

# Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis .....	ix
Bildverzeichnis .....	xiii
Tabellenverzeichnis .....	xvii
<b>1 Einleitung und Zielsetzung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	2
1.2 Zielsetzung .....	3
<b>2 Stand der Technik und Forschung .....</b>	<b>5</b>
2.1 Automatisierte Produktionsanlagen .....	5
2.1.1 OPC UA als Kommunikationsstandard in der Industrie .....	6
2.1.2 Referenzmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) .....	7
2.1.3 Produktionsarchitekturen .....	8
2.2 Simulation von Produktionssystemen .....	9
2.2.1 Begriffsdefinition „Simulation“ .....	9
2.2.2 Nutzen und Grenzen von Simulationen .....	10
2.2.3 Simulationsmethoden .....	12
2.2.4 Verteilte Simulation als Co-Simulation .....	15
2.2.4.1 Definition .....	15
2.2.4.2 Architektur der Co-Simulation .....	16
2.2.4.3 Mechanismen zur Kopplung der Simulationsumgebungen .....	17
2.2.4.4 Synchronisationsstrategien .....	18
2.2.4.5 Bestehende Co-Simulationsansätze zur Werkzeugkopplung	19
<b>3 Energieversorgung automatisierter Produktionsanlagen mit Gleichstrom .....</b>	<b>21</b>
3.1 Grundlagen .....	21
3.2 Gleichstrom in der Produktion .....	22
3.2.1 Bedeutung von Gleichstrom in der Industrie .....	22
3.2.2 Stand der Technik .....	23
3.2.3 Stromversorgung in der Industrie mit Gleichstrom .....	25
3.2.3.1 Grundlagen .....	25
3.2.3.2 Effizienz des Gleichstromnetzes .....	26
3.2.4 Herausforderungen für Gleichstromnetze in der Industrie .....	27
3.2.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....	29
3.2.5.1 Grundlagen der Entgeltberechnung für Privathaushalte .....	29
3.2.5.2 Grundlagen für Betriebe und Unternehmen .....	29

3.3	Smart Grids als Energieversorger der Zukunft.....	32
3.3.1	Definition eines Smart Grids .....	32
3.3.2	Abgrenzung von Smart Market und Smart Grid .....	34
3.3.3	Photovoltaikanlage als Energieerzeuger .....	35
3.3.4	Elektrische Energiespeicher .....	38
3.3.5	Prosumer .....	39
3.3.6	Anforderungen an ein Smart Grid .....	40
3.3.7	Simulation des Gleichstromnetzes mittels ereignisdiskreter Materialflusssimulation .....	41
3.3.7.1	Grundlagen .....	41
3.3.7.2	Modellierung des Energieeinflusses .....	42
4	<b>Plattform für die kombinierte Material- und Energieflusssimulation .....</b>	<b>47</b>
4.1	Zielbeschreibung: Picture of the Future .....	47
4.2	Synchronisation von Werkzeugen für eine verteilte Simulation .....	50
4.2.1	Strategie.....	50
4.2.2	Schnittstellen .....	51
4.2.3	Synchronisationsmechanismus.....	53
4.3	Umsetzung.....	54
4.3.1	Definition der Simulationsarten .....	55
4.3.2	Definition des Gesamtsystems .....	56
4.4	Informationsweitergabe .....	58
4.4.1	Datenverarbeitung.....	58
4.4.2	Informationsmodell.....	60
4.5	Ausgestaltung des Smart Grids.....	62
4.5.1	Architektur des Smart Grids.....	62
4.5.2	Energiemanagement in einem Smart Grid .....	63
4.6	Definition der Steuerungsstrategien.....	65
4.6.1	Prozesssteuerung.....	65
4.6.2	Steuerungsstrategien im intelligenten Gleichstromnetz.....	66
4.7	Auswahl geeigneter Simulationswerkzeuge für die verteilte Simulation .....	68
4.8	Implementierung der verteilten Simulation .....	70
4.8.1	Erstellung des OPC UA-Servers .....	71
4.8.2	Signalkopplung mit NX.....	71
4.8.3	Einbindung von Simulink in die kombinierte Simulation .....	72
4.8.4	Implementierung der Synchronisierung im Co-Simulationsmaster.....	75
4.8.5	Modellierung und Kopplung der virtuellen Steuerung .....	77

<b>5</b>	<b>Implementierung: Kombinierte Material- und Energieflusssimulation einer gleichstrombasierten, automatisierten Produktionsanlage .....</b>	<b>79</b>
5.1	Erstellung des Modells einer gleichstrombasierten Produktionsanlage .....	79
5.1.1	Gestaltung der Produktion .....	79
5.1.2	Verbraucher in der automatisierten Produktionsanlage .....	81
5.1.3	Definition der Energieversorgung.....	85
5.1.4	Leistungsdaten der Komponenten im Gleichstromnetz.....	86
5.2	Umsetzung der Prozesssimulation.....	88
5.2.1	Multiphysikalische Simulation .....	88
5.2.1.1	Modellierung des funktionalen Modells der Komponenten..	89
5.2.1.2	Simulation .....	93
5.2.2	Plant Simulation.....	94
5.2.2.1	Abbildung der Anlage .....	94
5.2.2.2	Energieverbrauch auf Anlagenebene.....	95
5.2.3	Programmierung .....	96
5.2.3.1	Ablaufsteuerung .....	96
5.2.3.2	Mensch-Maschinen-Schnittstelle .....	97
5.3	Modellierung des Gleichstromnetzes .....	98
5.3.1	Modellierung der PV-Anlage als volatile Energiequelle .....	99
5.3.2	Modellierung des Netzbausteins .....	100
5.3.3	Modellierung des Akkumulators als Energiespeicher .....	101
5.3.4	Modellierung und Simulation des Akkus mit MATLAB Simulink.....	104
5.4	Kombinierte Simulation .....	107
5.4.1	Starten der kombinierten Simulation .....	107
5.4.2	Gesamtmodell der verteilten Simulation .....	109
5.4.3	Anhalten der kombinierten Simulation .....	111
5.5	Diskussion.....	111
5.5.1	Arbeit in bekannten Simulationswerkzeugen.....	111
5.5.2	Entkopplung von Prozess und Infrastruktur .....	112
5.5.3	Vereinfachung in den Komponenten der Elektrotechnik .....	113
5.5.4	Integration von Betriebsdaten zur Erstellung einer betriebsbegleitenden Simulation .....	115
<b>6</b>	<b>Validierung der kombinierten Simulation anhand verschiedener Testszenarien .....</b>	<b>117</b>
6.1	Regelbetrieb der Anlage .....	117
6.1.1	Veränderung des Produktionsablaufs.....	117
6.1.2	Preismodell .....	121

6.2	Bewertung der Simulation anhand von Testfällen .....	123
6.2.1	Vorbemerkung zum Verhalten des Akkumulators .....	123
6.2.2	Anwendungsfall 1: Regelbetrieb der Anlage.....	123
6.2.2.1	Bezug der Energie aus dem Versorgungsnetz .....	123
6.2.2.2	Nutzung der aus der PV-Anlage eingebrachten Leistung.....	126
6.2.2.3	Nutzung des gesamten Gleichstromnetzes .....	129
6.2.2.4	Nutzung des Akkumulators .....	130
6.2.3	Anwendungsfall 2: Ausfall des versorgenden Netzwerks .....	131
6.2.4	Anwendungsfall 3: Reaktion der Anlage auf die Sicherheitsfunktion Nothalt .....	134
6.3	Bewertung der Plattform der verteilten Simulation.....	135
6.4	Einordnung in RAMI 4.0 .....	137
7	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>141</b>
8	<b>Summary and outlook.....</b>	<b>145</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>149</b>