

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)

---

# Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis .....	IX
Tabellenverzeichnis.....	XV
Tabellenverzeichnis.....	XV
Abkürzungsverzeichnis .....	XVII
Abkürzungsverzeichnis .....	XVII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation .....	1
1.2 Handlungsbedarf.....	4
1.3 Ziel der Arbeit.....	6
1.4 Vorgehensweise und Gliederung .....	8
2 Grundlagen .....	11
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
3	Stand der Technik .....	29
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	Osmer's 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
4	Einführung in eine Organisation .....	69
4.1	Anforderungen .....	69
4.2	Einführungsfahrplan.....	70
4.3	Organisatorische Umsetzungsformen .....	75
5	Wirtschaftliche Skalierung.....	79
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
6	Technologien für die Modellbildung .....	93
6.1	Anforderungen .....	93
6.2	Generische Funktionsstruktur .....	96
6.3	Ausprägungen.....	98

## Symbolverzeichnis

---

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
7	Anwendung auf Projektbeispiele.....	143
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
8	Fazit .....	165
8.1	Zusammenfassung.....	165
8.2	Ausblick .....	168
9	Literatur .....	171
10	Anhang .....	187
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
$A_{Grenz}$	1	Spezifischer Aufwand an der Komplexitätsgrenze
$A_i$	€	Aufwand
$\underline{A}_i$	1	Spezifischer Aufwand
$A_{Referenz}$ ( $\underline{A}_{Ref.}$ )	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 ZAH & 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 ZAH & REINHART (2004b)	76
Abbildung 15: Vergleich des Vorgehens bei der Maschinenentwicklung mit und ohne virtueller Inbetriebnahme.....	78
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 .....	81
Abbildung 17: Qualitätssteigerung durch virtuelle Inbetriebnahme einer Beispielanlage (ZAH et al. 2006a) .....	83
Abbildung 18: Zeitgewinn durch virtuelle Inbetriebnahme einer Beispielanlage (ZAH 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 Feldbusssystem 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 Förderriemens .....	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 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 .....	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: Aaufplan 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 Rucker 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

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,

# 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).



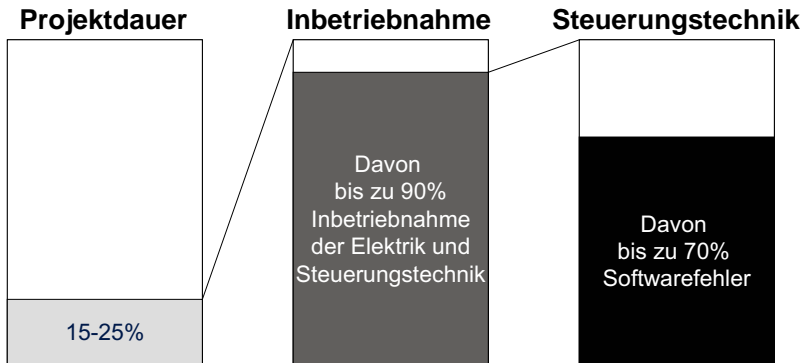


Abbildung 1: Zeitanteile bei der Inbetriebnahme (Quelle: VDW 1997)

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).

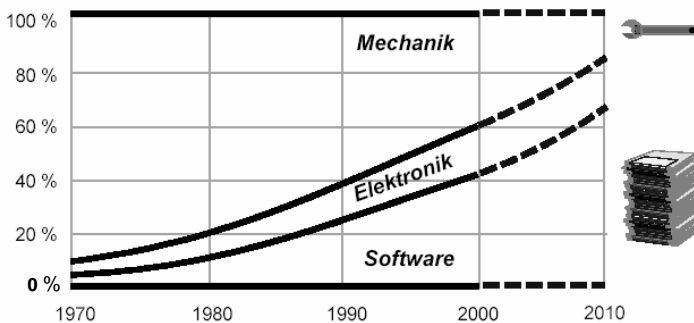


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf der Anteile von Mechanik, Elektronik und Software am Entwicklungsaufwand (Quelle: KOHEN 1990, S. 265, RAITH & AMMAN 1992, GLAS 1993)

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 Problembhebung. 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 Steuerungshardware- 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 Fehlererfassung 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.).

ZAH 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 (KUH N 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).

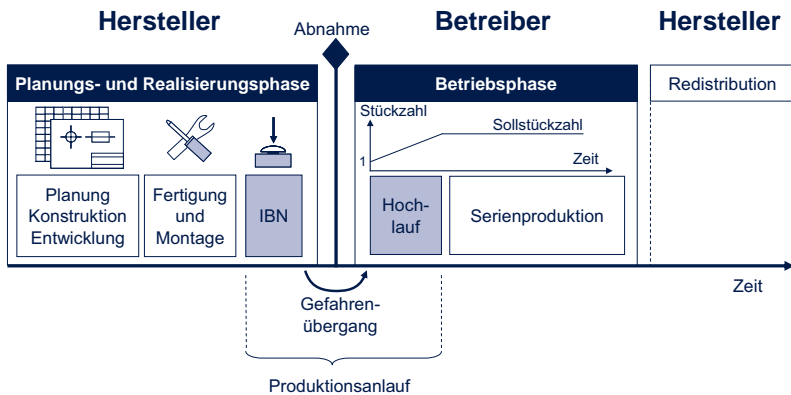


Abbildung 3: Lebenszyklus eines Produktionssystems in Anlehnung an Wiendahl (WIENDAHL et al. 2002, S. 651)

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 vorschriftsmäßig 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 Probebetrieb, 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-

## 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).

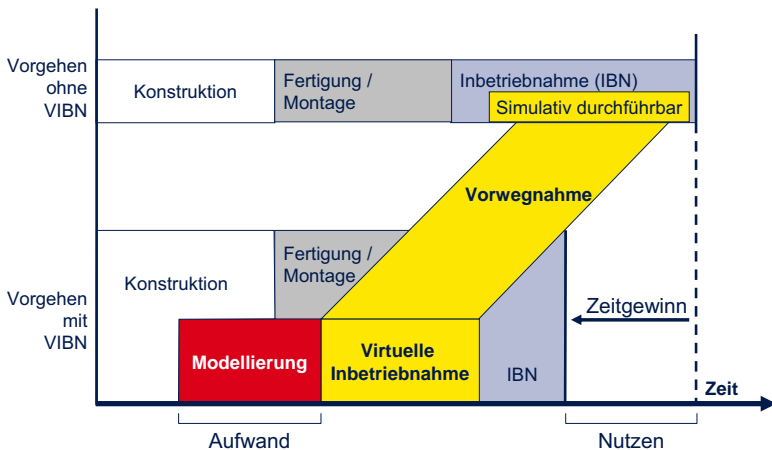


Abbildung 8: Grundidee der virtuellen Inbetriebnahme nach Wünsch & Zäh 2005

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 Off-line-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).

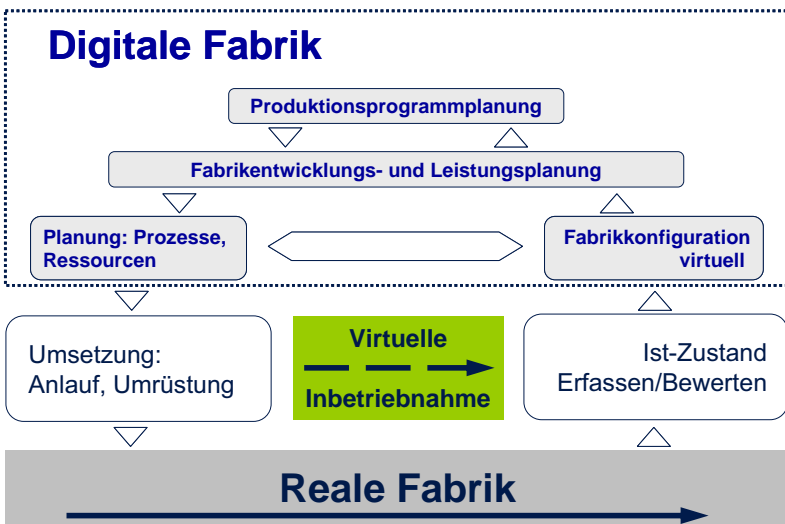


Abbildung 9: Virtuelle Inbetriebnahme als schnelle Rückkopplung im Regelkreis der Digitalen Fabrik nach ZÄH & REINHART (2004)

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

## 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 ZEUGTRAGER 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 ZAH 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 ZAH 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.

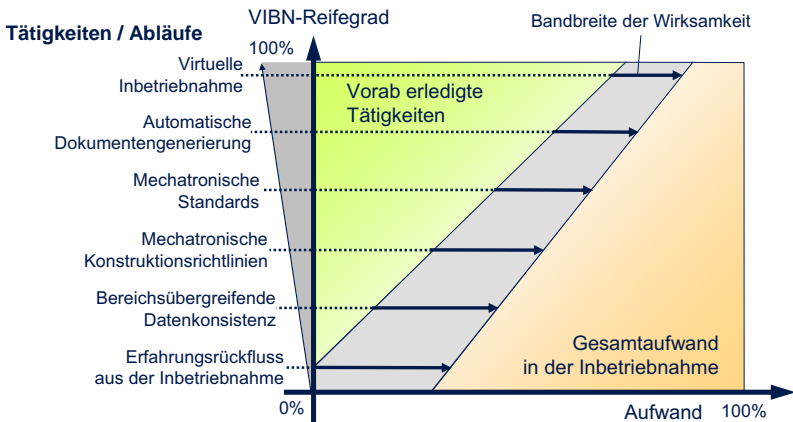


Abbildung 12: Einführungsfahrplan für eine wirksame virtuelle Inbetriebnahme

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 Projektabwicklung 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).

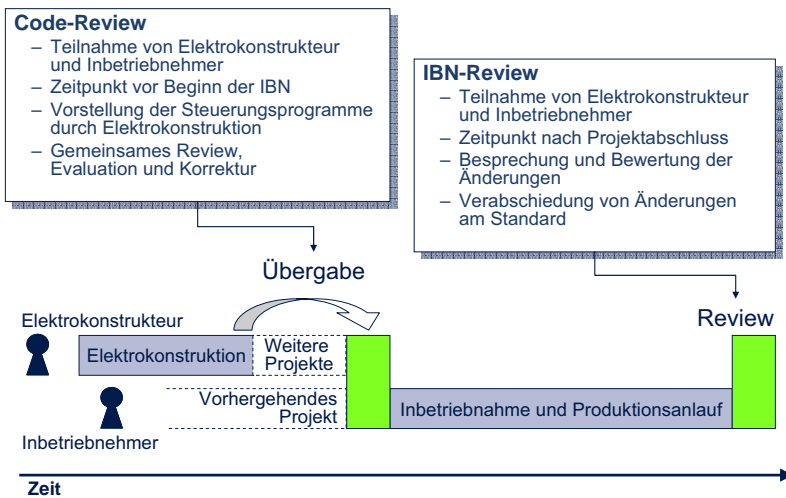


Abbildung 13: Sicherung der Inbetriebnahme-Erfahrung durch gezielte Einführung von Übergabegesprächen

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-

## 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 von 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.

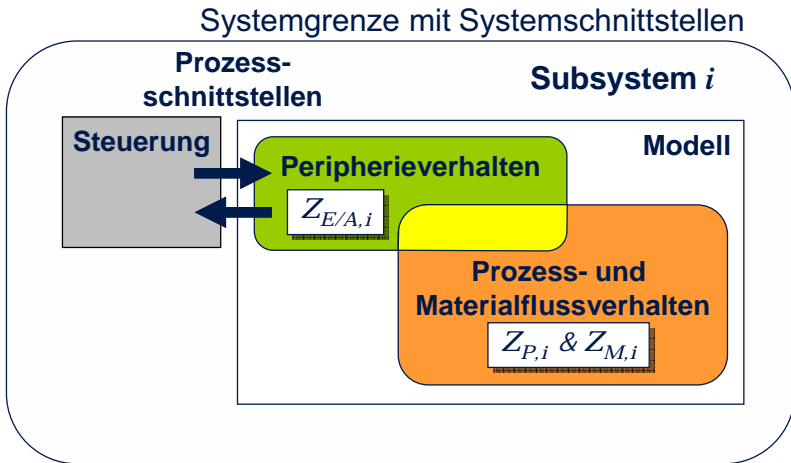


Abbildung 16: Elemente eines Subsystems  $i$  mit den Messgrößen „Zahl der Ein- und Ausgänge“  $Z_{E/A,i}$ , „Zahl der Prozesse“  $Z_{P,i}$  und „Zahl der Materialflussverbindungen“  $Z_{M,i}$  für die Bestimmung des Aufwands  $A_i$  bei der VIBN: Steuerung und Modell mit Peripherieverhalten sowie Prozess-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

ZAH 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 (ZAH 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).

## 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 Steuerungsinelligenz enthalten, gilt ausschließlich für die zu testende Steuerung. Es muss allerdings dem Effekt der steigenden Dezentralisierung von Steuerungsinelligenz in der Automatisierungstechnik Rechnung getragen werden. Dies bedeutet, dass je nach der Grenze zwischen Steuerung und Simulation ggf. durchaus Steuerungsinelligenz 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.

ZAH 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 Wiederverwendbarkeit. 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.



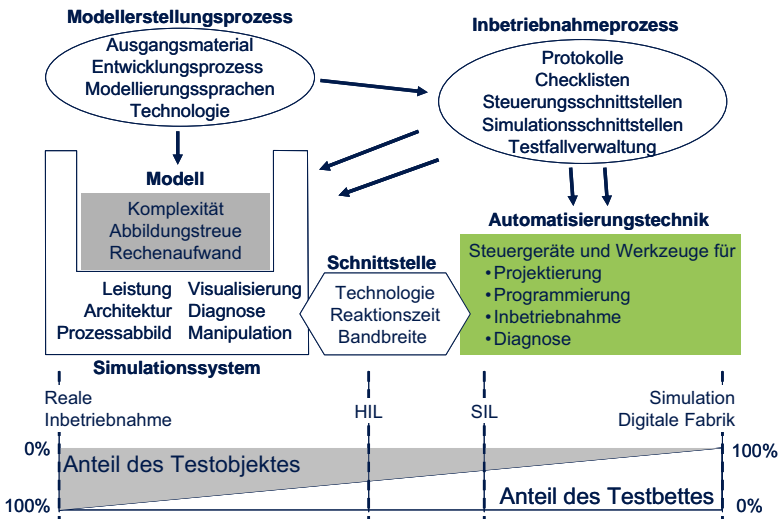


Abbildung 26: Generische Funktionsstruktur des VIBN-Labors, bestehend aus den Systemen „Automatisierungstechnik“, „Schnittstelle“, „Simulationssystem“, „Modell“ und den Prozessen „Inbetriebnahme“ und „Modellerstellung“: je nach Ausprägung des Testobjektes mit mehr oder weniger realen Komponenten verschiebt 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.

## 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 peripherenahe 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.

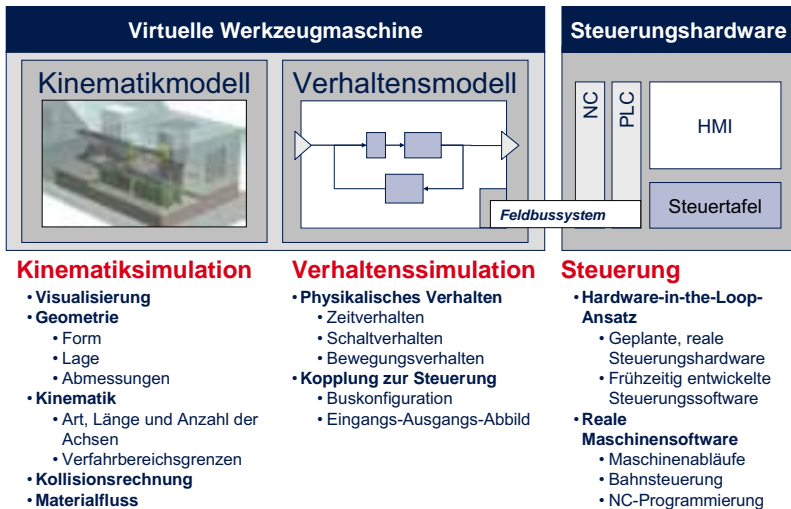


Abbildung 64: Hardware-in-the-Loop-Simulation eines Bearbeitungszentrums

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-

## 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

---

## 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.



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.

---

## 10 Anhang

Der Anhang besteht aus

- dem Lösungsbaukasten für die virtuelle Inbetriebnahme,
- der Liste genannter Firmen und
- der Liste genutzter Software.

# 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 *Witba, 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/CAM-Kopplung für die 3D-  
Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**  
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*  
**Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen**  
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*  
**Automatische Inbetriebnahme  
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**  
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*  
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von  
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 iwb

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

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