERG 2002**

Milberg, J.: Erfolg in Netzwerken. 1. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer 2002.

**MILBERG 2004**

Milberg, J.: Grenzen überwinden – Wachstum durch Innovation. München: Utz 2004.

**MILBERG et al. 1992b**

Milberg, J.; Amann, W.; Raith, P.: Beschleunigte Inbetriebnahme von Produktionsanlagen durch getestete Ablaufvorschriften. *VDI-Z 134 (1992b) 2*, S. 32-37.

**MIN et al. 2002**

Min, B.-K.; Huang, Z.; Pasek, Z. J.; Yip-Hoi, D.; Husted, F.; Marker, S.: Integration of Real-time Control Solution to a Virtual Manufacturing Environment. *International Journal of Advanced Manufacturing Systems, Special Issue on Virtual Manufacturing 1 (2002) 1*, S. 67-87.

**NOLDE 2003**

Nolde, J.: Modellgestützte SPS-Code-Erzeugung, Simulation und Verifikation. A&D KOMPENDIUM (2003). München: publish-industry 2003. S. 140-142.

**OSMERS 1998**

Osmer, U.: Programming and Simulation of complex PLC-controlled manufacturing systems with the help of Virtual Reality. Diss. Universität Karlsruhe (1998). Karlsruhe: wbk 1998. (Forschungsberichte aus dem wbk 87).

**PFISTERER 2003**

Pfisterer, D.: 3D Simulation in der Steuerungstechnik. In: VDW-Seminar - Simulationstechniken zur Verkürzung der Durchlaufzeiten bei der Entwicklung von Werkzeugmaschinen, Garching, Mai 2003. Garching: *iwb* Eigenverlag 2003.

**PFOHL & GAREIS 2000**

Pfohl, H.-C.; Gareis, K.: Die Rolle der Logistik in der Anlaufphase. Zeitschrift für Betriebswirtschaft 70 (2000) 11, S. 1189 - 1214.

**PRITSCHOW 2002a**

Pritschow, G.: Auf dem Weg in die virtuelle Produktion. wt Werkstattstechnik online 92 (2002) 5, S. 186.

**PRITSCHOW 2002b**

Pritschow, G.: Wege zur virtuellen Werkzeugmaschine. wt Werkstattstechnik online 92 (2002) 5, S. 194 - 199.

**QIN et al. 2005**

Qin, S.; Harrison, R.; West, A. A.: Study of 3D Simulation Modeling for Supporting a Plug-and-Play, Distributed Control System. International Journal of Agile Manufacturing 8 (2005) 1, S. 101-108.

**RAITH & AMMAN 1992**

Raith, P.; Amman, W.: Erstellen und Testen von Ablaufvorschriften für Produktionssysteme. ZWF-Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 87 (1992), S. 383-386.

**REITHOFER 2002**

Reithofer, N.: VDI-Nachrichten 23/2002, 07.06.2002, S. 11.

**ROCKWELL SYSTEMS 2005**

Rockwell Systems: Rockwell Systems Teststand. 2005.



---

**RÖMBERG 2004**

Römberg, S.: Virtuelle Inbetriebnahme: Innovative Entwicklungen im Bereich der Digitalen Fabrik. In: 2. Symposium "Digitale Fabrik", Leipzig, 24. Juni 2004. Leipzig: 2004.

**RÜCKER 2005**

Rücker, W.: Virtuelle Inbetriebnahme. Weingarten: Rücker 2005.

**SCHAICH 1996**

Schaich, C.: Entwicklung intelligenter Maschinen - schneller, besser, kostengünstiger durch Simultaneous Engineering. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme. München: Utz 1996, S. 79-89. (Seminarberichte *iwb* 20).

**SCHEIFELE & RÖCK 2004**

Scheifele, D.; Röck, S.: Virtuelle Welten für reale Steuerungen. In: Pritschow, G. (Hrsg.): Steuerungstechnisches Forum `04 - mit den Schwerpunkten Motion Control und Virtuelle Maschine. Stuttgart: 2004, S. 1 - 14.

**SCHIEBER & DERICHSWEILER 2004**

Schieber, R.; Derichsweiler, F.: Testautomatisierung in der Automobilbranche. Objektspektrum 11 (2004) 4, S. 63 ff.

**SCHLÖGL 2005**

Schlögl, W.: Aktuelle Ergebnisse und notwendige Randbedingungen zur Integration von digitaler und realer Fabrik. In: Verlag Moderne Industrie (Hrsg.): Automobil Fachkongress 2005 - Digitale Fabrik in der Automobilindustrie, 28. und 29. Juni 2005, Forum am Schlosspark, Ludwigsburg. Ludwigsburg: Verlag Moderne Industrie 2005.

**SCHNIEDER 1993**

Schnieder, E.: Prozessinformatik: Automatisierung mit Rechensystemen. Einführung mit Petrinetzen. Braunschweig: Vieweg 1993.

**SCHRÜFER 1992**

Schrüfer, E.: Signalverarbeitung - Numerische Verarbeitung digitaler Signale. 2. Aufl. München: Hanser 1992. (Studienbücher der technischen Wissenschaften).

**SCHUH et al. 2004**

Schuh, G.; Friedli, T.; Gebauer, H.: Fit for Service : Industrie als Dienstleister. München: Hanser 2004.

**SCHULLERER 1998**

Schullerer, J.: Prozeßsignalkopplung bei der Realzeitsimulation komplexer Produktionsmaschinen. Diss. Technische Universität München (1998). München: Utz 1998. (Informationstechnik im Maschinenwesen 24).

**SCHULTE-ZURHAUSEN 2005**

Schulte-Zurhausen, M.: Organisation. 4. Aufl. München: Vahlen 2002.

**SCHWAB 2005**

Schwab, J.: Digitale Fabrik in heterogenen Engineering-Netzwerken. In: Verlag Moderne Industrie (Hrsg.): Automobil Fachkongress 2005 - Digitale Fabrik in der Automobilindustrie, 28. und 29. Juni 2005, Forum am Schlosspark, Ludwigsburg. Ludwigsburg: Moderne Industrie 2005.

**SIEVERDINGBECK 2006**

Sieverdingbeck, D.: Kompakt-Saugertransferpressen. Funktionalität. <<http://www.muellerweingarten.de>> - 18.09.2006.

**SOSENHEIMER 1989**

Sossenheimer, K.: Entwickeln von Instrumentarien zur rationellen Planung und Steuerung der Inbetriebnahme komplexer Produkte des Werkzeugmaschinenbaus. Diss. RWTH Aachen (1989). Aachen: Shaker 1989.

**SPATH & LANDWEHR 2000a**

Spath, D.; Landwehr, R.: 3-D-Projektierung und Simulation von Ablaufsteuerungen. wt Werkstattstechnik 90 (2000) 7/8, S. 292-296.

**SPATH & LANDWEHR 2000b**

Spath, D.; Landwehr, R.: Virtual Engineering: Virtual Methods in Programming and Simulation of Programmable Logic Controlled Manufacturing Systems. In: 2000 International CIRP Design Seminar; 16.-18. Mai 2000. Haifa, Israel: 2000.

**SPATH & LANDWEHR 2000c**

Spath, D.; Landwehr, R.: Three-dimensional programming and simulation of PLC-controlled manufacturing systems. International Journal for Manufacturing Science and Production 3 (2000) 2-4, S. 189-194.

---

**SPATH & LANDWEHR 2001**

Spath, D.; Landwehr, R.: Konzeption einer integrierten Werkzeugmaschinen-Simulationsumgebung. In: Krause, F.-L. et al. (Hrsg.): Fortschrittsbericht zum Leitprojekt integrierte Virtuelle Produktentstehung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2001.

**STETTER 2005a**

Stetter, R.: Experiences with virtual production in small and middle-sized companies. In: Reinhart, G.; Zäh, M. F. (Hrsg.): CARV 05. 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production, Garching, 22.-23.09.2005. München: Utz 2005.

**STETTER 2005b**

Stetter, R.: Kernkompetenzen - Quality Gates. <<http://www.itq.de>> - 19.12.2005.

**STRASSACKER 1997**

Strassacker, D.: Testumgebung für die Implementierung und Inbetriebnahme eines adaptierbaren Leitsteuerungssystems. Diss. Universität Stuttgart (1997). Berlin, Heidelberg: Springer 1997. (ISW Forschung und Praxis 117).

**TECNOMATIX 2003**

Tecnomatix: eMPower for Manufacturing Process Management. eM-PLC und STEP 7 Professional. Modellbasierte automatische Erzeugung, Simulation und Funktionsprüfung von SPS-Programmen. Ismaning: Tecnomatix 2003.

**TOMASZUNAS 1998**

Tomaszunas, J. J.: Komponentenbasierte Maschinenmodellierung zur Echtzeit-Simulation für den Steuerungstest. Diss. Technische Universität München (1998). München: Utz 1998. (Informationstechnik im Maschinenwesen 20).

**VDW 1997**

VDW: Abteilungsübergreifende Projektierung komplexer Maschinen und Anlagen. Aachen: WZL 1997. (VDW-Bericht).

**VIESER 2005**

Vieser, S.: Invasion aus China rollt an. Automobil-Produktion 6 (2005) 6, S. 14-16.

### WAGNER 2003

Wagner, P.: Die virtuelle Werkzeugmaschine in der Entwicklungsprozesskette: 3D-CAD und Simulationswerkzeuge im praktischen Einsatz. In: VDW-Seminar - Simulationstechniken zur Verkürzung der Durchlaufzeiten bei der Entwicklung von Werkzeugmaschinen Garching, Mai 2003. Garching: *iwb* Eigenverlag 2003.

### WALENTA 1990

Walenta, F.: Inbetriebnahmegerechte Softwarestrukturierung - Praxisbeispiele aus dem Werkzeugmaschinenbau. In: VDI (Hrsg.): Inbetriebnahme komplexer Maschinen und Anlagen. Tagung Frankfurt, 28. Juni 1990. Düsseldorf: VDI Verlag 1990, S. 71-90. (VDI-Berichte 831).

### WEBER 1996

Weber, K. H.: Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen : Vorbereitung und Durchführung. Düsseldorf: VDI Verlag 1996.

### WESTKÄMPER 2003

Westkämper, E.: Die Digitale Fabrik. In: Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Neue Organisationsformen im Unternehmen: Ein Handbuch für das moderne Management. Berlin, Heidelberg: Springer 2003, S. 788-797.

### WEULE et al. 1994

Weule, H.; Spath, D.; Schmidt, J.: TOPAS. Objektorientiertes Anlagen-Modellierungssystem. In: Weule, H. et al. (Hrsg.): Kolloquium Schwerpunkt CAD/CAM und Informationslogistik. Karlsruhe: wbk 1994.

### WIENDAHL et al. 2002

Wiendahl, H.-P.; Hegenscheidt, M.; Winkler, H.: Anlaufrobuste Produktionssysteme. *wt Werkstattstechnik online* 92 (2002) 11/12, S. 650-655.

### WILDEMANN 2005

Wildemann, H.: Strategien der Digitalen Fabrik. In: Verlag Moderne Industrie (Hrsg.): Automobil Fachkongress 2005 - Digitale Fabrik in der Automobilindustrie, 28. und 29. Juni 2005, Forum am Schlosspark, Ludwigsburg. Ludwigsburg: Moderne Industrie 2005.

### WILHELM 2005

Wilhelm, H.: 3D-Maschinen - Simulation für SPS-Programmierer: TRYSIM. <<http://www.trysim.de>> - 25.10.2005.

---

#### WÜNSCH 2006

Wünsch, G.: Wann lohnt sich eine Virtuelle Inbetriebnahme? In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?, Garching. München: Utz 2006, S. 1-17. (Seminarberichte *iwb* 84).

#### WÜNSCH & ZÄH 2005

Wünsch, G.; Zäh, M. F.: A New Method for Fast Plant Start-Up. In Reinhart, G.; Zäh, M. F. (Hrsg.): CARV 05. 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production, Garching, 22.-23.09.2005. München: Utz 2005.

#### XU 2003

Xu, L.: Wiederverwendbare Modelle zur Maschinensimulation für den Steuerungstest. Diss. Technische Universität München (2003). München: Utz 2003. (Informationstechnik im Maschinenwesen 35).

#### ZÄH & REINHART 2004

Zäh, M. F.; Reinhart, G.: Virtuelle Produktionssystem-Planung: Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik. München: Utz 2004. (Seminarberichte *iwb* 74).

#### ZÄH et al. 2003a

Zäh, M. F.; Lercher, B.; Pörnbacher, C.; Wünsch, G.: Datenmanagement in der Mechatronik. *wt Werkstattstechnik online* 93 (2003a) 7/8, S. 541 ff.

#### ZÄH et al. 2003b

Zäh, M. F.; Wünsch, G.; Pörnbacher, C.; Ehrenstrasser, M.: Emerging Virtual Machine Tools. In: ASME DETC 2003: 29th Design Automation Conference, Chicago, 02.-06.09.2003. Illinois: 2003.

#### ZÄH et al. 2004 a

Zäh, M. F.; Menzel, T.; Wünsch, G.: Virtuelle Inbetriebnahme von Werkzeugmaschinen - Qualitätssicherung von Steuerungssoftware. In: Bayerisches Fachforum Mechatronik 2004. Augsburg: 2004, S. 1-26.

#### ZÄH et al. 2004b

Zäh, M. F.; Munzert, U.; Pörnbacher, C.; Wünsch, G.: Vorabinbetriebnahme und Qualitätssicherung von Steuerungssoftware durch Simulation. In: 8. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar: Neue Funktionalität der Ablauf- und Bewegungssteuerung an Werkzeugmaschinen. Dresden, 3. und 4. Juni 2004. Dresden: Technische Univ. 2004.

ZÄH et al. 2004c

Zäh, M. F.; Munzert, U.; Wunsch, G.: Simulation von Montageanlagen in der Automobilindustrie - Hardware-in-the-Loop-Technologie für den Virtual Ramp Up. ZWF-Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 99 (2004) 1-2, S. 18 ff.

ZÄH et al. 2004d

Zäh, M. F.; Wunsch, G.; Pörnbacher, C.; Munzert, U.: Offline Cycle Time Reduction Using Hybrid Virtual Assembly Plants. In: CIRP Design Seminar, Kairo, 16.-18. Mai 2004. Kairo: CIRP 2004.

ZÄH et al. 2005a

Zäh, M. F.; Grätz, F.; Wunsch, G.: Entwicklung mechatronischer Produktionssysteme - eine interdisziplinäre Herausforderung. In: Zäh, M. et al. (Hrsg.): Mechatronik. Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen. München: Utz 2005, S. 1-14. (Seminarberichte *iwb* 78).

ZÄH et al. 2005b

Zäh, M. F.; Schack, R.; Carnevale, M.; Müller, S.: Ansatz zur Projektierung der digitalen Fabrik. ZWF-Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 100 (2005).

ZÄH et al. 2005c

Zäh, M. F.; Spitzweg, M.; Munzert, U.; Vogel, W.: Realistic Machine Behaviour in Virtual Reality. In: Fischer, X. et al. (Hrsg.): Virtual Concept 2005. Biarritz: Springer France 2005.

ZÄH et al. 2005d

Zäh, M. F.; Spitzweg, M.; Munzert, U.; Vogel, W.: Hardware-in-the-Loop-Simulation in Virtual-Reality-Umgebungen. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn, 9.-10. Jun. 2005. Paderborn: 2005.

ZÄH et al. 2006a

Zäh, M. F.; Wunsch, G.; Hensel, T.; Lindworsky, A.: Nutzen der virtuellen Inbetriebnahme: Ein Experiment. ZWF-Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101 (2006) 10, S. 595-599.

ZÄH et al. 2006b

Zäh, M. F.; Grätz, F.; Wunsch, G.: Schneller zur getesteten Software mit Hardware-in-the-Loop-Simulation. SPS Magazin (2006) 8.

---

**ZEUGTRÄGER 1998**

Zeugträger, K.: Anlaufmanagement für Großanlagen. Diss. Universität Hannover (1998). Düsseldorf: VDI Verlag 1998. (Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 470).





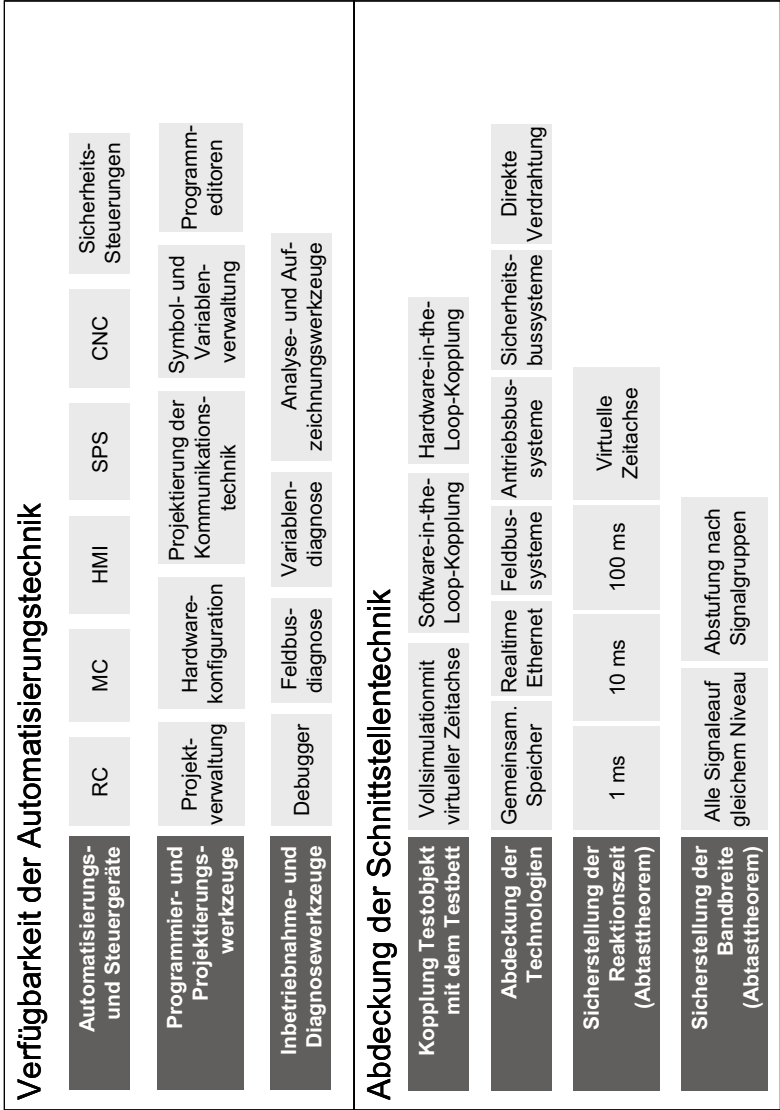
---

## **10 Anhang**

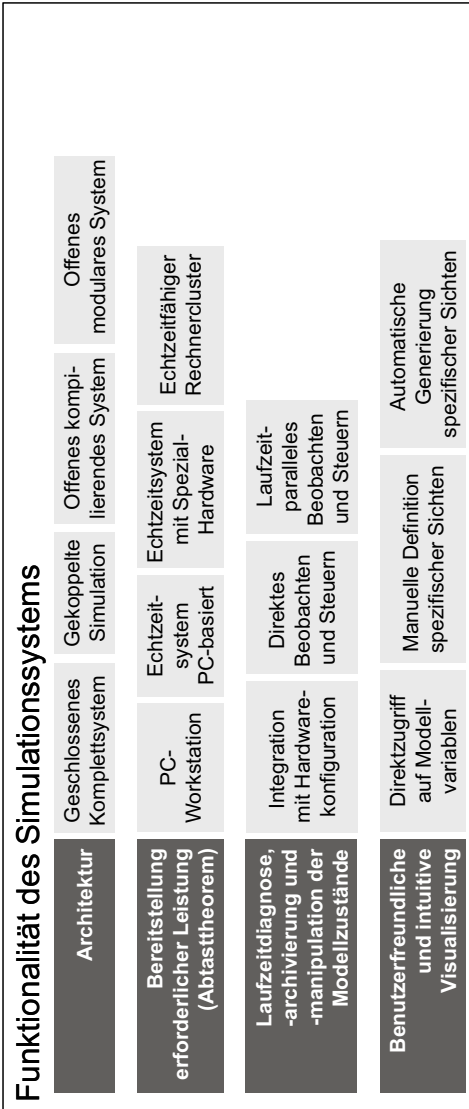
Der Anhang besteht aus

- dem Lösungsbaukasten für die virtuelle Inbetriebnahme,
- der Liste genannter Firmen und
- der Liste genutzter Software.

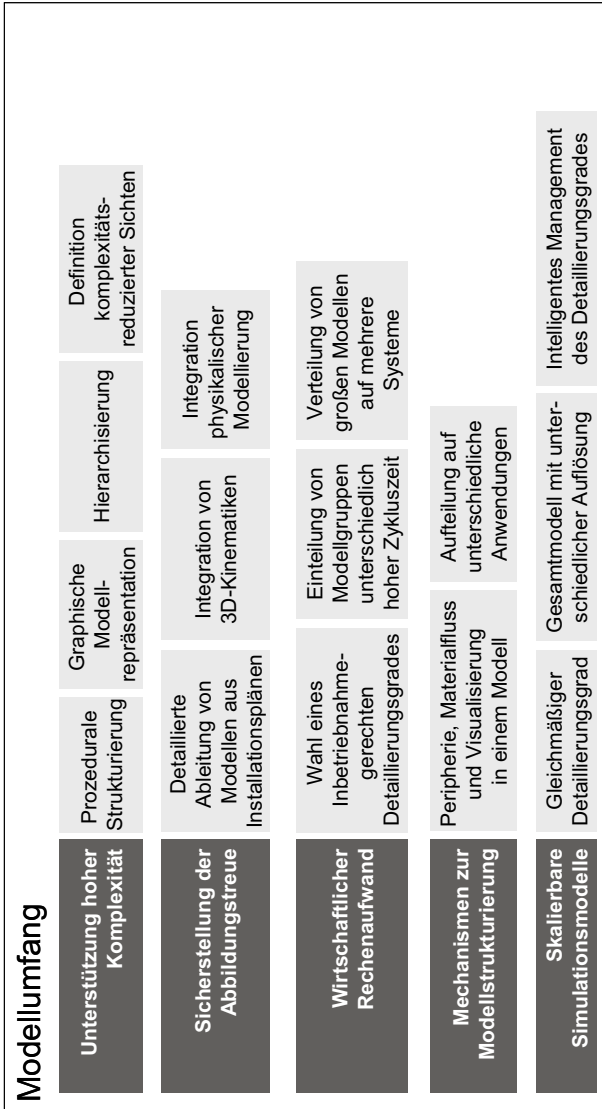
## 10.1 Lösungsbaukasten für die VIBN Teil 1 von 4



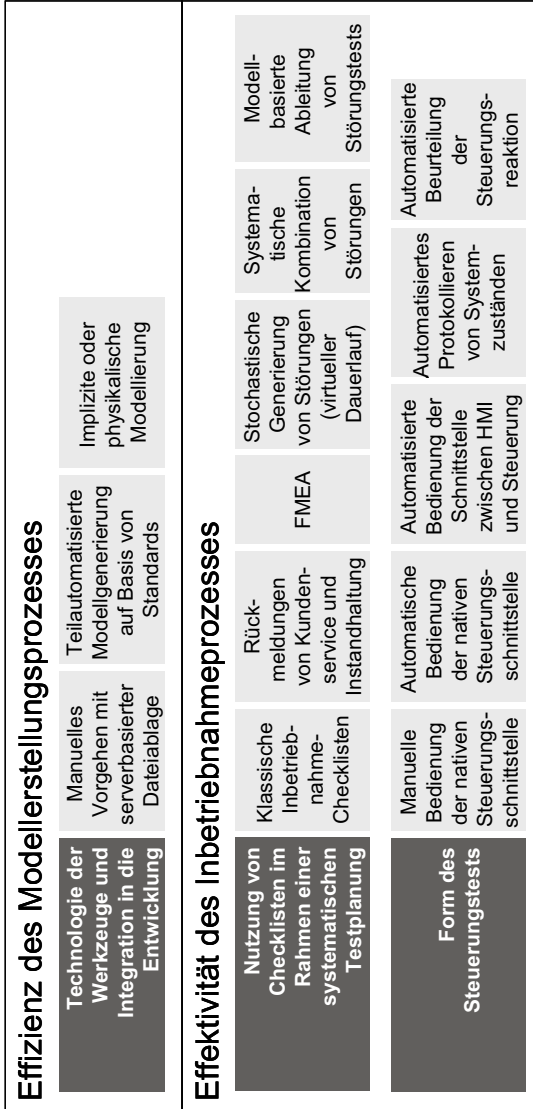
## 10.2 Lösungsbaukasten für die VIBN Teil 2 von 4



### 10.3 Lösungsbaukasten für die VIBN Teil 3 von 4



## 10.4 Lösungsbaukasten für die VIBN Teil 4 von 4



## 10.5 Genannte Firmen

### *DELMIA World Headquarters*

900 N. Squirrel Road, Suite 100  
Auburn Hills, MI 48326, USA  
<http://www.delmia.com>

### *DELMIA GmbH*

Raiffeisenplatz 4  
70736 Fellbach  
<http://www.delmia.de>

### *Gebr. HELLER Maschinenfabrik GmbH*

Gebrüder-Heller-Straße 15  
D-72622 Nürtingen  
<http://www.heller-machinetools.com/>

### *Mewes & Partner GmbH*

Neuendorfstr. 15  
D-16761 Hennigsdorf  
<http://www.winmod.de>

### *Siemens AG*

90441 Nürnberg  
<http://www.siemens.com>

### *The MathWorks Headquarters*

3 Apple Hill Drive  
Natick, MA 01760-2098  
<http://www.mathworks.com/>

---

*UGS Global Headquarters*

5800 Granite Parkway  
Suite 600  
Plano, TX 75024, USA  
<http://www.ugs.com>

*Unigraphics Solutions GmbH*

Hohenstaufenring 48-54  
50674 Köln  
<http://www.ugsplm.de>

## **10.6 Genutzte Software**

*Matlab Simulink*

The MathWorks Headquarters  
3 Apple Hill Drive  
Natick, MA 01760-2098  
<http://www.mathworks.com/>

*Plant Simulation (vormals eM-Plant oder Simple++)*

Unigraphics Solutions GmbH  
Hohenstaufenring 48-54  
50674 Köln  
[www.ugs.com](http://www.ugs.com)

*WinMOD*

Echtzeitsimulationssystem für Automatisierungstechnik

Mewes & Partner GmbH  
Neuendorfstr. 15  
D-16761 Hennigsdorf  
<http://www.winmod.de>

*Sinumerik Machine Simulator (auch SIMIT)*

Echtzeitsimulationssystem für Automatisierungstechnik

Siemens AG

90441 Nürnberg

<http://www.siemens.com>



# iwb Forschungsberichte Band 1–121

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

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

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

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

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

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

# Seminarberichte iwb

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

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

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**  
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**  
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**  
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**  
86 Seiten · ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ins Ziel**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**  
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**  
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**  
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**  
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**  
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**  
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**  
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**  
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungs montage und zum Dichtmittelauftrag**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar**  
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 30 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**  
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**  
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**  
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**  
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**  
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibel und schneller mit modernen Kooperationen**  
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**  
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**  
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**  
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen**  
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**  
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**  
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1

- 47 **Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation**  
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 **Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen**  
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 **Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 **Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion**  
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 **Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle**  
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien**  
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 **Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung**  
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 **Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation**  
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 **e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 **Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 **Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien**  
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 **Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik**  
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 **Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln**  
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 62 **Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien**  
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 **Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge**  
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 **Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial**  
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 **Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen**  
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 **Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder**  
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 **Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder**  
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 **Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik**  
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 **Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette**  
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0
- 70 **Mechatronik · Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen**  
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 **Klebtechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten**  
ISBN 3-89675-071-2 · vergriffen
- 72 **Fabrikplanung 2004 · Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen**  
ISBN 3-89675-072-0 · vergriffen
- 73 **Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen**  
179 Seiten · ISBN 3-89675-073-9
- 74 **Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik**  
133 Seiten · ISBN 3-89675-074-7
- 75 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 76 **Berührungslose Handhabung · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapselfur zur aseptischen Ampulle**  
95 Seiten · ISBN 3-89675-076-3
- 77 **ERP-Systeme · Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen**  
153 Seiten · ISBN 3-89675-077-7
- 78 **Mechatronik · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen**  
155 Seiten · ISBN 3-89675-078-X
- 79 **Produktionsmanagement**  
267 Seiten · ISBN 3-89675-079-8
- 80 **Rapid Manufacturing · Fertigungsverfahren für alle Ansprüche**  
154 Seiten · ISBN 3-89675-080-1
- 81 **Rapid Manufacturing · Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder**  
172 Seiten · ISBN 3-89675-081-X
- 82 **Produktionsmanagement · Herausforderung Variantenmanagement**  
100 Seiten · ISBN 3-89675-082-8
- 83 **Mechatronik · Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen**  
160 Seiten · ISBN 3-89675-083-6
- 84 **Virtuelle Inbetriebnahme · Von der Kür zur Pflicht?**  
104 Seiten · ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 **3D-Erfahrungsforum · Innovation im Werkzeug- und Formenbau**  
375 Seiten · ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 **Rapid Manufacturing · Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung**  
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 **Produktionsmanagement · Schlank im Mittelstand**  
102 Seiten · ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 **Mechatronik · Vorsprung durch Simulation**  
134 Seiten · ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 **RFID in der Produktion · Wertschöpfung effizient gestalten**  
122 Seiten · ISBN 978-3-89675-089-1

# Forschungsberichte iw b

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

Forschungsberichte iw b ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 122 Schneider, Burghard  
**Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile**  
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd  
**Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung**  
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Mößner, Helmut E.  
**Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme**  
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter  
**Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern**  
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen  
**Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik**  
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris  
**Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern**  
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf  
**Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen**  
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.  
**Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen**  
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto  
**Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen**  
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael  
**Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping**  
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.  
**Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnernverbänden**  
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut  
**Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle**  
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan  
**Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen**  
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can  
**Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik**  
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan  
**Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken**  
 2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.  
**Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung**  
 2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra  
**Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen**  
 2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander  
**Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen**  
 2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.  
**Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken**  
 2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprengel, Andreas  
**Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung**  
 2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas  
**Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion**  
 2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf  
**Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen**  
 2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0
- 144 Schneider, Christian  
**Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion**  
 2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian  
**Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen**  
 2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich  
**Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen**  
 2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof  
**Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss**  
 2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank  
**Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen**  
 2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Hohn, Michael  
**Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme**  
 2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn  
**Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung**  
 2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert  
**Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben**  
 2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
- 152 Stephan Dürrschmidt  
**Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion**  
 2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6
- 153 Bernhard Eich  
**Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung**  
 2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7



- 154 Wolfgang Rudorfer  
**Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke**  
 2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier  
**Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe**  
 2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak  
**Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen**  
 2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner  
**Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen**  
 2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz  
**Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung**  
 2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald  
**Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung**  
 2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner  
**Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen**  
 2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller  
**Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen**  
 2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer  
**Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen**  
 2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fahrer  
**Ganzeitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses**  
 2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner  
**Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler**  
 2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte  
**Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik**  
 2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißberger  
**Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess**  
 2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob  
**Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik**  
 2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer  
**System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen**  
 2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel  
**Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen**  
 2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross  
**Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung**  
 2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun  
**Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess**  
 2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6

- 172 Florian von der Hagen  
**Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen**  
 2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer  
**Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe**  
 2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen  
**Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme**  
 2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton  
**Ein Beitrag zur Entwicklung telepräseneter Montagesysteme**  
 2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser  
**Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke**  
 2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitinge  
**Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen**  
 2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling  
**Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling**  
 2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch  
**Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine**  
 2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein  
**Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems**  
 2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak  
**Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen**  
 2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr  
**Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung**  
 2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber  
**Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken**  
 2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt  
**Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern**  
 2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer  
**Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten**  
 2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger  
**Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme**  
 2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl  
**Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing**  
 2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch  
**Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie**  
 2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3

- 189 Thomas Mosandl  
**Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme**  
2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron  
**Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung**  
2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek  
**Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen**  
2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4
- 192 Florian Auer  
**Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen**  
2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1
- 193 Carsten Selke  
**Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung**  
2005 · 137 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9
- 194 Markus Seefried  
**Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern**  
2005 · 216 Seiten · 82 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0503-3
- 195 Wolfgang Wagner  
**Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion**  
2006 · 208 Seiten · 43 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0586-6
- 196 Christopher Ulrich  
**Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen**  
2006 · 178 Seiten · 74 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0590-4
- 197 Johann Härtl  
**Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern**  
2006 · 140 Seiten · 55 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0611-0
- 198 Bernd Hartmann  
**Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge**  
2006 · 208 Seiten · 105 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0615-3
- 199 Michael Schilp  
**Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage**  
2006 · 130 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0631-5
- 200 Florian Manfred Grätz  
**Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme**  
2006 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0643-9
- 201 Dieter Eireiner  
**Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding**  
2006 · 214 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0650-1
- 202 Gerhard Volkwein  
**Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation**  
2007 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 Sven Roeren  
**Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse**  
2007 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 Henning Rudolf  
**Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie**  
2007 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 Stella Clarke-Griebsch  
**Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia**  
2007 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 Michael Ehrenstraßer  
**Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage**  
2008 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0743-3

- 207 Rainer Schack  
**Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik**  
2008 · 248 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 Wolfgang Sudhoff  
**Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion**  
2008 · 276 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 Stefan Müller  
**Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen**  
2008 · 240 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 Ulrich Kohler  
**Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme**  
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 Klaus Schlickerieder  
**Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile**  
2008 · 204 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 Niklas Möller  
**Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme**  
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 Daniel Siedl  
**Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrbewegungen**  
2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansorge  
**Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen**  
2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wunsch  
**Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme**  
2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertli  
**Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben**  
2008 · 184 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3



