

**Fortschritt-Berichte VDI**

M. Sc. Ralph Klaus Müller  
Ingolstadt

**Methodik zur virtuellen  
Systemintegration im  
industriellen Anlagenbau**

**Reihe 10**  
**Informatik/Kommunikation**



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Vorwort</b>	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>XI</b>
<b>Abstract</b>	<b>XII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Virtuelle Systemintegration	1
1.2 Motivation	1
1.3 Ziel der Arbeit	2
1.4 Struktur der Arbeit	3
<b>2 Digitalisierung im Planungsprozess</b>	<b>4</b>
2.1 Produktentstehungsprozess und Planungsprozess	4
2.2 Evolution von Inbetriebnahmeprozessen	7
2.2.1 Inbetriebnahme im Allgemeinen	7
2.2.2 Wandel zur Digitalisierung und virtuelle Inbetriebnahme	9
2.3 Der Weg zur digitalen Fabrik	12
2.3.1 Cyber-physische Systeme	12
2.3.2 Informationsaustausch	14
2.3.3 Anforderungen an den Informationsaustausch	16
2.4 Formulierung des Forschungsgegenstandes	17
<b>3 Stand der Wissenschaft zur virtuellen Inbetriebnahme von Gesamtsystemen</b>	<b>18</b>
3.1 Grundlegende Ansätze der virtuellen Inbetriebnahme	18
3.1.1 Ablauf eines Projektes der virtuellen Inbetriebnahme	20
3.1.2 Model-in-the-Loop (MIL)	21
3.1.3 Software-in-the-Loop (SIL)	22
3.1.4 Hardware-in-the-Loop (HIL)	23
3.1.5 Virtualisierung von Steuerungen	24
3.2 Ausgewählte Modelle für verschiedene Domänen	25
3.2.1 Digitaler Zwilling	25
3.2.2 Materialflusssimulation, Linienmodell	28

3.2.3	Übergeordnete Systeme . . . . .	30
3.2.4	Steuerungssimulationen, Virtuelle Steuerungen . . . . .	32
3.2.5	Maschinenmodelle . . . . .	33
3.3	Grundlagen der Informationsmodellierung . . . . .	35
3.3.1	Grundlegende Begriffe und relevante Konzepte . . . . .	36
3.3.2	Angewählte Modellierungssprachen . . . . .	37
3.3.3	Management von Informationsmodellen . . . . .	39
3.3.4	Einsatz im industriellen Kontext . . . . .	41
3.4	Middleware-Technologien zum Informationsaustausch für das Gesamtsystem . . . . .	42
3.4.1	Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) . . . . .	42
3.4.2	Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) . . . . .	43
3.4.3	Weitere Protokolle . . . . .	44
3.5	Methoden und Werkzeuge . . . . .	45
3.5.1	Co-Simulation . . . . .	45
3.5.2	V-Modell . . . . .	46
3.5.3	Modellierung von Produkt, Produktionsprozess und Produktionsresource (PPR) . . . . .	47
3.5.4	Analyse- und Problemlösungswerkzeuge . . . . .	48
3.6	Bewertung . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Methodik für die Informationsmodell-basierte virtuelle Inbetriebnahme</b> . . . . .	<b>51</b>
4.1	Begriffsklärung . . . . .	52
4.1.1	Informationsmodell-basierte virtuelle Inbetriebnahme . . . . .	52
4.1.2	Einführung Model-in-the-Middle . . . . .	52
4.2	Rahmenbedingungen und Anforderungen an die Methodik . . . . .	54
4.2.1	Quantitative Anforderungen . . . . .	56
4.2.2	Qualitative Anforderungen . . . . .	57
4.3	Analyse der Anforderungen von Informationsmodellen im Planungsprozess . . . . .	57
4.3.1	Konzeptphase . . . . .	58
4.3.2	Konstruktionsphase . . . . .	59
4.3.3	Serienvorbereitung . . . . .	60
4.4	Überblick über den Gesamtprozess . . . . .	60
4.5	Phase 1: Basiskonzept . . . . .	62
4.5.1	Anwendungsfall und Wiederverwendung . . . . .	63
4.5.2	Virtuelle Gegenüberstellung . . . . .	64
4.5.3	Informationsstruktur-Entwurf . . . . .	66
4.6	Phase 2: Entitätskonzept . . . . .	68
4.6.1	Prozess . . . . .	70
4.6.2	Systeme . . . . .	71
4.6.3	Datenziel . . . . .	72
4.7	Phase 3: Integration . . . . .	74
4.7.1	Virtuelle Validierung . . . . .	74
4.7.2	Systemintegration . . . . .	85
4.7.3	Verifizierung . . . . .	86
4.7.4	Einbindung in ein Modell-Repository . . . . .	88
4.8	Bestimmung des Detaillevels zur virtuellen Validierung in der Co Simulation . . . . .	89
4.8.1	Beurteilung der Modellqualität . . . . .	90
4.8.2	Einordnung der Typen der Simulationsartefakte . . . . .	93
4.9	Fazit zur Methodik . . . . .	95

<b>5</b>	<b>Architektur einer entwicklungsbegleitenden Co-Simulationsumgebung</b>	<b>98</b>
5.1	Anforderungen und Rahmenbedingungen . . . . .	99
5.2	Begriffsklärung und Moduluberblick . . . . .	99
5.2.1	Simulierte Entitäten . . . . .	101
5.2.2	Reale Entitäten . . . . .	102
5.2.3	Vernetzungsebene . . . . .	102
5.2.4	Model-in-the-Middle-Ebene . . . . .	103
5.2.5	Businesslogik-Ebene . . . . .	103
5.2.6	Konfigurations- und Uberwachungsebene . . . . .	104
5.2.7	Test-Ebene . . . . .	105
5.2.8	Cloud-Ebene . . . . .	106
5.3	Prozessfluss innerhalb der Co-Simulation . . . . .	106
5.4	Fazit zur Architektur . . . . .	108
<b>6</b>	<b>Prototypische Umsetzung und Evaluation der Entwicklungsmethodik</b>	<b>110</b>
6.1	Beschreibung und Vorgehen für das Evaluationsbeispiel . . . . .	110
6.2	Entwicklung des Informationsstruktur-Entwurfs . . . . .	111
6.3	Entwicklung des Entitatskonzeptes . . . . .	114
6.4	Prototypische Umsetzung und Durchführung der virtuellen Validierung . . . . .	117
6.4.1	Technische Rahmenbedingungen und Entwicklungswerkzeuge . . . . .	118
6.4.2	Modellierung . . . . .	119
6.4.3	Integration des Informationsmodells . . . . .	122
6.4.4	Prozessfluss im Evaluationsszenario . . . . .	123
6.5	Fazit und Bewertung der prototypischen Umsetzung und Evaluation . . . . .	127
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>129</b>
7.1	Zusammenfassung der Arbeit . . . . .	129
7.2	Ausblick . . . . .	130
<b>A</b>	<b>Entwicklung des Entitatskonzeptes</b>	<b>132</b>
<b>B</b>	<b>Testfälle der virtuellen Validierung</b>	<b>133</b>
<b>C</b>	<b>Virtuelles Maschinencluster</b>	<b>135</b>
<b>D</b>	<b>Ressourcenmodell inklusive Informationsschicht der prototypischen Umsetzung</b>	<b>136</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>138</b>