

Eva Russwurm

Kombinierte Material- und Energieflusssimulation gleichstrombasierter,
automatisierter Produktionsanlagen

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 451

Herausgeber/-innen:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Eva Russwurm

Kombinierte Material- und Energieflusssimulation gleich- strombasierter, automatisierter Produktionsanlagen

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik (FAPS) Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen

FAU University Press

2024

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.

Kontakt: Eva Russwurm, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, ( <https://ror.org/oof7hpc57>), <https://orcid.org/0009-0000-0129-7780>

Bitte zitieren als

Russwurm, Eva. 2024. *Kombinierte Material- und Energieflusssimulation gleichstrombasierter, automatisierter Produktionsanlagen*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 451. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-771-5

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren. Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über OPEN FAU der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar: <https://open.fau.de/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-770-8 (Druckausgabe)

eISBN: 978-3-96147-771-5 (Online-Ausgabe)

ISSN: 2625-9974

DOI: 10.25593/978-3-96147-771-5

**Kombinierte Material- und Energieflusssimulation
gleichstrombasierter, automatisierter
Produktionsanlagen**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Eva Russwurm, M.Sc.

aus Kronach

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 10.06.2024

Gutachter/in: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke Prof.
Dr. rer. nat. Sabina Jeschke

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke danke ich für die gute und wertvolle, konstruktive Zusammenarbeit während meiner Zeit am Lehrstuhl, die verschiedenen Einblicke in diverse zukunftsorientierte Themenfelder und die Herausforderung rund um die Aufgaben im Bereich Outreach und in der Lehre. Weiterhin bedanke ich mich für die Möglichkeit der Durchführung verschiedener wissenschaftlicher Arbeiten, das Vertrauen in der Kooperation mit den Industriepartnern und die Gelegenheit sowie die Motivation zur Promotion.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Industriepartnern, die mich im Rahmen der Forschungsarbeit unterstützt und immer wieder mit konstruktiven und ertragreichen Diskursen und Diskussionen herausgefordert haben. Diese Gespräche haben wesentlich zur Erreichung der Forschungsergebnisse beigetragen.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen, die mich während der Arbeit am Lehrstuhl und bei der Bearbeitung von Forschungsthemen begleitet haben. Allen voran geht der Dank an den Forschungsbereich Engineering-Systeme. Die inhaltlichen Diskurse waren sehr wertvoll. Besonders hervorheben möchte ich hier die Zusammenarbeit und Freundschaft mit Florian Faltus, Matthias Brossog, Jonathan Fuchs, Andreas Blank und Jochen Zeitler, ohne die ich mir eine Promotion nicht zugetraut hätte und das wissenschaftliche Arbeiten nicht so produktiv gewesen wäre.

Auch allen Studierenden, deren Arbeiten wertvolle Beiträge zu Forschungsaktivitäten geleistet haben, danke ich vielmals. Insbesondere möchte ich mich aber bei Sebastian Anders bedanken, dessen herausragende Talente, Fähigkeiten und Interessen ihn zu einem wichtigen Diskussionspartner gemacht haben.

Ein besonderer Dank gilt meinen Freundinnen und Freunden, meinen Eltern und meiner Familie, auf deren Rückhalt ich mich stets verlassen kann, für die Begleitung und Unterstützung.

Bamberg, im Juli 2024

Eva Russwurm

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis ix

Bildverzeichnis..... xiii

Tabellenverzeichnis xvii

1 Einleitung und Zielsetzung 1

1.1 Motivation..... 2

1.2 Zielsetzung..... 3

2 Stand der Technik und Forschung 5

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 Werkzeugkopplung19

3 Energieversorgung automatisierter Produktionsanlagen mit Gleichstrom 21

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	Plattform für die kombinierte Material- und Energieflusssimulation	47
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

5	Implementierung: Kombinierte Material- und Energieflusssimulation einer gleichstrombasierten, automatisierten Produktionsanlage	79
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
6	Validierung der kombinierten Simulation anhand verschiedener Testszenarien	117
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	Zusammenfassung und Ausblick	141
8	Summary and outlook	145
	Literaturverzeichnis	149

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
C	F	Kapazität
$E_{E1...En}$	kWh	Energieinhalt der Speicher
I	A	Stromstärke auch: Lade- und Entladestrom
K_{Strom}	€/kWh	Strompreis pro kWh
P	W	Leistung
$P_{A1...An}$	W	Energiebedarf der einzelnen Anlage
$P_{E1...En}$	W	Einspeiseleistung der Energiequellen
P_{Ges}	W	Kumulierte Leistung aller Verbraucher
P_{Leerlauf}	W	Leistungsbedarf im Leerlauf
P_{Nenn}	W	Nennleistung
P_{Netz}	W	Energiebezug aus dem Versorgungsnetz
P_{Standby}	W	Leistungsbedarf im Zustand des Standby
$P_{Z1...Zn}$	W	Energiebedarf der einzelnen Zellen
R	Ω	ohmscher Widerstand
R_{Ges}	Ω	ohmscher Widerstand über der kumulierten Leistung aller Verbraucher

SoC	%	State-of-Charge (Ladezustand der Energiespeicher)
t_R	s	Reaktionszeit
U	V	Spannung
U_{Nenn}	V	Nennspannung
$Z_{A1...An}$		Zustand der einzelnen Anlage
Z_{m_AP}		Zustand des manuellen Arbeits- platzes (AP)
Z_{Prozess}		Zustand des Gesamtprozesses
$Z_{Z1...Zn}$		Zustand der einzelnen Zellen

Abkürzung	Bezeichnung
AFE	Active Front End
ALM	Active Line Module
APA	Automatisierte Produktionsanlage
BE	bewegliche Elemente
CPS	cyber-physische Systeme
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EU	Europäische Union
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
FMI	Functional Mock-Up Interface
HLA	High Level Architecture
HMI	Human-Machine-Interface
IGBT	steuerbare Leistungshalbleiter
IR	Industrieroboter
kWp	Kilowatt-Peak
MCD	Mechatronics Concept Designer (in NX)
OPC	Open Platform Communications
PLC	Programmable Logic Controller (engl. für SPS)
PV	Photovoltaik
RAMI 4.0	Referenzmodell Industrie 4.0
SOAP	Simple Object Access Protocol
SoC	State-of-Charge
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Tool-Center-Point

TIA-Portal	Totally Integrated Automation Portal
TS	Teilschritte
UA	Unified Architecture
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme
WT	Werkstückträger
Zy	Zyklus

Bildverzeichnis

Bild 1:	Referenzmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) [18, S. 19]	7
Bild 2:	Kostenbeeinflussung [31, S. 135].....	11
Bild 3:	Klassifikation von Simulationsmethoden [35, S. 17]	12
Bild 4:	Darstellung unterschiedlicher Simulationsarten in Anlehnung an [36, 37].....	13
Bild 5:	Simulationsarten nach [34, S. 46].....	13
Bild 6:	Kopplung von Simulationswerkzeugen in Anlehnung an [11]	17
Bild 7:	Kommunikationsstrukturen bei der Kopplung von Simulationswerkzeugen nach [11].....	18
Bild 8:	Prinzipskizze eines Zwischenkreises in Anlehnung an [68] ..	24
Bild 9:	Darstellung der Energieumwandlungen im Wechselstromnetz nach [69]	24
Bild 10:	Mögliche Anordnung zweier Antriebe bei Verwendung eines Gleichstromnetzes in der Fertigung in Anlehnung an [69]	25
Bild 11:	Gleichspannungsnetz mit verschiedenen Komponenten in Anlehnung an [71]	26
Bild 12:	Strompreisentwicklung für deutsche Endverbraucher in Eurocent nach [80]	29
Bild 13:	Zusammensetzung der Energiekosten in einem Unternehmen nach [81]	30
Bild 14:	Gesamte elektrische Arbeit (links) und höchste Lastspitze (rechts) als Berechnungsgrundlagen für Arbeits- und Leistungsentgelt [81]	31
Bild 15:	Darstellung der Einflussfaktoren und Eigenschaften auf ein Smart Grid.....	34
Bild 16:	Abgrenzung des Begriffs Smart Grid vom Begriff des Smart Market [90].....	34
Bild 17:	Entwicklung der Stromerzeugung in Deutschland nach [94, S. 7, 96].....	36

Bild 18:	Wirkprinzip und Aufbau einer Solarzelle, in Anlehnung an [97].....	37
Bild 19:	Potentiale zu Energiegehalt, Leistung und Entladezeit im Überblick in Anlehnung an [97, S. 398].....	38
Bild 20:	Werkzeugunabhängige Architektur der Co-Simulation	50
Bild 21:	Darstellung der Art der Simulationen entlang der Hierarchieachse des RAMI 4.0	55
Bild 22:	Darstellung der Umsetzung der verteilten Simulation	57
Bild 23:	Schematische Darstellung der Datenverarbeitung in der verteilten Simulation	58
Bild 24:	Schematische Darstellung der Informationsweitergabe	59
Bild 25:	Grafische Darstellung der Datenweitergabe in der kombinierten Simulation	61
Bild 26:	Gleichstromnetz mit DC-Sektoren nach [58]	62
Bild 27:	vollständige Übersicht über die verteilte Simulation.....	68
Bild 28:	Implementierung der verteilten Simulation mit den ausgewählten Simulationswerkzeugen	70
Bild 29:	Anlegen eines OPC UA-Clients in Simulink.....	73
Bild 30:	Nutzung des OPC UA-Clients in Simulink.....	74
Bild 31:	Methode für die Zeitsynchronisierung	76
Bild 32:	Schematischer Aufbau der APA mit allen Komponenten.....	80
Bild 33:	Prozessanalyse für die APA	81
Bild 34:	Lastprofil des IR	82
Bild 35:	Kumulierter Leistungsbedarf der APA über der Zeit für einen Zyklus	83
Bild 36:	Darstellung des Leistungsbedarf der einzelnen Komponenten über der Zeit	84
Bild 37:	Darstellung des Aufbaus des intelligenten Smart Grid für die Werksebene.....	85
Bild 38:	Leistung der PV-Anlage an einem typischen sonnigen Sommertag	87

Bild 39:	Leistung der PV-Anlage an einem typischen Wintertag.....	88
Bild 40:	Schematische Darstellung der Anlage	91
Bild 41:	Funktionales Modell der APA in NX.....	92
Bild 42:	Darstellung des Produktionsprozesses in Plant Simulation ..	94
Bild 43:	Auflistung und Erstellung der Anwenderkonstanten im TIA-Portal.....	96
Bild 44:	HMI zur Überwachung der APA	98
Bild 45:	Dialogfenster zur Auswahl des Tageszeitpunktes	100
Bild 46:	Modellierung und Definition des Bausteins zum Akkumulator in Plant Simulation	102
Bild 47:	Ladezustand über den Entlade- und Ladevorgang des Akkumulators.....	103
Bild 48:	Modellierung der Energieversorgung in Plant Simulation ...	103
Bild 49:	Darstellung der Ladesimulation in MATLAB Simulink	104
Bild 50:	Ermittlung der äquivalenten Lastwiderstände für die Zustände der Lötanlage	105
Bild 51:	Darstellung des Modells des Akkumulators in MATLAB Simulink	106
Bild 52:	Subsystem zur Simulation des Verhaltens des Akkus.....	107
Bild 53:	Methode zum Ausführen der Simulation der Energieversorgung	108
Bild 54:	Übersicht über die Werkzeuge in der kombinierten Simulation	110
Bild 55:	Darstellung eines AFE-Umrichters mit IGBT als Halbleiterbauelemente	114
Bild 56:	Leistungsbedarf der APA über der Zeit.....	118
Bild 57:	Aufzeichnung der Gesamtlast über der Zeit als Summe der Verbraucher	118
Bild 58:	Darstellung der einzelnen Lastbedarfe über der Zeit.....	119
Bild 59:	Darstellung der mittleren Leistung mit dem gesamten Leistungsbedarf der APA	122

Bild 60:	Modellierung des Verhaltens der Lötanlage in Plant Simulation	124
Bild 61:	Energiebedarf der Ressourcen als Dialogfenster in Plant Simulation	125
Bild 62:	Leistungsbezug der Verbraucher aus Plant Simulation	126
Bild 63:	Leistung der PV-Anlage über einen durchschnittlichen Tag	127
Bild 64:	Darstellung des Energiebedarfs, der nicht durch das Netz gedeckt wird	128
Bild 65:	Entladung des Akkumulators (SoC) in Simulink	132
Bild 66:	Entladung des Akkumulators anhand des Modells in Plant Simulation	133
Bild 67:	Abbildung des RAMI 4.0 nach Plattform Industrie 4.0 und ZVEI	137

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Simulationsmethoden und deren Anwendungsgebiete nach [38].....	14
Tabelle 2: Systematisierung der Simulationsvarianten nach [11]	15
Tabelle 3: Bewertung der Modellierung mittels unterschiedlicher Objekte	44
Tabelle 4: Koppelsignale zum OPC UA-Server für den Prozess	52
Tabelle 5: Variablen aus dem Energiemanagement	52
Tabelle 6: Ergänzung der Variablen für die Zeitskalierung.....	54
Tabelle 7: Darstellung der technischen Daten unabhängig von der Ausgestaltung der APA.....	60
Tabelle 8: Ausbaustufen des Leistungsflussmanagements nach [58]	64
Tabelle 9: Softwarekomponenten der verteilten Simulation	69
Tabelle 10: Anpassung der Variablennamen an die verwendeten Softwarewerkzeuge	75
Tabelle 11: Leistungskenndaten der Verbraucher.....	82
Tabelle 12: Leistungsdaten der Komponenten des Gleichstromnetzes ...	86
Tabelle 13: Gegenüberstellung des Energiebedarfs und der produzierten Leiterplatten den ursprünglich geplanten und veränderten Produktionsprozess in der Anlage.....	120

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Digitalisierung in der Industrie führt dazu, dass Mensch, Maschine und Prozesse eng miteinander vernetzt sind und untereinander kommunizieren. [1] Dies betrifft nicht nur die Industrie, sondern hält zunehmend auch im privaten Alltag Einzug. Musik und Videos werden nicht mehr als CD und DVD gekauft, es sind diverse Streaming-Plattformen entstanden. Das eigene Auto übermittelt mit der verbauten Sensorik den Zustand an den Servicebetrieb und vereinbart selbstständig einen Termin zur Reparatur, dem der Nutzer eigentlich nur widersprechen muss, falls er ungelegen kommt. Während noch vor einigen Jahren im Anlagenbau die Mechanik vorherrschend war, hat diese Rolle nun die Software übernommen. [2] Blickt man auf den Automatisierungsgrad in den Fertigungshallen entdeckt man vereinzelt die Anwendung moderner Technologien, die Unternehmen sind allerdings weit von einer durchgängigen Digitalisierung und vollständigen Automatisierung der Gesamtprozesse entfernt. [3] Folglich steht Deutschland vor großen Herausforderungen, wenn bestehendes Wachstumspotential weiterhin genutzt werden soll. Angesichts des steigenden Wettbewerbs- und Kostendrucks, den verkürzten Planungs- und Realisierungszeiten sowie den gestiegenen Anforderungen an die Flexibilität von Prozessen entstehen in der produzierenden Industrie zunehmend automatisierte Produktionssysteme, welche durch eine hohe technische Komplexität geprägt sind. [P1, 4] Diese Herausforderungen müssen bewältigt werden. Hierfür wird ein digitales Abbild aus allen während des Fertigungsprozesses entstandenen Daten genutzt um Informationen zu erhalten, die dann zur technologischen Gestaltung und Optimierung genutzt werden. [5]

Eine weitere Herausforderung betrifft die Energieversorgung. Die Europäische Union (EU) verfolgt das Ziel, bis zum Jahr 2030 die Treibhausgasemissionen um mindestens 40 % zu verringern, den Anteil an erneuerbaren Energien auf 32 % zu erhöhen und damit die Energieeffizienz um 20 % zu steigern [6]. Deutschland nimmt hier eine Vorreiterrolle ein, denn im Jahr 2022 lag der Anteil an erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch in Deutschland bereits bei 48,3 %. Bis 2030 hat sich die Bundesregierung vorgenommen, diesen Anteil auf 80 % zu erhöhen. [7] Eine der wichtigsten Herausforderungen bei der Umsetzung der Ziele und Strategien ist die Volatilität der regenerativen Energiequellen wie beispielsweise Photovoltaik-Anlagen oder Windkraftwerke. An diese Veränderung muss die Energieversorgung grundsätzlich angepasst werden. [8] Diese Verantwortung

wird an die produzierenden Unternehmen weitergegeben. Zukünftig wird also der Energieversorgung für die Produktionsinfrastruktur eine bedeutende Rolle zukommen. Durch ein eigens an die verwendeten Produktionsanlagen angepasstes Energiemanagement und einer Kombination aus Energiespeichern und -wandlern, welche zusätzlich zur Energieversorgung aus dem Versorgungsnetz genutzt werden, ist es für die Unternehmen möglich, die Produktion effizient und optimal mit Energie zu versorgen. [9] Es werden Speichertechnologien in Form von Akkumulatoren oder Kondensatoren in die Anlagen integriert, wodurch intelligente Stromnetze, sogenannte Smart Grids, in den Fertigungshallen entstehen. [P1] Für eine ganzheitliche Betrachtung einer Produktionsanlage im Rahmen der Digitalen Fabrik spielen sämtliche genannte Aspekte eine wichtige Rolle. Ziel ist es unter der Nutzung digitaler Modelle, Planungsprozesse zu beschleunigen, Qualität zu erhöhen und Kosten zu senken. [4]

1.1 Motivation

Beim Produktentstehungsprozess handelt es sich um einen komplexen Prozess, der aus verschiedenen Schritten besteht. Einen davon bildet die Produktentwicklung. Sie wird durch verschiedene Werkzeuge, insbesondere durch die virtuelle Abbildung des Produktes, begleitet, denn die Virtualisierung von Produktionsanlagen ist eine bedeutende Technologie, die den Anforderungen der Industrie 4.0 Rechnung trägt. [4] Beispielsweise lassen sich Anwenderprogramme so bereits frühzeitig durch die virtuelle Inbetriebnahme in einem einzigen Werkzeug validieren und anschließend optimieren. Die durch einen weiteren Fokus auf deren Energieversorgung zunehmende Komplexität automatisierter Systeme muss auch in der Simulationsumgebung abgebildet werden. Dies hat zur Folge, dass mehrere Planungs- und Simulationswerkzeuge genutzt werden, diese untereinander mit Wechselwirkungen umgehen müssen und deshalb über einen komplexen Aufbau verfügen. Große Systeme sollen bei steigender Komplexität in Modelle gegliedert werden, in welchen mit konkreten Simulationen einzelne Fragestellungen beantwortet werden können. Damit reduziert sich die Komplexität einer einzelnen Simulation zulasten der nicht berücksichtigten Wechselwirkungen. [P1] Ein ganzheitliches Abbild der Produktionsanlage und der notwendigen Energieversorgung unter Berücksichtigung gegenseitiger Einflüsse ist nur durch eine gekoppelte Gesamtsimulationsplattform möglich. [P2] Hierfür gibt es bereits verschiedene Ansätze.

Der vermehrte Einsatz erneuerbarer Energiequellen führt zu einem Umdenken, weg von zentralen Ansätzen, hin zur dezentralen Energieversorgung, denn dezentrale Versorgungsknoten vereinfachen die Integration erneuerbarer Energiequellen und nutzen direkt deren Potenzial. Um die maximale Effizienz dieser dezentralen Energieversorgung zu erreichen, verspricht die Umstellung auf Gleichstromtechnik eine gesamtwirtschaftliche Netzeffizienz von 90% statt den aktuellen 56% [10]. Erreicht wird dies in der Industrie durch Nutzung von Energiequellen, die Gleichstrom in einen eigens für die Anlage oder die Produktionshalle eingerichteten Gleichstromkreis einspeisen und so die Vermeidung von ineffizienten Gleichrichtern fördern, da die meisten Anlagen gleichstrombasiert arbeiten können.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, mittels einer kombinierten Simulation, Simulationsmodelle zu Materialfluss und -bearbeitung mit einem Modell zur Energieversorgung, die aus dem Netz, Energiespeichern und -quellen besteht, zu koppeln. Folglich befasst sich die vorliegende Dissertation mit der kombinierten Material- und Energieflusssimulation gleichstrombasierter, automatisierter Produktionsanlagen. Konkret soll überprüft werden, ob die geplante Kombination aus Energiespeichern, -quellen und der Netzversorgung für eine Produktionsanlage effizient ist und eine vorgegebene, aus dem Netz entnommene Energiemenge nicht überschritten wird. Dazu soll eine kombinierte Simulation entwickelt werden, mit der es möglich ist, sowohl die Produktion, den Material-, als auch den Energiefluss zu modellieren und dabei die dazwischen auftretenden Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Ziel ist es, kein vollständig neues Werkzeug zu kreieren, sondern vorhandene und bereits genutzte einzubinden, so dass der Mehraufwand für die Erstellung des kombinierten, ganzheitlichen Modelles gering ausfällt. Denkbar ist eine verteilte Simulationsumgebung, welche die bestehende zu einer Plattform koppelt.

Daraus ergibt sich folgende Forschungsthese: Mit der verteilten Simulation ist es möglich, die Energieversorgung durch Gleichstrom zu planen, so dass eine bestimmte Produktionsanlage effizient mit Energie versorgt wird. Dabei sollen die Ergebnisse der einzelnen Simulationen aus den verschiedenen Disziplinen genutzt und Einflussfaktoren berücksichtigt werden.

Mit Blick auf diese Zielsetzung werden in Abschnitt 2 die Grundlagen für Produktionsanlagen im Allgemeinen, die Simulation und die virtuelle Inbetriebnahme erläutert. Dazu werden mögliche Arten der Simulation und

eine Simulationsmethodik vorgestellt, die für die vorliegenden Aufgaben genutzt werden könnte. Weiterhin werden in Abschnitt 3 die Grundlagen für die Etablierung eines Gleichstromnetzes in der Industrie auf Basis der bereits bekannten Vorteile gezeigt und eine sinnvolle Definition für ein Smart Grid in der Fertigung aufgestellt. In Abschnitt 4 wird die Grundlage für die verteilte Simulation gelegt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sowohl der Prozessablauf der Anlage als auch das Energieversorgungsnetz simuliert werden müssen. Dazu werden mögliche Simulationswerkzeuge ausgewählt und die Plattform für die Werkzeugkopplung vorgestellt wird. Im anschließenden Abschnitt 5 werden die ausgewählte Anlage und das zugehörige Energienetz jeweils als Subsysteme in den passenden Simulationswerkzeugen modelliert. Dabei wird auch das Anwenderprogramm, also die Ablaufsteuerung sowohl für das Prozess- als auch das Energiemanagement erstellt. Abschnitt 6 beschreibt den begleitenden Schritt der Validierung anhand verschiedener Testszenarien. Hier werden die entstandenen Simulationsergebnisse auf Plausibilität geprüft und gegen theoretische Berechnungen validiert. Dazu werden klassische Anwendungsfälle ausgewählt und deren Funktionalitäten getestet sowie die Forschungsfrage beantwortet. Der Abschnitt 7 gibt eine Zusammenfassung und einen Ausblick und rundet damit die Arbeit ab.

2 Stand der Technik und Forschung

In diesem Kapitel werden in der Arbeit verwendete wichtige Begriffe vorgestellt und definiert. Die genannten Definitionen bilden die Grundlage für die weiteren Ausführungen.

Zu Beginn werden die Grundlagen für automatisierte Produktionssysteme beschrieben und erläutert. Im darauffolgenden Kapitel erfolgt eine Einordnung des Einsatzes der Simulation im industriellen Umfeld, wobei auf Basis einer geeigneten Definition verschiedene Arten der Simulation eingegrenzt und eine Methodik zur Durchführung einer simulationsgestützten Studie aufgezeigt werden. Abschließend wird die Co-Simulation thematisiert und der Stand der Technik dazu aufgezeigt. Am Übergang zwischen der Simulation einer Produktionsanlage und der realen Inbetriebnahme steht die virtuelle Inbetriebnahme. Definition, Vorgehen und Nutzen dieser werden im folgenden Abschnitt erläutert, ehe die Grundlagen zum Einsatz von Gleichstrom in der Industrie beschrieben und aufgezeigt werden.

2.1 Automatisierte Produktionsanlagen

In der VDI-Richtlinie 4499 werden die Komponenten des digitalen Fabrikbetriebs und deren Anwendung auf zwei wesentliche Anwendungsfelder beschränkt, nämlich den digitalen Betrieb von Einzelmaschinen (Werkzeugmaschinen) und den digitalen Betrieb automatisierter Produktionsanlagen (APA). Hier wird auch festgehalten, dass insbesondere die virtuelle Inbetriebnahme und die betriebsbegleitende (Realzeit-)Simulation wichtige Komponenten des Digitalen Fabrikbetriebs bilden. [11] Dazu ist es wichtig, zunächst zu definieren, welche Systeme und welche Komponenten für eine digitale Abbildung einer Produktionsanlage und der Peripherie notwendig sind. In der Regel handelt es sich bei Produktionsanlagen um mechatronische Systeme. Ein mechatronisches System besteht aus einem Grundsystem, Sensoren, Aktoren und einer Informationsverarbeitung. Die physikalischen Größen des Grundsystems und der Zustand der Umgebung werden durch Sensoren erfasst. Die daraus resultierenden Signale bilden die Eingangsgrößen für die Informationsverarbeitung. Es entstehen adaptive, technische Systeme, welche auf Änderungen ihrer Umwelt reagieren und „Abläufe, die nur schwer steuerbar sind, durch Einsatz der Regelungstechnik [...] optimieren“ [12]. Ist die Informationsverarbeitung des Systems über ein Kommunikationssystem mit einer weiteren verbunden, so ergeben

sich vernetzte Systeme. Durch die synergetische Integration mechatronischer Module entstehen im Rahmen der Modularisierung komplexe, oftmals über mehrere hierarchischen Ebenen strukturierte, mechatronische Systeme. [12] Handelt es sich um eine automatisierte Produktionsanlage, ist es möglich, dass die Anlage eine Zeit lang autonom produziert. Dies ist nur durch ein komplexes Zusammenwirken, das sowohl Prozessinformationen als auch Produktionsdaten umfasst, möglich. Zur Kommunikation mit Anlagen oder für die Anlagen untereinander hat sich in der Industrie OPC UA als Kommunikationsstandard herausgebildet.

2.1.1 OPC UA als Kommunikationsstandard in der Industrie

Innerhalb der produzierenden Industrie gilt das Ziel, effektiver, kostengünstiger und zeitsparender zu arbeiten, für alle Funktionsbereiche. Mit der steigenden Relevanz der Prozessautomatisierung hat die Anzahl der verwendeten Kommunikationsprotokolle und Bussysteme sowie die Komplexität von Automatisierungssoftware stark zugenommen. Dies erhöht die Notwendigkeit einer standardisierten Schnittstelle, welche die Kommunikation zwischen mehreren Komponenten sicherstellt. Open Platform Communications (OPC) ist ein Kommunikationsprotokoll für die Industrie 4.0, das standardisierten Zugriff auf Geräte, Maschinen und andere Systeme im industriellen Umfeld ermöglicht und das insbesondere im Zusammenhang mit Konzepten der „Industrie 4.0“ Verbreitung gefunden hat. Durch die standardisierte Schnittstelle zwischen Steuerungssystemen in der Produktion und der Steuerungsebene wird Datenaustausch unabhängig von Herstellern ermöglicht. Von OPC gibt es bereits verschiedene Spezifikationen. Die aktuelle Spezifikation Unified Architecture (UA) unterscheidet sich von Vorgängern durch die Nutzung der rein binären Kommunikation über TCP/IP und die Kommunikation über das Simple Object Access Protocol und der damit einhergehenden Erweiterung der Schnittstellenbeschreibung. [13–15]

Die Nutzung von OPC UA beruht auf einer in der klassischen IT weit verbreiteten Client-Server-Architektur. Moderne Steuerungen verfügen in der Regel zur Kommunikation nach außen über OPC-Schnittstellen, verhalten sich also wie ein OPC-Server, über den der Zugang zu Steuerungsdaten möglich ist. Das logische Gegenstück zum OPC-Server ist der OPC-Client. Über die Verbindung zwischen Client und Server werden alle Daten ausgelesen, die der Server bereitstellt und der Client benötigt. Die Standardisierung der Schnittstellen der OPC-Server ermöglicht herstellerunabhängig dem Client den Zugriff auf jeden beliebigen Server. [13]

Sämtliche Schnittstellen der klassischen OPC basieren auf der COM- und DCOM-Technologie von Microsoft, was die Notwendigkeit zur Definition verschiedener Programmierschnittstellen für unterschiedliche Bedürfnisse reduziert. So ist die Definition eines Netzwerkprotokolls nicht mehr notwendig und die Transparenz der COM- und DCOM-Objekte ermöglicht es, Methoden in verschiedenen Prozessen aufzurufen. Das verkürzt sowohl die Entwicklungszeit für Produkte und Spezifikationen als auch die Time-to-Market für OPC. [14, 15]

Dass der Kommunikation zur Umsetzung von Industrie 4.0-Standards eine wichtige Bedeutung zukommt, zeigt sich im Referenzmodell Industrie 4.0.

2.1.2 Referenzmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0)

Das Referenzmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0), das in Bild 1 dargestellt ist, bildet eine Weiterentwicklung der Automatisierungspyramide, denn die Digitalisierung des Industriesektors macht neue Modelle hinsichtlich der Darstellung und Einordnung von Technologien und Systemen erforderlich.

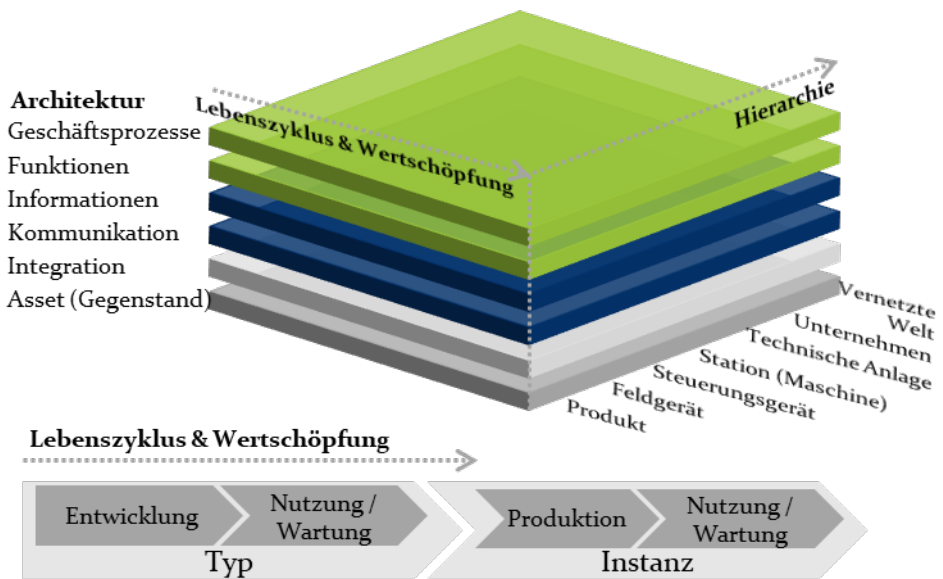


Bild 1: Referenzmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) [16, S. 19]

Es löst die klassische Automatisierungspyramide ab und ergänzt sie um zwei Dimensionen, nämlich um die prozessbezogene (Lebenszyklus und Wertschöpfung) und um die funktionsbezogene Hierarchieebene. Die notwendigen Elemente werden in einem Würfel visualisiert.

Folgende Betrachtungsweisen führen zu den Dimensionen der drei Achsen [17]:

- Lebenszyklus- und Wertschöpfung (Life Cycle and Value Stream)
- Hierarchie (Hierarchy Levels)
- Architektur (Layer)

Innerhalb der Produktion verändern sich nicht nur die Kommunikation in den Unternehmen und werden Daten zunehmend digitalisiert, es wird zusätzlich beispielsweise eine Peripherie mit Komponenten für die Energieversorgung der Prozesse in die Architekturen aufgenommen. Außerdem führt die Nutzung cyber-physischer Systeme (CPS) zu neuen Möglichkeiten in der Fertigung, so dass sich die Produktionsarchitekturen grundsätzlich ändern.

2.1.3 Produktionsarchitekturen

Aufgrund von flexiblen Fertigungsanlagen mit Robotiklösungen und sehr flexiblen und agilen Logistiksystemen mit beispielsweise fahrerlosen Transportsystemen ist es möglich, Konzepte einer modularen Fertigung umzusetzen. [18] Es wird anhand der grundlegenden Steuerungsphilosophie zwischen der zentralen und der dezentralen Produktionsarchitekturen unterschieden.

Die zentrale Produktionsarchitektur ist die momentan vorrangig eingesetzte Architektur. Hier wird eine zentrale Steuerungseinheit eingesetzt und dafür werden die Szenarien zu Beginn eines Auftrags festgelegt. Gesteuert werden die einzelnen Produktionsschritte der Anlagen dabei zumeist ereignisbasiert. Die Steuerung übernimmt die Koordination für alle beteiligten Anlagen in der Produktion und wird im Voraus aufgrund von Annahmen aus den Erfahrungen der Vergangenheit geplant. Vorteile hiervon sind die ständige Kontrolle vieler verschiedener Aufträge und die hohe Auslastung der Fertigung. Da jedoch nur sehr spät auf Abweichungen reagiert werden kann, ist eine situative Anpassung notwendig. [19]

Im Gegensatz dazu sieht der dezentrale Ansatz eine Verteilung der Steuerungsfunktionen auf verschiedene Komponenten, in RAMI 4.0 werden sie als Assets bezeichnet, vor. Diese übernehmen maßgeblich die eigene Koordination, indem sich die lokalen Instanzen autonom organisieren. Folglich sind hier mehrere Steuerungseinheiten verfügbar. Häufig wird in diesem Fall mit Steuerungen aus der Cloud gearbeitet. Dies führt zwar zu einer hohen Komplexität, aber auch zu einer hohen, notwendigen Flexibilität in

der Produktion. Die einzelnen Komponenten sind durch ein Kommunikationssystem, welches die Produktion in Echtzeit überwacht und anpasst, miteinander verbunden. Als Ziele werden auch hier die Steigerung der Ausbringungsmenge und der Auslastung genannt. Der Fokus liegt jedoch darauf, auf Veränderungen unverzüglich reagieren zu können. [19, 18]

Um auftretende Szenarien und die Reaktionen der Anlagen darauf im Vorfeld der Inbetriebnahme testen und optimieren zu können, werden Simulationen genutzt. Diese können bereits in der Planung eingesetzt werden. Im Folgenden soll die Simulation von Produktionssystemen beleuchtet werden.

2.2 Simulation von Produktionssystemen

Simulationen werden in der Planung und Entwicklung von Anlagen genutzt und begleiten den Betrieb technischer Systeme in deren Lebenszyklus weiter. Ursprünglich lag der Schwerpunkt zur Anwendung der Simulation vorrangig auf der Planungsabsicherung. Im Laufe der Zeit wurde jedoch die Absicherung durch die Simulation im Realisierungsprozess immer bedeutender. Mit Anwendung der Simulation werden die geplanten, noch nicht aufgebauten Systeme sowie die realen Anlagen untersucht und analysiert, um so Erkenntnisse über die Verfügbarkeit, das Anlagenverhalten und den Betrieb zu erhalten. Die Analysen werden so durchgeführt, ohne in den Entwicklungsprozess oder Betrieb der Anlagen eingreifen zu müssen. Verbundene Entwicklungsumgebungen und eingebundene Simulationswerkzeuge sorgen dafür, dass stets die aktuellen Daten genutzt und weiterverarbeitet werden. Darüber hinaus bieten Simulationswerkzeuge die Möglichkeit, verschiedene, denkbare Varianten an Systemen mit geringem Arbeitsaufwand zu untersuchen und deren Systemverhalten über einen längeren Zeitraum hinweg zu betrachten. [20] Ebenso ist es denkbar, Anlagen im Laufe des Lebenszyklus zu beobachten, indem viele Arbeitszyklen simuliert werden.

In diesem Kapitel sollen der Begriff der Simulation definiert und verschiedene Arten der Simulation aufgezeigt werden.

2.2.1 Begriffsdefinition „Simulation“

Die VDI-Richtlinie 3633 beschreibt die Simulation als das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit

übertragbar sind“ [20]. Damit lässt sich die Simulation durch die Betrachtung und Analyse komplexer und dynamischer Zusammenhänge gegenüber unterschiedlichen analytischen Methoden abgrenzen [21]. Die Simulation ist maßgeblich durch die Modellierung von Wechselwirkungen über die Zeit sowie die „Berücksichtigung stochastischer [...] Aspekte bei der Abbildung des Systemverhaltens“ [22] gekennzeichnet. Zusätzlich wird in der Literatur die Simulation als „Problemlösungsmethode, bei der durch Experimente mit Simulationsmodellen Aussagen über das Verhalten der durch die Modelle beschriebenen Systeme gewonnen werden“ [23] bezeichnet. Bei der Modellbildung beschränkt man sich auf die für die Simulation relevante Detaillierung des Systems. Komponenten oder Eigenschaften, „die für die Untersuchung des Systems nicht relevant sind, werden bei der Bildung des Modells weggelassen“ [23]. Die Modelle werden hinsichtlich unterschiedlicher Eigenschaften untersucht und analysiert, um das Wissen über Einzelkomponenten oder das Gesamtmodell zu erweitern und zu verfeinern. Sämtliche Ergebnisse werden im Nachgang interpretiert und damit Rückschlüsse auf die reale Produktion oder das Produkt gezogen. [24–27]

2.2.2 Nutzen und Grenzen von Simulationen

Die Simulation bietet den größten Nutzen in der Nachbildung realer Systeme, die in einem „einfachen“ analytischen Modell nicht korrekt und ganzheitlich beschrieben werden können. Weiterhin ist es in der Simulation möglich, nicht reale Bedingungen hinzuzufügen und deren Auswirkungen auf das vorliegende System zu analysieren. Zusätzlich sind Experimente, die auf Modifikationen am System basieren, auch in hoher Simulationsgeschwindigkeit und falls notwendig parallelisiert durchführbar. [28] Eine Auswertung der Ergebnisse ist somit schneller zu realisieren.

Nach der VDI-Richtlinie 3633 ist es möglich, zwei bis vier Prozent Einsparungen im Hinblick auf die Investitionssumme für Simulationen am Projekt zu erzielen [20]. Diese Aussage lässt sich mit weiteren getroffenen Annahmen bestätigen [23]. Bei den vorliegenden Angaben handelt es sich jedoch nicht um allgemeingültige Werte, sondern um Richtwerte, die sich aus bereits durchgeführten Projekten ergeben haben. Um den Nutzen der Simulation auf einzelne Projekte angeben zu können, müssen neben den Ergebnissen die Investitionskosten erfasst werden. Dazu gehören neben den Personalkosten auch die Lizenzkosten für genutzte Software. Diese fallen bereits zu Beginn des Entwicklungsprozesses an. Der Nutzen und ggf. Einsparungen durch die Anwendung von Simulation werden erst in späteren Phasen, spätestens aber bei Inbetriebnahme der Anlage sichtbar. Eine

Simulation im Bereich der Produktentwicklung ist immer dann erfolgreich eingesetzt, wenn Planungs- und Entwicklungsfehler bereits vor der Produktion entdeckt und noch vermieden werden können, wie in Bild 2 dargestellt ist. Die Beeinflussbarkeit der Produkteigenschaften und somit auch der Einfluss auf die Kosten eines Produktes sind in den ersten Phasen des Produktentstehungsprozesses sehr hoch, die Kosten für Anpassungen und Änderungen dagegen in der Endphase.

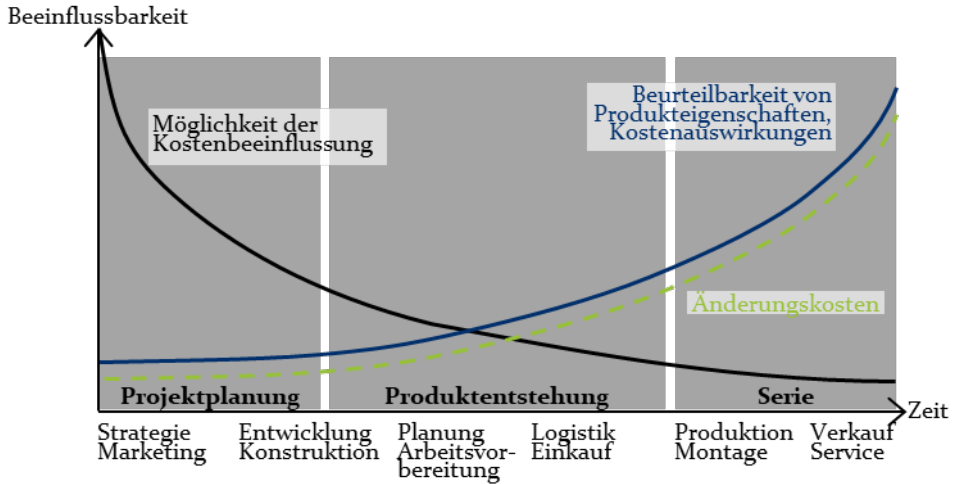


Bild 2: Kostenbeeinflussung [29, S. 135]

Aus diesem Grund empfiehlt sich die Simulation bereits zu Beginn, um die Kosten für Änderungen und Anpassungen zu reduzieren [29], auch wenn zu diesem Zeitpunkt noch nicht alle Randbedingungen für die spätere Fertigung vorliegen. Neben den monetären Aspekten der Nutzung von Simulation lassen sich auch qualitative, wie Sicherheitsaspekte, Systemverständnis und sinnvollere Prozessführung, finden. Folglich unterstützt Simulation Entscheidungen und reduziert das Risiko im Unternehmen [20, 23].

Neben den Vorteilen sind mit den Grenzen der Simulation auch Nachteile und Fehlereinflüsse festzuhalten, denn durch Simulation entsteht sowohl ein hoher Bedarf an Datenverarbeitung und -speicherung als auch an personeller Ausstattung zur Erstellung der Simulationsmodelle neben der eigentlichen wertschöpfenden Tätigkeit. Weiterhin spiegeln die Ergebnisse der Simulationen lediglich die Qualität der genutzten Daten wider. Die Simulation wird qualitativ nur so gut sein, wie die Eingaben und Annahmen, die getroffen werden. Zusätzlich fehlen häufig die Betrachtung aller Randbedingungen und Abhängigkeiten in einem gesamten Modell, so dass die Gültigkeitsbereiche der Ergebnisse begrenzt statt allgemein werden. [28] Je

nach Anwendungsfall werden unterschiedliche Simulationen zum Ziel führen. Deshalb werden im folgenden Abschnitt verschiedene Arten der Simulation aufgezeigt.

2.2.3 Simulationenmethoden

Grundsätzlich erfolgt die Kategorisierung von Simulationsmodellen entlang verschiedener Kriterien. [26] Diese sollen hier nicht alle aufgeführt werden. Relevant für die weitere Betrachtung ist die Unterscheidung hinsichtlich Zeitfortschritt und Zustandsänderung. Diesbezüglich lassen zwei Simulationsarten unterscheiden: die kontinuierliche und die diskrete Simulation [20, 27, 30]. Im Rahmen der kontinuierlichen Simulation wird der Zusammenhang zwischen Zeit und Zustand durch stetige mathematische Funktionen beschrieben. Im Gegensatz dazu werden bei der diskreten Simulation zu bestimmten (diskreten) Zeitpunkten die Zustände verändert. Handelt es sich im Bereich der diskreten Simulationen um die ereignisdiskrete Simulation werden die Zustandsänderungen durch das Eintreten eines Ereignisses forciert. Eine genauere Klassifizierung für diskrete Simulationen ist in Bild 3 gezeigt. Im Gegensatz dazu schreitet bei quasikontinuierlichen oder zeitgesteuerten Simulationen die eingestellte Simulationszeit als festgelegtes konstantes Zeitinkrement voran. [31, 32]

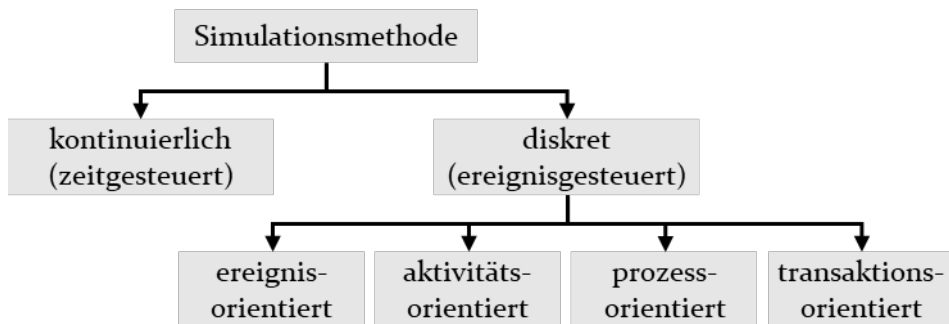


Bild 3: Klassifikation von Simulationsmethoden [33, S. 17]

Bild 4 zeigt in verschiedenen Diagrammen die verschiedenen Simulationsmethoden hinsichtlich des Zeitverhaltens grafisch auf. Neben den beiden genannten Simulationsarten sind dort auch die Kombination mehrerer Arten als weitere Möglichkeiten aufgezeigt. Eine solche Kombination wird immer dann notwendig, wenn Simulationen von unterschiedlichen Disziplinen mit diversen Betrachtungsschwerpunkten zusammengefügt werden.

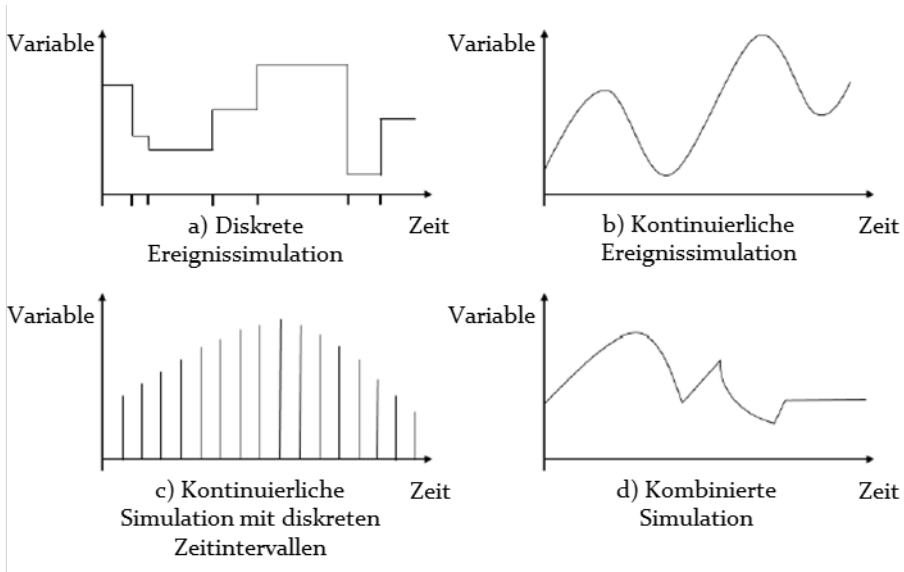


Bild 4: Darstellung unterschiedlicher Simulationsarten in Anlehnung an [34, 35]

Eine weitere Unterscheidung der Simulationen ist über die Fabrikebene, welche simuliert werden soll, möglich. Dies ist in Bild 5 dargestellt. Je nach Fabrikebene werden Produktionsprozesse, eine einzelne Produktionszelle, eine gesamte Anlage oder das vollständige Werk simuliert und unterschiedliche Simulationswerkzeuge genutzt. [32] Je nachdem, auf welcher Ebene die Produktion betrachtet werden soll, verändern sich Detaillierungsgrad und Vielschichtigkeit des Untersuchungsgegenstandes grundsätzlich [21].

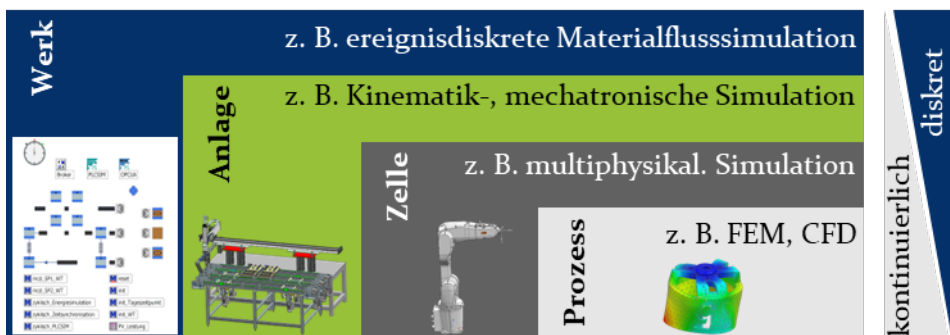


Bild 5: Simulationsarten nach [32, S. 46]

Im Bereich des gesamten Werkes liegt der Fokus primär auf (innerbetrieblichen) Logistikprozessen. Die Anlagen verändern das Verhalten oder den (Betriebs-)Zustand aufgrund diskreter Ereignisse, wie z. B. dem Eintritt

eines Werkstückes in eine Anlage. Deshalb kommt auf dieser Betrachtungsebene vermehrt die ereignisdiskrete Simulation zum Einsatz. Im Gegensatz dazu werden auf der Prozessebene mehrheitlich das physikalisch-technische Verhalten der Anlage bzw. des Prozesses untersucht. Hierzu zählen beispielsweise fluiddynamische Prozesse, die sich durch mathematische Differentialgleichungen kontinuierlich abbilden lassen.

Folglich muss je nach Anwendung ein bestimmtes Simulationswerkzeug genutzt werden. Um die Auswahl zu erleichtern, werden zunächst die Abstraktionsebenen der Simulationaufgabe betrachtet. Die in Tabelle 1 vorgeschlagene Kategorisierung folgt der Logik der Automatisierungspyramide. [36]

Tabelle 1: Simulationmethoden und deren Anwendungsgebiete nach [36]

Ebene	Planungsinhalt	Simulationsgebiet
Komponente / technologischer Prozess	- Operationen - Prozessparameter - Werkzeuge - Hilfsmittel	Mehrkörpersimulation FE-Simulation
Zelle	- Zellenlayout - Arbeitsvorgangsfolge - Programmierung - Taktzeitoptimierung - Kollisionsvermeidung	3D-orientierte Kinematik- und Verhaltenssimulation
Anlage	- Layout - Material- / Informationsfluss - Steuerungsstrategien - Arbeitsorganisation	Materialflusssimulation Datenübertagung
Werk / Fabrik	- Geschäftsprozesse - Informationsfluss - Aufträge	Geschäftsprozesssimulation

2.2.4 Verteilte Simulation als Co-Simulation

Ist es das Ziel, mehrere Simulationen in verschiedenen Simulationsumgebungen, die voneinander abhängen, gleichzeitig durchzuführen, so ist es notwendig, dass die Abhängigkeiten abgebildet und jeweils in die Simulationen aufgenommen werden. Das oben gezeigte Vorgehen zur Erstellung von Simulationsmodellen bleibt dabei gleich, lediglich eine Verknüpfung dieser wird ergänzt.

2.2.4.1 Definition

Werden mehrere abhängige Simulationsmodelle verbunden, spricht man von einer gekoppelten Simulation, die in einer Kopplung Simulationstasks ausführt. [37] Die Simulationaufgabe (Task) ist Teil jedes einzelnen Simulators und berechnet innerhalb eines Solvers (in einer Simulationsumgebung) das Simulationsmodell. [4] Geimer unterscheidet bereits die Ebenen, auf welchen die Kopplung durchgeführt werden soll (Modell- bzw. Programmebene) und erweitert so den Begriff der Co-Simulation für die Nutzung mehrerer, unterschiedlicher Modellierungswerkzeuge. [38] Scheifele systematisiert, wie in Tabelle 2 gezeigt, die Co-Simulation in Anlehnung an Günther hinsichtlich der Anzahl an Modellierungswerkzeugen und Simulationstasks. [4, 39]

Tabelle 2: Systematisierung der Simulationsvarianten nach [4]

		Anzahl der Simulationstasks	
		= 1 geschlossene Simulation	> 1 verteilte Simulation
Anzahl der Modellierungs- werkzeuge	= 1 geschlossene Modellierung	monolithische Simulation	partitionierte Simulation Co-Simulation
	> 1 verteilte Modellierung	Modell- kopplung	Werkzeug- kopplung Co-Simulation

Die monolithische Simulation ist eine klassische Simulation, da hier nur ein Modellierungs- und Simulationswerkzeug zur Anwendung kommt und diese somit in sich geschlossen ist. Eine Modellkopplung entsteht, wenn

Teilmodelle oder Teilsysteme voneinander getrennt und ggf. in verschiedenen Werkzeugen modelliert und anschließend durch Ex- und Import der Daten zu einer geschlossenen Simulation zusammengeführt werden. Innerhalb einer partitionierten Simulation wird das Modell in einer Modellierungsumgebung erstellt und anschließend partitioniert.

Die so entstehenden Teilmodelle werden parallel simuliert. Werden nun die beschriebenen Subsysteme voneinander getrennt und unabhängig modelliert und auch innerhalb der spezifischen Umgebung simuliert, so ist eine Kopplung erforderlich. Dies wird in Tabelle 2 als Werkzeugkopplung dargestellt. [39, 38] Diese hat den Vorteil, dass mechatronische Systeme, die von höherer Komplexität sind, in Teilmodule entlang der unterschiedlichen Disziplinen aufgeteilt und spezifisch modelliert werden können. [40, 41] Damit lässt sich eine unternehmens- oder abteilungsübergreifende Modellierung abbilden. [40] Außerdem ermöglichen die disziplinspezifischen Modelle, welche „im Hinblick auf die Abbildungsgenauigkeit als auch die Berechnungsperformanz“ [P1] sehr leistungsfähig und exakt sind, im Gesamtmodell „eine umfassende und aussagekräftige Abbildung des Prozess-, Maschinen- und Anlagenverhaltens sowie den auftretenden Wechselwirkungen“ [4].

Der Fokus dieser Arbeit liegt in einer verteilten Modellierung in Kombination mit einer verteilten Simulation. Daher wird fortfolgend die Co-Simulation im Rahmen einer Werkzeugkopplung betrachtet.

2.2.4.2 Architektur der Co-Simulation

Bevor die Modellierung und die Werkzeugkopplung erfolgen, wird das Gesamtsystem in sinnvolle Subsysteme aufgeteilt. Das Kriterium hierfür ist die Möglichkeit der separaten Modellierung und Simulation dieser.

Dazu werden die Abhängigkeiten voneinander aufgenommen und festgehalten. Daraus werden die Daten abgeleitet, die zwischen den einzelnen Simulationsumgebungen ausgetauscht werden müssen. Um dies zu realisieren, werden die Simulationswerkzeuge über einen Kommunikationskanal miteinander verbunden und durch eine Synchronisierung zueinander zeitlich getaktet. Nur so sind die Simulationsläufe auch reproduzierbar. [4] Die beschriebene Architektur ist in Bild 6 grafisch dargestellt.

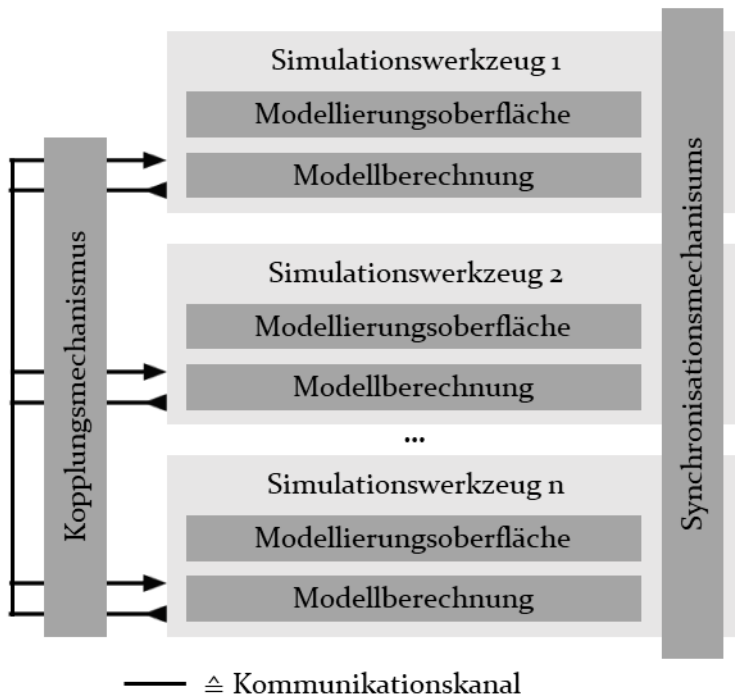


Bild 6: Kopplung von Simulationswerkzeugen in Anlehnung an [4]

Die Kopplung zwischen den Simulationswerkzeugen 1 bis n erfolgt über Signale, die als Ein- und Ausgänge zyklisch ausgetauscht werden. Über den Kommunikationskanal werden die Modellberechnungen in den Subsystemen koordiniert, indem einzelne Simulationsaufgaben durch Eingangssignale ausgelöst werden (ausgelöst durch ein Ereignis bzw. ereignisdiskret). Bei der Entstehung des Gesamtmodells werden verschiedene Strategien angewandt, wobei zwischen iterativen und expliziten Verfahren zu unterscheiden ist. Die expliziten Verfahren werden weiter in parallele und sequenzielle Verfahren untergliedert. Je nach Gesamtsystem ist „eine sequentielle Abarbeitung gefordert oder eine parallele möglich“ [39].

2.2.4.3 Mechanismen zur Kopplung der Simulationsumgebungen

Wie bereits erwähnt, ist eine Kommunikation zwischen den einzelnen Simulationsumgebungen oder Simulationswerkzeugen sicherzustellen. Dabei lassen sich, wie in Bild 7 dargestellt, zwei Strukturen unterscheiden.

Entweder wird die Verbindung zentral über einen Co-Simulationsmaster oder dezentral über eine direkte Verbindung aufgebaut. Im ersten Fall gibt

es einen Masteralgorithmus, der den Datenaustausch, die Synchronisierung und die Taktung der verschiedenen Werkzeuge übernimmt. Da es sich im zweiten Fall um eine dezentrale Struktur handelt, müssen die Co-Simulationsmechanismen in eine oder mehrere Simulationsumgebungen eingebracht werden. [4, 42, 43] Da die Kommunikation über den Co-Simulationsmaster zu Verzögerungen führt, ist der dezentrale Ansatz performanter. Nach Scheifele ist es möglich, den Kommunikationskanal auf zwei Wegen aufzubauen. Über die werkzeugspezifische Programmierschnittstelle lässt sich mittels entsprechender Funktionen eine Kommunikation mit dem Simulationswerkzeug während der Modellberechnung aufbauen. Außerdem wird über standardisierte Kommunikationsprotokolle, wie z. B. OPC UA eine Werkzeugkopplung ermöglicht. In diesem Fall wird während der Modellberechnung das Simulationswerkzeug angesprochen und ein Kommunikationskanal aufgebaut, falls das Werkzeug das genutzte Kommunikationsprotokoll unterstützt. [4]

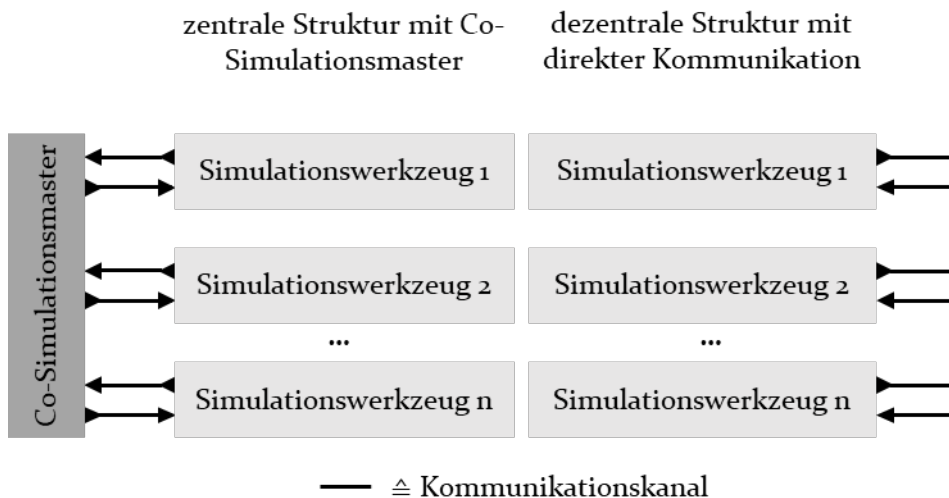


Bild 7: Kommunikationsstrukturen bei der Kopplung von Simulationen nach [4]

2.2.4.4 Synchronisationsstrategien

Die Simulation eines Modells innerhalb einer Simulationenaufgabe verläuft in drei Schritten: Die Modelle werden in der Initialisierungsphase eingelesen und gestartet. In der folgenden Durchlaufphase werden die Eingangssignale gelesen, das Modell berechnet und die Ausgangssignale ausgege-

ben. In der letzten Phase wird das Modell abgeschlossen. Die Durchlaufphase wird zyklisch abgearbeitet, wobei selbstgetaktete (mittels eigener Uhr und Synchronisation auf die reale Zeit) und fremdgetaktete (externe Regelung durch Koppelsignale) Abarbeitung des Simulators unterschieden werden. [4]

2.2.4.5 Bestehende Co-Simulationsansätze zur Werkzeugkopplung

Die Idee der Co-Simulationsansätze ist bereits in verschiedenen Zusammenhängen, insbesondere in domänenübergreifenden Ansätzen getestet worden. Daraus sind verschiedene Simulationsansätze entstanden, die in Auszügen im Folgenden vorgestellt werden sollen.

Functional Mock-Up Interface

Beim Functional Mock-Up Interface (FMI)-Standard stellen sogenannte Functional Mock-Up Units eine einheitliche Schnittstelle für die Simulationswerkzeuge zur Verfügung. Wird dieser Standard unterstützt, ist eine Teilnahme an einer Co-Simulation möglich. Der FMI-Standard ist etabliert und wird in über 150 Softwarelösungen angewandt. [44, 45] Er dient nicht nur der Nutzung in verteilten Simulationsumgebungen, sondern primär zum Austausch von Modelldaten zwischen unterschiedlichen Softwarelösungen. [45] Im Fall der Werkzeugkopplung werden Kopplung und Synchronisierung durch einen Masteralgorithmus übernommen, der weiterführend über Methoden zur Fehlerkorrektur verfügt. Der Datenaustausch zwischen den einzelnen Anwendungen erfolgt zu diskreten Zeitpunkten, wobei die Simulationstasks in den einzelnen Umgebungen in der Zwischenzeit unabhängig voneinander parallel gelöst werden. [46]

High Level Architecture

High Level Architecture (HLA) „ist eine vom amerikanischen Verteidigungsministerium entwickelte Co-Simulationsarchitektur für verteilte und parallele Simulationen“ [45]. Im Vergleich zu FMI stellt HLA ein Framework dar und ist somit weder ein Datenaustauschformat noch eine Schnittstelle. Die verteilte Simulationsumgebung besteht in diesem Fall aus einem zentralen Co-Simulationsmaster, der Run-Time-Infrastructure. Diese koordiniert die Kopplung und Synchronisation zwischen den Simulationswerkzeugen, während sich die Teilsimulationen damit verbinden. Die HLA-Regeln und ein Object-Model-Template beschreiben den Informationsaustausch zwischen den Modellen. Zur Nutzung gibt es Run-Time-Interfaces. [45, 47, 48]

Open Platform Communications Unified Architecture

Das bereits zuvor erwähnte OPC UA ist ein interoperables, herstellerunabhängiges Kommunikationsprotokoll zwischen Geräten, Maschinen und anderen Systemen, welches überwiegend im Rahmen von Industrie 4.0 zum Einsatz kommt und sich zu einem herstellerunabhängigen Standard entwickelt hat. Es gibt bereits verschiedene Spezifikationen. In der aktuellen Spezifikation, Unified Architecture, werden Maschinendaten nicht nur transportiert, sondern auch maschinenlesbar beschrieben. [49, 15, P1] Die Daten werden entweder mittels Client-Server-Modell (Client baut einen Kommunikationskanal mit einem Server auf) oder mittels Publisher-Subscriber-Modell (Kommunikation über eine Middleware) ausgelesen bzw. geschrieben. [50]

Ein Konzept zur Umsetzung einer Co-Simulation mittels OPC UA wird von Hensel et al. beschrieben [51]. Hier werden die einzelnen Simulationen über die OPC UA-Schnittstellen mit einem generischen Adapter, bestehend aus einem OPC UA-Server und einem OPC UA-Client, verbunden. Dieser kommuniziert über eine etablierte OPC UA-Verbindung mit einem zentralen Aggregationsserver, bestehend aus OPC UA-Server und -Client. Den Simulationsmaster bildet der Adapter, der sich vor Simulationsbeginn als erstes am Aggregationsserver registriert. Dadurch werden die Synchronisierung und die Koordination der Co-Simulation gewährleistet, während die anderen Simulationsumgebungen als Clients folgen. [45, 51, P3]

Bisher wurden nur die Simulation und Modellierung der Produktions- und Handhabungsprozesse betrachtet, im folgenden Kapitel soll die Energieversorgung der Produktionsanlagen mit einem Gleichstromnetz in den Blick genommen werden.

3 Energieversorgung automatisierter Produktionsanlagen mit Gleichstrom

3.1 Grundlagen

„Elektrischer Strom ist universell einsetz- und praktisch unverzichtbar.“ So bezeichnet Markus Blesl den Strom, der eine Querschnittstechnologie ist, die in verschiedenen Anwendungen genutzt wird. [52, S. 35] Die Verfügbarkeit von Energie, insbesondere das Vorhandensein von Strom, ist ein bedeutender Faktor in der Industrie. Aufgrund der Bedeutsamkeit von Strom für die Industrie spielen Energiequellen und -speicher in zukünftigen Optimierungsprozessen eine wichtige Rolle.

Bei der Nutzung von Wechselstrom ist es einfach, das Spannungsniveau mittels Transformatoren verlustarm und auf flexible Niveaus anzupassen. Damit ist die Spannung an die jeweiligen Bedürfnisse der Verbraucher anpassbar. Da eine hohe Spannung zwar einen hohen Isolationsaufwand erfordert, jedoch niedrige Verluste verursacht, arbeiten Maschinen meist bei niedriger Spannung, während die Energieübertragung auf einem hohen Spannungsniveau erfolgt [53].

Das allgemeine Stromnutzungsprofil der Verbraucher und Anforderungen an die Stromnetze haben sich heutzutage jedoch stark gewandelt. Die Gleichstromtechnik bietet heute enormes Potenzial, den Wirkungsgrad der Stromverteilung auf ein höheres Niveau zu heben. Diese Aspekte sollen im folgenden Abschnitt näher betrachtet werden. Dazu werden zunächst die Unterschiede zwischen Gleich- und Wechselspannung aufgezeigt.

Elektromotoren sind die Hauptverbraucher der elektrischen Energie. In der deutschen Industrie benötigen Elektromotoren ungefähr 70 % der Energie, weltweit sind dies etwa 45 % [54, 55]. Über einen Frequenzumrichter, der zur flexiblen Drehzahlsteuerung dient, werden die meisten Motoren betrieben. In der Regel verfügen diese Umrichter über einen Gleichstromzwischenkreis. [55] Für weitere Anlagen, die grundsätzlich mittels Gleichspannung betrieben, aber an das Wechselstromnetz angeschlossen werden sollen, ist ein Gleichrichter notwendig, der die Wechselspannung aus dem Netz glättet und in Gleichspannung umrichtet. Es gibt verschiedene Arten von Gleichrichtern, die für den Anwendungsfall genutzt werden: Dioden-, Thyristor- und aktiven Gleichrichter. [56] Diese unterscheiden sich grundsätzlich in der Technologie. Diodengleichrichter haben eine vorgegebene

Ausgangsspannung, die lediglich durch Veränderung der Eingangsspannung verändert werden kann. Im Gegensatz dazu benötigt der Thyristorgleichrichter keinen Stufenschalter zur Steuerung der Spannung, denn die Spannungsänderung wird mittels eines Schaltwinkels der Thyristoren umgesetzt. Thyristorgleichrichter werden aufgrund der elektronischen Steuerung der Schaltzeitpunkte zur Umsetzung von Regelungskonzepten genutzt. Ebenso wie beim Diodengleichrichter ist keine Rückspeisung möglich. Der Rückfluss wird durch den Einsatz eines aktiven Gleichrichters möglich. Allerdings weist dieser einen wesentlich schlechteren Wirkungsgrad auf. Deshalb werden in der Industrie bei Nutzung einer Gleichspannung von 650 V DC hauptsächlich Thyristorgleichrichter eingesetzt. [56]

3.2 Gleichstrom in der Produktion

3.2.1 Bedeutung von Gleichstrom in der Industrie

Es ist notwendig, die Stromversorgung an die gestiegenen Anforderungen der digitalen und individuellen Fertigung anzupassen, denn das Stromnetz in Deutschland ist 130 Jahre alt und kann diese Anforderungen oft nicht mehr erfüllen. Außerdem sollen erneuerbare Energiequellen einfach integriert und ein flexibles Energiemanagement umgesetzt werden – bei einer zuverlässigen Versorgung der Nutzer. Ermöglicht wird dies durch ein Gleichstromnetz, denn in der Energieerzeugung durch erneuerbare Energiequellen wird DC genutzt: Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) erzeugen Gleichspannung und der Drehstrom der Windkraftanlagen wird in einem Gleichstromzwischenkreis gepuffert. Auf diesem Weg wird die erzeugte Energie direkt eingespeist, ohne den Umweg über verlustbehaftete Wandler zu gehen. [55] Damit verringern sich nicht nur die Verlustleistung, zusätzlich fällt der Phasenausgleich weg, der die Leistung des technischen Gerätes oder der Anlage mindert. Weiteres Einsparpotential findet sich hier in den Materialkosten bzw. Anschaffungskosten für die Wandler. Verzichtet man auf den Einbau der diversen Wandler an den Eingängen der Geräte, können die Materialkosten erheblich gesenkt werden. [57, 58]

Das Systemkonzept für den Einsatz von Gleichstrom in der Industrie wurde erst kürzlich entwickelt. Deshalb gibt es bisher wenige Einsätze, in welchen die Umsetzung und eine wirtschaftliche Betrachtung durchgeführt wurden, die grundsätzliche Machbarkeit ist jedoch bewiesen. Ein Anwendungsfall, für welchen Gleich- und Wechselstrom verglichen werden können, ist der Stromtransport mittels Hochspannungsnetzen. Diese werden mittlerweile sowohl mit Gleichstrom als auch mit Wechselstrom betrieben.

Durch den Einsatz von Gleichstrom im Vergleich zu Wechselstrom werden aufgrund der fehlenden Blindleistung die Übertragungsverluste um 30-50 % reduziert und somit die Effizienz signifikant gesteigert [59]. Eine ähnlich hohe Einsparung erhofft man sich auch für die industriellen Gleichspannungsnetze.

3.2.2 Stand der Technik

Die meistgenutzten Verbraucher in der Industrie werden nicht direkt am Mittelspannungs- oder am Niederspannungsnetz betrieben. Deshalb wandelt ein Transformator die Spannung auf die für die jeweilige Anlage notwendige [60]. Für die Dimensionierung der Energieversorgung, insbesondere der Anschlussleitungen und der Transformatoren, müssen entstehende Verluste, insbesondere der Gleichrichter, einkalkuliert werden. [54, 61-63]

Zur Abschätzung des Leistungsbedarfs und damit zur Dimensionierung der Energieversorgung gehört es daneben auch, die Gleichzeitigkeit aller Verbraucher zu betrachten. Der Wert variiert je nach Aufbau der Anlagen und je nach Anwendungsfall, deshalb ist es nicht möglich, dazu eine allgemeingültige Aussage zu treffen. Als Erfahrungswert für den Maschinenbau gilt, dass 40% aller vorhandenen und zu berücksichtigenden Verbraucher gleichzeitig betrieben werden. [64]

Zur Umsetzung eines Gleichstromnetzes ist es vor allem notwendig, die einzelnen Verbraucher mit Energie zu versorgen. Diese sind aufgrund der bisherigen Versorgung für Wechselspannung ausgelegt, so dass die Nutzung eines DC-Zwischenkreises weitere verlustbehaftete Wandler in Form von Gleich- und Wechselrichtern braucht. Zusätzliche Frequenzumrichter ermöglichen eine aktive Regelung der Verbraucher und sie agieren wie aktive Dioden bidirektional, so dass es möglich ist, Rekuperationsenergie ins Netz zurück zu speisen. [54] Um Spannungsniveaus oder Frequenzen zu verändern und für die jeweilige Anlage anzupassen, werden Zwischenkreise genutzt. In Bild 8 ist die Prinzipskizze für einen solchen zum Anschluss eines typischen Motors dargestellt.

Die Wechselspannung aus dem Versorgungsnetz mit 50 Hz wird zunächst im Netzfilter bereinigt und anschließend im Gleichrichter gewandelt. Diese gleichgerichtete Spannung wird in den Zwischenkreis eingespeist. Der nachgeschaltete und gesteuerte Wechselrichter formt daraus eine neue, definierte Wechselspannung, die den Motor mit der passenden Frequenz (typischerweise zwischen 0 und 400 Hz) antreibt [65].

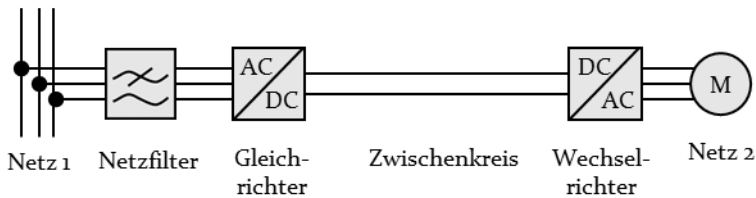


Bild 8: Prinzipskizze eines Zwischenkreises in Anlehnung an [65]

Im Generatorbetrieb des Motors wird Strom vom Motor über den Wechselrichter in den Gleichstromzwischenkreis eingespeist. Dort ist momentan meist ein Bremswiderstand verbaut, der die anfallende Bremsenergie in Wärme umwandelt, wenn kein Umkehrstromgleichrichter eingebaut ist. Der Einbau eines solchen ist aufwändig und teuer und wird für kleine Anlagen eher selten verwendet. [65] Ist jedoch ein Umkehrstromgleichrichter verbaut, wird Strom im nachgeschalteten, gesteuerten Wechselrichter wieder in Wechselspannung mit der für den angeschlossenen Verbraucher erforderlichen Frequenz umgewandelt. [66]

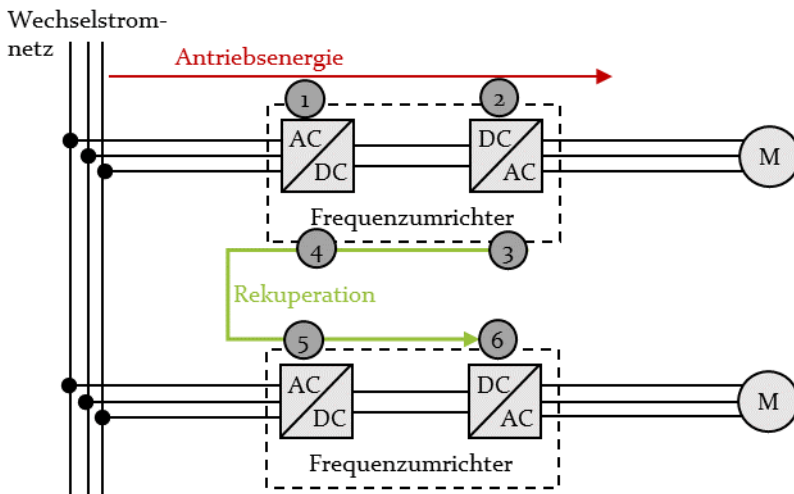


Bild 9: Darstellung der Energieumwandlungen im Wechselstromnetz nach [66]

In Bild 9, in welchem die Energieumwandlungen im Wechselstromnetz aufgezeigt sind, ist zu erkennen, dass zur Nutzung der Energie jeweils zwei Umwandlungsvorgänge nötig sind. Wird zusätzlich zur Entnahme aus dem Netz die Rückspeisung und damit verbunden die weitere Nutzung in einem anderen Verbraucher im gleichen Netz betrachtet, sind sechs Umwandlungen notwendig. Jede einzelne davon ist mit Verlusten behaftet. Dieses

exemplarisch dargestellte Szenario kann skaliert und auf beliebig viele Verbraucher übertragen werden. Durch die Nutzung von Gleichstromkreisen werden Umwandlungsvorgänge deutlich reduziert.

3.2.3 Stromversorgung in der Industrie mit Gleichstrom

3.2.3.1 Grundlagen

Ausgehend von der oben beschriebenen Komponenten- bzw. Antriebs-ebene ist erkennbar, dass es sinnvoll ist, ein neues Konzept der Stromversorgung auf Anlagenebene oder sogar darüber hinaus zu etablieren.

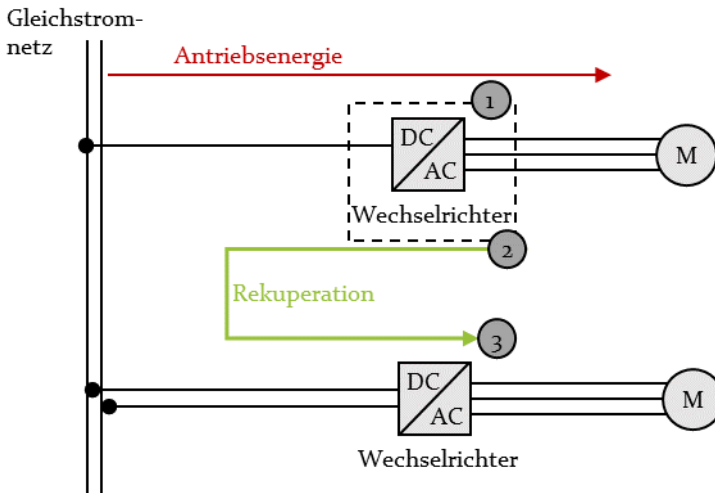


Bild 10: Mögliche Anordnung zweier Antriebe bei Verwendung eines Gleichstromnetzes in der Fertigung in Anlehnung an [66]

Eine seit bereits geraumer Zeit evaluierte Möglichkeit ist es, Gleichspannungsnetze in der Fertigung zu nutzen [66]. Dazu wird der vom Versorger bereitgestellte Wechselstrom direkt an der Einspeisung in Gleichstrom gewandelt. Das so entstehende Gleichspannungsnetz steht nun für alle Verbraucher zur Verfügung [67]. Für unterschiedliche Verbraucher werden Subnetze mit unterschiedlichen Spannungsniveaus eingerichtet. [55]

Im beschriebenen Fall für den generatorischen Betrieb hat das eine Reduktion der Wandlungsvorgänge auf drei zur Folge, denn die entstehende Bremsenergie in Form von Wechselstrom wird vom Gleichrichter in Gleichstrom gewandelt und direkt in das flexible Gleichstromnetz eingespeist und anschließend für den Antrieb im dritten Umwandlungsvorgang

wieder in Wechselstrom gewandelt. [66] Die einzelnen Komponenten und ein schematisches Schaltbild dazu, sind in Bild 10 dargestellt.

Weiterhin gestaltet sich der Anschluss regenerativer Energien aus PV-Anlagen oder Windkraft sowie die Einbindung von Energiespeichern direkt in das Gleichstromnetz einfacher und damit effizienter [55]. Windräder erzeugen durch die Rotation netzasynchrone Wechselspannung, die durch AC/DC-Wandler in eine Gleichspannung transformiert und gepuffert wird. Mittels eines Gleichstromwandlers wird die so erzeugte Energie direkt in das lokale Fabriknetz eingebunden und dort genutzt. Dies setzt voraus, dass Windräder auf dem Firmengelände aufgebaut werden, was in Forschungsprojekten bereits durchgeführt wurde [68]. Prinzipbedingt wird mit PV-Anlagen Gleichspannung erzeugt. Somit ist der Anschluss der Anlage an ein Gleichstromnetz vergleichsweise einfach umsetzbar. [69]

3.2.3.2 Effizienz des Gleichstromnetzes

Wie viel Prozent der benötigten Energie sich tatsächlich einsparen lässt, ist abhängig von verschiedenen Faktoren. Erste Untersuchungen mit Demonstrationsnetzen in Büroräumgebungen ergaben Einsparungen in Höhe von 5% gegenüber einem gewöhnlichen Wechselspannungsnetz.

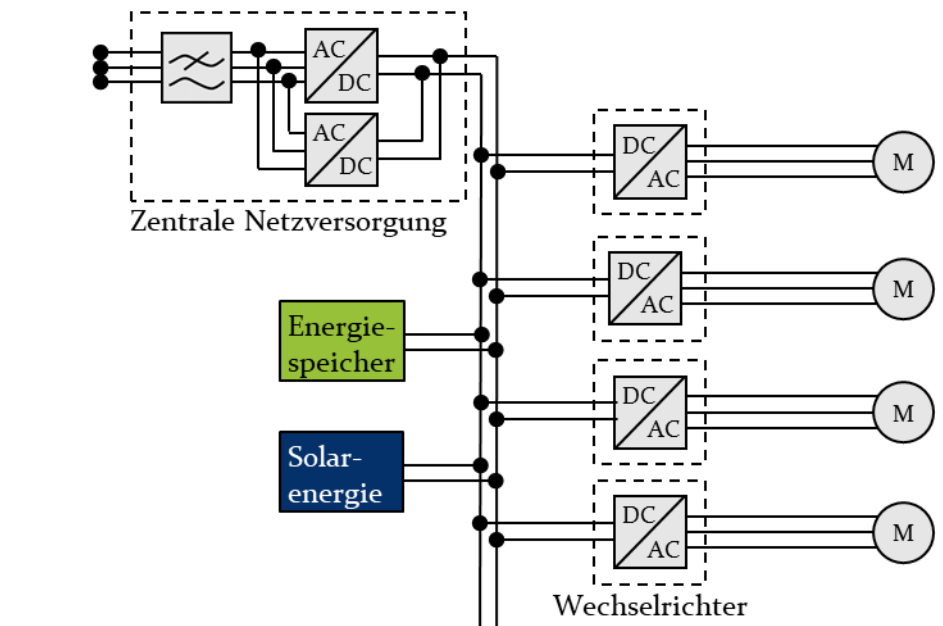


Bild 11: Gleichspannungsnetz mit verschiedenen Komponenten in Anlehnung an [68]

Die installierte Photovoltaikanlage mit einer Einspeisung in das DC-Netz erreichte sogar eine Energieersparnis von 7% im Vergleich zu einer herkömmlichen Anlage mit Einspeisung in ein Wechselstromnetz. [70]

Für die Industrie wird im Rahmen eines Systemkonzepts ein Gleichspannungsnetz mit Energiespeicher, zentralem Gleichrichter, Wechselrichter sowie einer Photovoltaikanlage vorgeschlagen. Es ist in Bild 11 dargestellt. Neben der Einbindung erneuerbarer Quellen wird durch den Einsatz von Speichern die Effizienz erhöht, denn Einbindung von Speichern erlaubt eine flexible Energieversorgung der Verbraucher und somit den Ausgleich von Spannungsschwankungen und -spitzen zum Versorgungsnetz, die häufig teuer bezahlt werden müssen. [68, 69]

Die dezentralen Wechselrichter in Bild 11 dienen nicht nur der Wandlung von Gleich- in Wechselstrom, sondern auch der Weitergabe von Informationen zum Verbraucher i.S.v. momentaner Energiebedarf oder Anlagenzustand. Diese werden für das Energiemanagement verwendet.

3.2.4 Herausforderungen für Gleichstromnetze in der Industrie

Die Nutzung von Gleichstromnetzen in der Industrie ist noch nicht flächendeckend realisiert. Allerdings wurden in den vergangenen Jahren einige Netze installiert und werden teilweise weiterhin als Test-Netze zur Validierung betrieben. Außerdem ist ein Systemkonzept für die Umsetzung von industriellen Netzen entstanden. [55, 68] Das Systemkonzept und die Erfahrungen aus den Test-Netzen bieten Vorschläge zu Methoden und Stufenplänen, wie Fertigungen umgerüstet werden können. [71]

Erste Evaluationsergebnisse zeigen, dass im Vergleich zum Aufbau einer klassischen AC-Architektur in der Energieversorgung Komponenten eingespart werden, der Aufwand für Filter geringer ist und mit der gleichen Menge an Kupferleitungen mehr Energie übertragen werden kann. [69] Bisher fehlen jedoch noch immer in hohen Stückzahlen seriell produzierte Komponenten für die Sicherheitstechnik von Gleichstromnetzen. Viele notwendige Bauteile wie Schutzschalter oder Sicherungen sind noch in der Erprobungsphase und deshalb nur für Test-Netze zugelassen. Der Aufbau von Anlagen mit Gleichstrom führt zu besonderen Schutzmaßnahmen. Im Gegensatz zum Wechselstrom besitzt der Gleichstrom nämlich keine natürlichen Nulldurchgänge und damit keinen Zeitpunkt, an welchem keine Stromstärke vorhanden ist. Deshalb muss ein besonderes Erdungssystem etabliert werden. Dieses sollte so ausgelegt sein, dass erstens der Leckstrom

während des normalen Betriebs minimiert wird und zweitens die Sicherheit von Personen sowie anderer Komponenten unter Fehlerbedingungen maximiert wird. [72] Ein potenzielles Problem beim Fehlen eines Nulldurchgangs bei Gleichstrom ist die Schwierigkeit, bestimmte elektronische Schaltungen zu synchronisieren oder zu steuern. Viele elektronische Schaltungen und Geräte nutzen den Nulldurchgang von Wechselstrom, um Timing-Informationen zu erhalten. Dies ermöglicht es, Schaltungen genau zu takten, Signale zu synchronisieren und verschiedene Prozesse zu koordinieren.

Neben dem schon thematisierten Kurzschlussstrom kommt der Überlast zum Schutz vor Überstrom eine bedeutende Rolle zu. Diese tritt bei betriebsbedingter und häufig länger andauernder Überlastung auf [73]. Daher muss bei der Auswahl von Kabeln und Leitungen der Schutz vor Überstrom berücksichtigt werden. Hierbei spielen Betriebs- und Verlegebedingungen eine entscheidende Rolle, die wichtigsten sind dabei die: Verlegeart, Strombelastbarkeit, Umgebungstemperatur, Oberschwingungen, Häufung und die Anzahl der belasteten Adern.

Personen und Sachen müssen stets vor schädlichen Einwirkungen durch elektrischen Strom geschützt werden. Hierzu sind verschiedene Schutzmaßnahmen notwendig, die den Fehlern, Mängeln und Schädigungen entgegenwirken oder diese grundsätzlich unterbinden. Durch die besondere Gefährdungslage bei Gleichstrom wird neben der zweifachen Sicherheit (Basisschutz und Fehlerschutz) eine dritte Schutzebene, der Zusatzschutz, benötigt. Ebenso ist der Brandschutz sowie Blitzschutz des DC-Demonstrators zu berücksichtigen. Ferner müssen Studien zur Wirksamkeit dieser Maßnahmen durchgeführt und Normen entwickelt werden. Daran arbeitet gerade eine Allianz aus großen Unternehmen und Forschungseinrichtungen in Deutschland. Der Aufwand für die Sicherheitstechnik ist folglich wesentlich höher und die Komponenten sind noch nicht so ausgereift wie im Wechselstromnetz. [74–76] In der komplexeren Sicherheitstechnik und dem Netzmanagement steckt aber auch Potential, denn durch die Neuentwicklung wird bereits den neuen Herausforderungen intelligenter Gleichstromnetze begegnet und so sind benötigte Funktionalitäten zukünftig serienmäßig enthalten.

Wichtig ist es zu betrachten, wie sich die Kosten im Betrieb verhalten werden. Dazu werden die Tarife, die mit den Energieversorgern abgeschlossen werden, betrachtet und ggf. an die veränderte Infrastruktur angepasst werden.

3.2.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

3.2.5.1 Grundlagen der Entgeltberechnung für Privathaushalte

Von Privathaushalten ist es bekannt, dass die Energiekosten den Kunden proportional zur bezogenen Energie in Rechnung gestellt werden. Wie in Bild 12 dargestellt, ist der Strompreis insgesamt für Privathaushalte in den vergangenen Jahren stark gestiegen. [77]

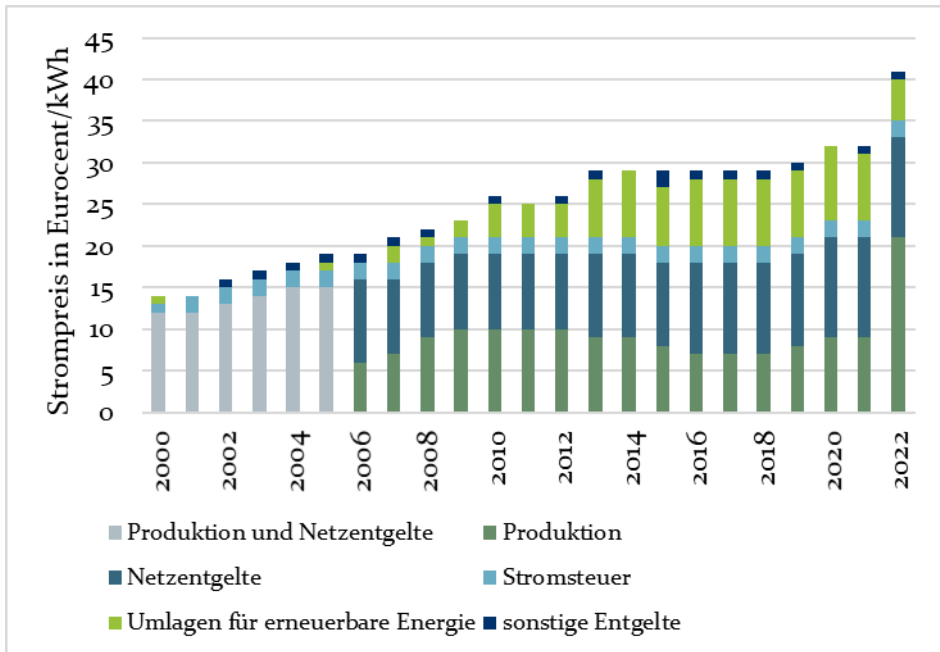


Bild 12: Strompreisentwicklung für deutsche Endverbraucher in Eurocent nach [77]

Die Kosten, die der Abnehmer bezahlen muss, entstehen dabei nicht nur für die Produktion des Stroms, sondern auch für Netzentgelte, Stromsteuer, Umlagen für erneuerbare Energien und sonstige Entgelte.

3.2.5.2 Grundlagen für Betriebe und Unternehmen

Für Betriebe mit einem wesentlich höheren Verbrauch berechnet sich das Netzentgelt nach anderen Modellen und verhält sich indirekt proportional zur Abnahmemenge. Kunden, die sehr viel Strom verbrauchen, bezahlen einen geringeren Preis für die Energieeinheit als solche, die zwar einen höheren Verbrauch als Privathaushalte aufweisen, jedoch für einen Industriekunden wenig Verbrauch anmelden. Für einen Leistungsbezug, der 100.000

kWh pro Jahr übersteigt, setzt sich das Netzentgelt aus Arbeitspreis, Leistungspreis, Grundpreis, Blindleistungspreis und den Abgaben und Steuern zusammen. Die Zusammensetzung der einzelnen Kosten (grün) und möglicher Maßnahmen zur Reduktion sind in Bild 13 dargestellt. [78, 79]

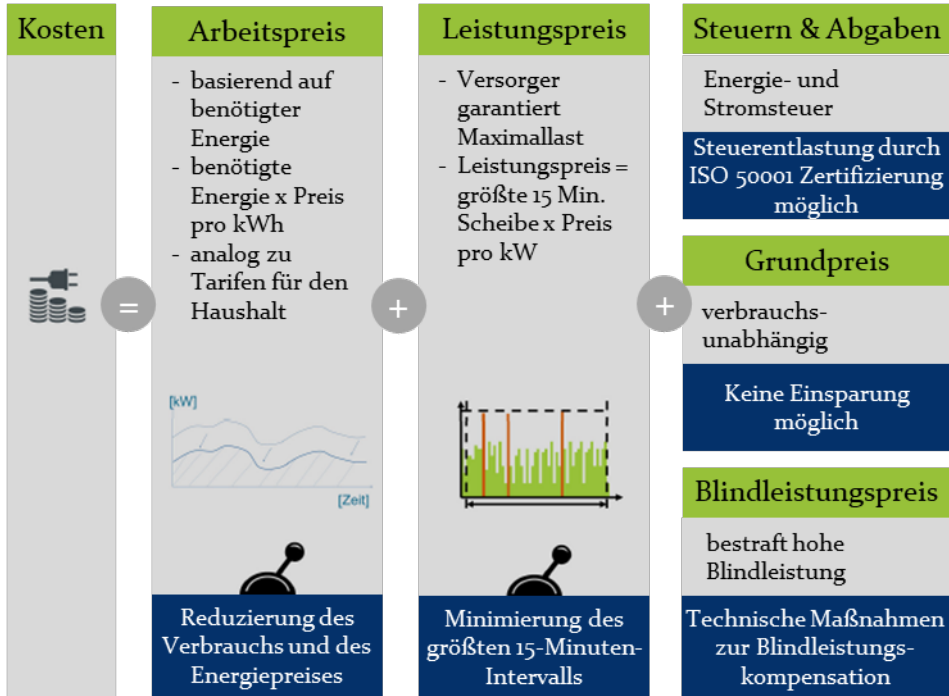


Bild 13: Zusammensetzung der Energiekosten in einem Unternehmen nach [78]

Das zugrundeliegende Preismodell ist gängig und lässt sich folgendermaßen aufgliedern:

- Das Jahresleistungsentgelt lässt sich aus dem Produkt der Jahreshöchstleistung mit dem Jahresleistungspreis ermitteln. Dabei wird die Jahreshöchstleistung in der Netzentgeltverordnung definiert und entspricht der höchsten, über einer Viertelstunde gemittelten Last (Leistungsmittelwert). Dazu implementieren Unternehmen verpflichtend eine registrierte Leistungsmessung, welche die Werte per Internetanbindung oder über eine Kommunikation innerhalb der Stromversorgung (Power Communication) an das Energieversorgungsunternehmen übermittelt. Die Betrachtungszeiträume werden festgelegt. [80]
- Ähnlich berechnet sich das jährliche Arbeitsentgelt durch die Multiplikation des Arbeitspreises mit der entnommenen elektrischen

Arbeit im Abrechnungszeitraum. Für Privathaushalte wird in dieser Form die Energie in Rechnung gestellt. Der Energiepreis kann dabei tageszeitenabhängig sein. [78] Der Unterschied zwischen den beiden genannten Entgeltarten ist in Bild 14 veranschaulicht.

- Der konstante Grundpreis deckt alle verbraucherunabhängigen, technischen und organisatorischen Aufwände des Energieversorgers ab und lässt kein Einsparpotential erkennen.
- Zum Grundpreis hinzu kommen Steuern und steuerähnliche Abgaben, die in Gesetzen und Verordnungen festgelegt werden. Diese haben in den vergangenen Jahren am meisten an Bedeutung gewonnen. Insbesondere trägt die EEG-Umlage, die im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) geregelt ist, erheblich zum Gesamtenergiepreis bei. Sie ist vom Verbraucher zu entrichten und finanziert den Ausbau von Anlagen für erneuerbare Energie. Als Nebeneffekt motiviert eine Befreiung von der EEG-Umlage – vor allem energieintensive – Unternehmen, effizientes Energiemanagement einzuführen, um von der Umlage teilweise oder komplett befreit zu werden. [81]
- Blindleistung ist die Leistung, die keine Arbeit verrichtet und ist deshalb nicht nutzbar. Sie belastet aber das Netz, weshalb Energieversorger einen Blindleistungspreis in Rechnung stellen. Die Anwendung technischer Maßnahmen hilft den Unternehmen, die verursachte Blindleistung am Netz zu kompensieren. [82]

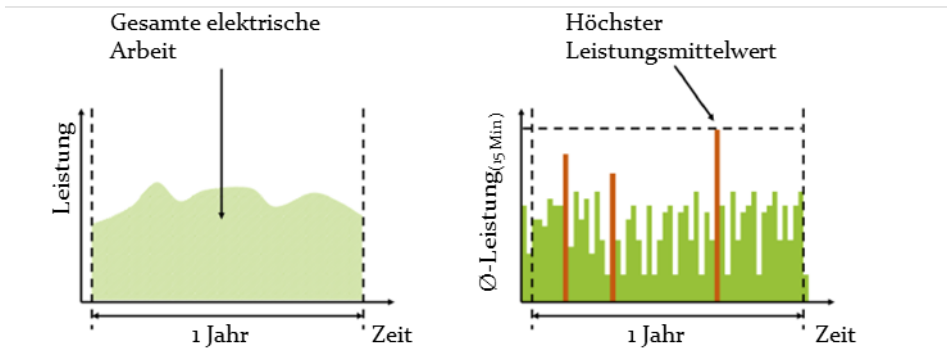


Bild 14: Gesamte elektrische Arbeit (links) und höchste Lastspitze (rechts) als Berechnungsgrundlagen für Arbeits- und Leistungsentgelt [78]

Grundsätzlich unterscheiden sich die Beträge des Leistungspreises (sowie des Arbeitspreises) je nach Art des Netzanschlusses des Unternehmens

nach Niederspannungsanschluss von bis zu 1 kV, Mittelspannungsanschluss bis 110 kV und Hochspannungsanschluss mit mehr als 110 kV Anschlussspannung [78, 79] Außer dieser Unterscheidung wird die Jahresnutzungsdauer der Energiekunden herangezogen. Diese wird durch den Quotienten aus der gesamten bezogenen Arbeit und dem maximalen Leistungsmittelwert, wie in Gleichung (1) dargestellt, berechnet.

Je nachdem ob das Unternehmen eine Jahresnutzungsdauer von mehr oder weniger als 2.500 Stunden hat, werden unterschiedliche Arbeits- und Leistungspreise angesetzt. [79]

$$\text{Jahresnutzungsdauer} = \frac{\text{Jahresarbeit}}{\text{max. Leistungsmittelwert}} \quad (1)$$

3.3 Smart Grids als Energieversorger der Zukunft

Das intelligente Gleichstromnetz besteht nicht – wie bei der alleinigen Versorgung mit Wechselstrom – mehr nur aus einer einzigen Stromquelle, sondern nutzt zusätzlich erneuerbare Energiequellen und -speicher zur Sicherstellung der Energieversorgung. Dadurch entsteht ein intelligentes Stromnetz, das auch als Smart Grid bezeichnet wird. Die Definition eines Smart Grids ist bisher nicht eindeutig, weshalb eine solche aufgestellt werden soll. Auf diese Definition wird in den darauffolgenden Abschnitten Bezug genommen.

3.3.1 Definition eines Smart Grids

In der Definition des Smart Grid soll insbesondere ein Gleichstromkreis berücksichtigt werden, denn der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt in der Nutzung von Gleichstrom mit den sich daraus ergebenden Vorteilen innerhalb der Produktions- und Energieversorgungsinfrastruktur.

Der Begriff Smart Grid hat sich in der Industrie sowie der Gesellschaft als eine für die Zukunft ausgerichtete Begrifflichkeit zur Definition eines intelligenten Energie- und Informationsflusses innerhalb großer und kleiner Teilsysteme etabliert. Anwendung findet das Smart Grid vor allem im Bereich der dezentralen Energieversorgung.

Grundlage für die in dieser Arbeit verwendete Definition bildet eine Literaturrecherche. Dabei ist festzustellen, dass bisher keine eindeutige Definition vorhanden ist. So werden beispielsweise von APPELRATH Smart Grids als ein „intelligentes Versorgungssystem der Zukunft“ definiert [83].

Ebenso werden in verschiedene Definitionen weitere Bereiche der Energienutzung eingebunden. Ein Beispiel hierfür zeigt der BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN HEIZUNGSINDUSTRIE auf: „Intelligente Stromnetze, sogenannte Smart Grids, sorgen dann für eine Vernetzung und Steuerung von Stromerzeugern, Strom- und Wärmespeichern und Verbrauchern.“ [84]

Einen Einblick in die Vielschichtigkeit und Ausmaße des Begriffes Smart Grid zeigt die Einschätzung von SERVATIUS, dass es „beim Ausbau der Netze allerdings nicht nur darum geht, rechtzeitig mehr und stärkere Netze zu bauen, sondern auch darum, die Netze insgesamt flexibler und intelligenter, also smart zu machen. Dabei geht es um ein System, in dem Stromerzeugung, Stromspeicherung, Übertragungs- und Verteilnetze sowie die Energieverbraucher über modernste Informations- und Kommunikationstechnologie verbunden sind.“ [85]

Die wenigen ausgewählten und vorgestellten Aussagen und Definitionen der verschiedenen Quellen zeigen, dass noch keine einheitliche Definition des Begriffes Smart vorhanden ist. Eine eigene Definition soll dazu beitragen, im Rahmen dieser Arbeit Missverständnisse zu vermeiden.

Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit Smart Grid wie folgt definiert:

„Ein Smart Grid (intelligentes Stromnetz) ist ein elektrisches Versorgungsnetz, das fortschrittliche Technologien und Kommunikationsmittel integriert, um den Energiefluss effizienter, sicherer und nachhaltiger zu gestalten. Im Vergleich zu herkömmlichen Stromnetzen ermöglicht ein Smart Grid eine bessere Überwachung, Steuerung und Optimierung des Energieverbrauchs und der Energieerzeugung.“

Ein Smart Grid integriert verschiedene Komponenten, einschließlich erneuerbarer Energiequellen wie Solar- und Windkraft, Energiespeichersysteme wie Batterien, intelligente Zähler, Kommunikationsnetze und fortschrittliche Steuerungssysteme. Diese Technologien ermöglichen es, den Energiefluss in Echtzeit zu überwachen, den Verbrauch zu optimieren, die Netzstabilität sicherzustellen und die Integration erneuerbarer Energien zu erleichtern.“

Erweitern lässt sich die Definition des Smart Grids weiterhin, wenn darin ausschließlich Gleichstrom zur Energieversorgung genutzt wird. Um eine aussagekräftige Definition zu entwickeln, werden verschiedene Anforderungen für ein DC Smart Grid definiert. Diese sind in Bild 15 dargestellt. Ein Smart Grid entwickelt sich über verschiedene Ausbaustufen schrittweise weiter. In der vollständigen Ausbaustufe enthält das Smart Grid nur einen einzigen Gleichrichter als Knoten zum Energieversorgungsnetzwerk, das als Wechselspannungsnetz ausgestaltet ist.

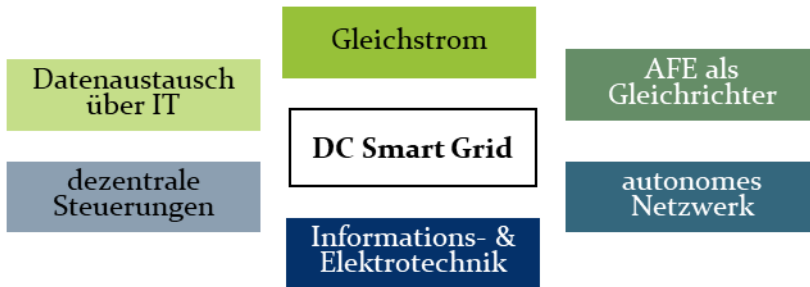


Bild 15: Darstellung der Einflussfaktoren und Eigenschaften auf ein Smart Grid

Der Gleichrichter wird als Active Front End (AFE) oder Active Line Module (ALM) bezeichnet. Weitere Gleichrichter sind nicht notwendig, wenn alle Verbraucher, Speicher und Erzeuger, die über das Smart Grid miteinander verbunden sind, mit der gleichen Gleichspannung betrieben werden. Ist dies nicht der Fall, braucht es ein Netz, das ggf. Gleich- und Wechselstrom kombiniert oder in DC-Sektoren mit unterschiedlichen Spannungsniveaus aufgeteilt wird [55]. Auf ein solches Netz soll in dieser Arbeit jedoch nicht näher eingegangen werden.

Um die einzelnen Komponenten innerhalb eines Smart Grids zu klassifizieren und deren Funktionalität innerhalb des Netzes zu beschreiben, werden verschiedene Begriffe genutzt.

3.3.2 Abgrenzung von Smart Market und Smart Grid

Fälschlicherweise werden die Begriffe Smart Market und Smart Grid häufig unsauber voneinander abgegrenzt und somit kommt es zu Verwechslungen. Deshalb ist hierfür eine klare Abgrenzung der Begrifflichkeiten notwendig.

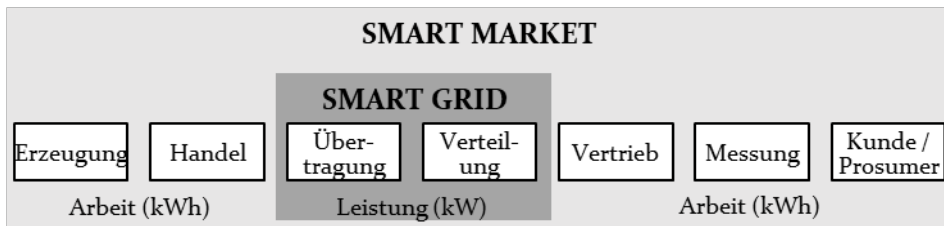


Bild 16: Abgrenzung des Begriffs Smart Grid vom Begriff des Smart Market [86]

Der Begriff Smart Market befasst sich wie in Bild 16 dargestellt mit sämtlichen Fragestellungen des Marktbereiches. Darunter fallen die Erzeugung,

der Handel, der Vertrieb, die Messung und der Kunde ebenso wie die Übertragung und Verteilung. Als Smart Grid hingegen werden konventionelle Elektrizitätsnetze (Grids) verstanden, welche durch Regel- und Informationstechnik ergänzt werden. Der Zusatz „smart“ wird so verstanden, dass Netzzustände in Echtzeit gemessen, ausgewertet und geregelt werden.

Der Begriff Smart Market umfasst also wesentlich mehr Bereiche als das Smart Grid, insbesondere den Handel mit Energie. Im Gegensatz dazu bezieht sich der Bereich des Smart Grids auf technische Funktionen wie beispielsweise den Energietransport mit Übertragung und Verteilung des Stroms [86].

3.3.3 Photovoltaikanlage als Energieerzeuger

Wie bereits in Abschnitt 3.2 beschrieben, werden Produktionsanlagen hauptsächlich mit Wechselstrom über das öffentliche Netz versorgt. Damit ist zumindest in Deutschland eine zuverlässige Versorgung gewährleistet. Mit einem Smart Grid ist es jedoch möglich und sinnvoll, zusätzlich Energie durch Eigenerzeugung zu nutzen. [87, 88]

Die Bundesregierung nutzt momentan mittels Subventionen und finanziellen Anreizen viele Möglichkeiten, um produzierende Unternehmen und Privatpersonen davon zu überzeugen, dass zukünftig mehr auf erneuerbare Energiequellen gesetzt werden muss. Damit soll sowohl zum Schutz der Umwelt als auch zum Einsparen fossiler Ressourcen beigetragen werden. Im Jahr 2022 wurde noch immer die Mehrheit der benötigten Energie durch fossile Brennstoffe erzeugt, der Anteil erneuerbarer Energiequellen an der Bruttostromerzeugung in Deutschland betrug lediglich 40 %. Zur Stromgewinnung aus regenerativen Energiequellen tragen verschiedene Technologien bei. [61, 89–91]

In Bild 17 ist dargestellt, dass der Großteil des Stroms, der aus erneuerbaren Quellen erzeugt wird, aus Windkraft, Biomasse, PV und Wasserkraft gewonnen wird. [90, 92] Bezogen auf die Industrie lässt sich nachweisen, dass im Jahr 2017 rund 80% der elektrischen Energie durch die öffentliche Versorgung bezogen wurde. [61, 89]

Relevant zur eigenen Stromerzeugung für Industrieunternehmen ist zum jetzigen Zeitpunkt die eigene PV-Anlage. Diese kann auf dem eigenen Dach der Industriehallen oder auf eigenem Gelände montiert sein. Nachfolgend soll die Funktionsweise von PV-Anlagen kurz beleuchtet werden.

Eine Photovoltaikanlage wird auch als Solaranlage bezeichnet und erzeugt elektrischen Strom aus der Sonnenstrahlung. Genutzt wird dabei der photovoltaische Effekt, der in Bild 18 dargestellt ist, und nur bei Halbleitermaterialien, die einen bestimmten Aufbau haben, eintritt [93, 94].

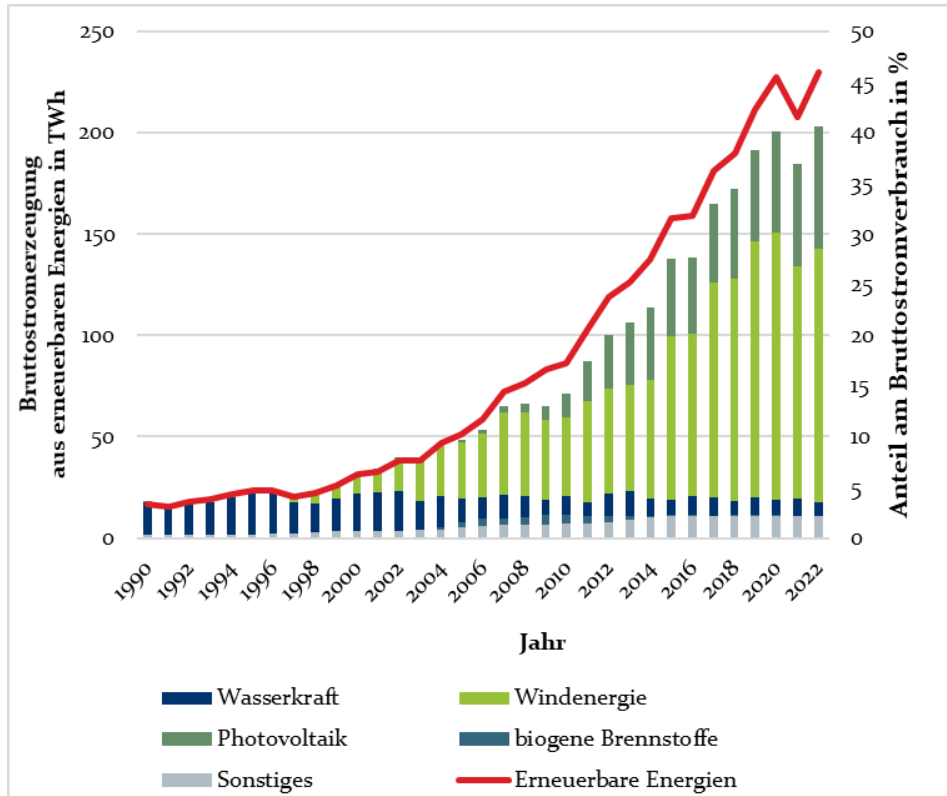


Bild 17: Entwicklung der Stromerzeugung in Deutschland nach [90, S. 7, 92]

Von den drei Schichten bestehen die äußeren beiden aus halbleitenden Materialien (z. B. Silizium). Bei Einwirkung von Sonnenstrahlung entstehen in diesen Materialien freie Elektronen und das Material erlangt Leitfähigkeit. Das zusätzliche Einbringen von Fremdatomen wird als Dotierung bezeichnet und verstärkt diesen Effekt. [93] Unterschieden wird zwischen n- und p-Dotierung. Unter n-Dotierung versteht man das Einbringen eines Elements, das eine höhere Anzahl an Valenzelektronen als Silizium besitzt und so zu einem Elektronenüberschuss führt. Im Gegensatz dazu tritt bei der p-Dotierung der umgekehrte Effekt ein. Atome mit weniger Elektronen wie z. B. Aluminium können ein freies Elektron aufnehmen. [93]

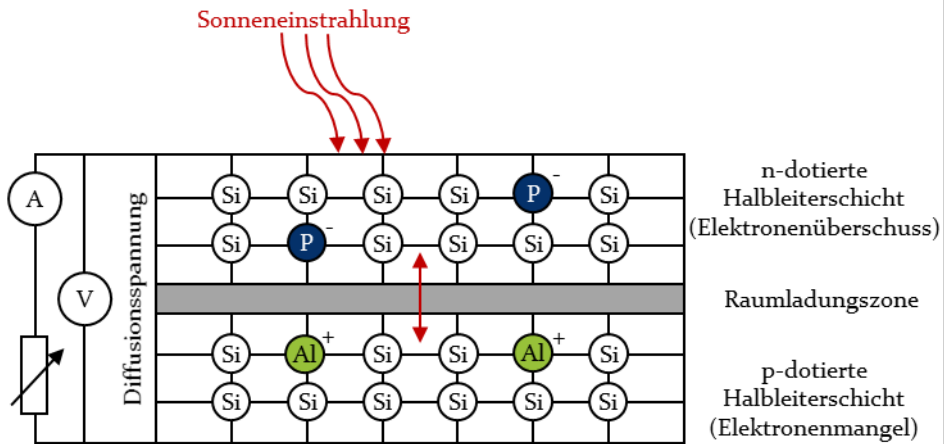


Bild 18: Wirkprinzip und Aufbau einer Solarzelle, in Anlehnung an [93]

Am p-n-Übergang entsteht die Raumladungszone, in welcher durch Diffusionsbewegungen ein elektrisches Feld mit der Diffusionsspannung entsteht. Der so entstehende Ladungsunterschied wird durch einen fließenden Gleichstrom ausgeglichen. Durch das Zwischenschalten eines Verbrauchers kann dieser Gleichstrom genutzt werden. [94] Vorteile von PV-Anlagen sind die Nutzung der Sonne als scheinbar unendliche, kostenlose und frei verfügbare Ressource und die hohe Lebensdauer der Solarmodule. Weiterhin entsteht bei der Stromerzeugung kein CO₂. [95] Ein bedeutender Nachteil ist die große Volatilität durch die direkte Abhängigkeit von Tageszeit und Wetterbedingungen. Allein durch eine PV-Anlage ist keine konstante Stromversorgung umsetzbar. Außerdem sind Anschaffung und Montage einer PV-Anlage nicht auf jedem Gebäude oder jedem Grundstück möglich und mit hohen Kosten verbunden. [93, 95, 96] Mittlerweile gibt es bereits eine Vielzahl an Privathäusern und Industrieunternehmen, die eine PV-Anlage nutzen und so vermehrt auf eine dezentrale Energieversorgung setzen.

Neben PV-Anlagen gibt es weitere regenerative Energieerzeuger, wie z. B. Wind- oder Wasserkraftanlagen, die weniger im privaten oder industriellen Bereich, sondern für die grundsätzlich Stromerzeugung durch Energieversorger installiert und betrieben werden. Diese sollen hier nicht näher erläutert werden.

3.3.4 Elektrische Energiespeicher

Zukünftig wird die eigene Stromversorgung durch die fluktuierende und nichtstatische Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen stärkeren Schwankungen unterliegen [93]. Deshalb ist es notwendig, effiziente Speichertechnologien in die Netze zu integrieren.

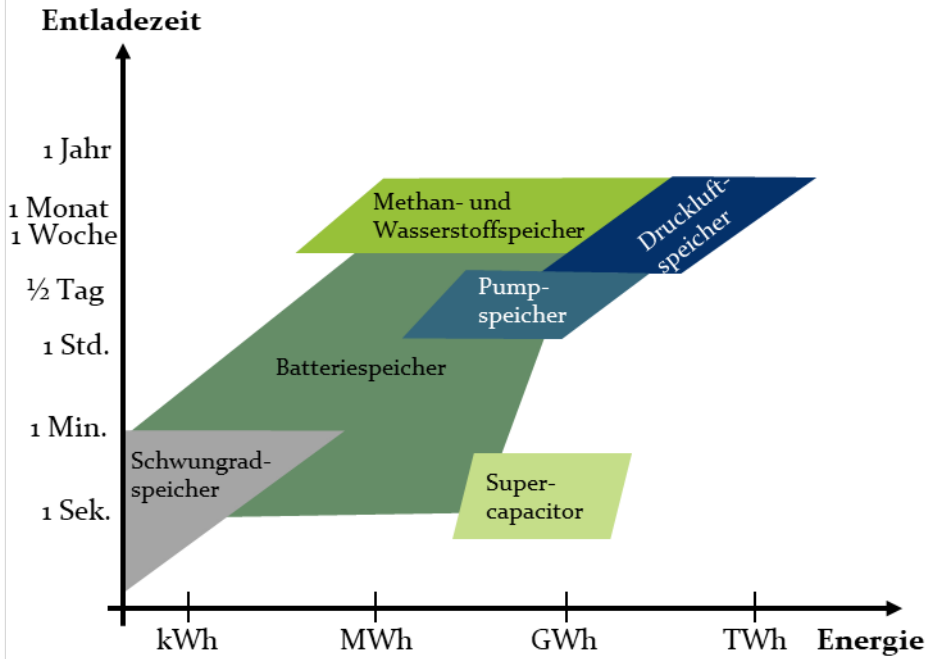


Bild 19: Potentiale zu Energiegehalt, Leistung und Entladezeit im Überblick in Anlehnung an [93, S. 398]

Damit tragen Speichertechnologien nicht unerheblich zur Kostenstruktur des Geschäftsmodells bei. Außerdem unterscheiden sich Speichertechnologien in Kurz- und Langzeitspeicher. Bisher werden diese vor allem zur Entladung bei Not- oder Engpässen eingesetzt und entladen. Grundsätzlich ist es sinnvoll, mehrere kleine Speicher zusammenzuschalten und so ein dezentrales, aber umfassendes Gesamtspeichervolumen zu bilden. [93]

Vorhandene Speicher können, wie in Bild 19 ersichtlich, nach der Technologie eingeteilt werden. So finden sich thermische, mechanische, chemische und elektrische Speicher, die sich in Leistung, Energiegehalt und Entladezeit unterscheiden. Insbesondere soll hier auf elektrische Speicher eingegangen werden. Akkumulatoren und Kondensatoren sind die bekann-

testen elektrischen Speicherarten, die auf dem Markt verfügbar sind. Elektrische Speicher unterscheiden sich zwar häufig in den Materialien, nicht aber in den benutzten Technologien. [93, 97]

Akkumulatoren speichern die Energie auf elektro-chemischer Basis und sind wiederaufladbar. Beim Laden und Entladen läuft ein elektrochemischer Prozess ab, der chemische in elektrische Energie wandelt und umgekehrt. Der Prozess des Ent- und Beladens wird als Zyklus bezeichnet. Je nach verwendetem Material verfügt der Akkumulator über den typischen Wirkungsgrad, die Energiedichte und die vorliegende Spannung. Mehrere Module werden zu einem großen Energiespeichern verbunden. Die Lebensdauer von Akkus ist direkt mit dem Ladezyklus verknüpft und beträgt 500 bis 2.000 Zyklen und kann so auf fünf bis zehn Jahre geschätzt werden. Akkus erreichen einen Wirkungsgrad zwischen 70 % und 80 %. [93, 98]

Im Gegensatz zu den Akkumulatoren verfügen Kondensatoren über die Fähigkeit, elektrische Ladung in Form von Gleichspannung in einem elektrischen Feld zu speichern. Die so gespeicherte Energie wird während des Entladevorgangs als Gleichstrom abgegeben. [93, 97] Ein Kondensator besteht aus zwei leitfähigen Elektroden und dazwischen einem Dielektrikum. Zwischen den beiden Elektroden wird beim Anlegen von Spannung ein elektrisches Feld induziert, welches Energie speichert. Je nachdem, welche Materialien eingesetzt werden, verändert sich die Kapazität des Kondensators. Kondensatoren gibt es in verschiedenen Bauweisen. [99] Im Gegensatz zum Akku gibt der Kondensator die Energie sehr schnell ab, weshalb eine Komponente zur Regelung der Spannung verbaut werden muss. Allerdings ist es möglich, die gespeicherte Energie innerhalb weniger Millisekunden abzurufen. Deshalb werden mit Kondensatoren beispielsweise Spannungsspitzen abgefangen. Außerdem verfügen Kondensatoren über niedrige Produktionskosten und langen Lebensdauern. [100]

3.3.5 Prosumer

Unter dem Begriff Prosumer werden Komponenten oder auch Netze verstanden, die weder ausschließlich Energie verbrauchen noch ausschließlich Energie erzeugen, sondern die – abhängig von Situation und Betriebsmodus – beides sein können: Konsument oder Erzeuger. [101] Der hier verwendete Begriff Prosumer setzt sich aus den beiden englischsprachigen Worten „**PRO**ducer“ für Erzeuger und „**ConSUMER**“ für Konsument zusammen und ist somit ein Neologismus.

3.3.6 Anforderungen an ein Smart Grid

Wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben, ist die alleinige Versorgung von Fabriken durch das Energieversorgungsnetz nicht effizient und zukunftssträtig. Zukünftig sollen möglichst eigene Energieerzeuger und -speicher in ein eigenes intelligentes Netz, ein Smart Grid, eingebunden und gesteuert werden. Dadurch soll die vorhandene Energie möglichst effizient genutzt werden. Um dies zu realisieren, müssen die Netze folgenden Anforderungen gerecht werden:

1. Sicherstellen eines Gleichgewichts zwischen Angebot und Nachfrage
2. Gewährleistung der Versorgungssicherheit
3. Verfügbarkeit des Energienetzes
4. Datenschutz
5. Cyber-Sicherheit

Grundsätzlich muss möglichst ein Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage der Energie hergestellt werden. Dies ist insofern nicht immer trivial, da der Zeitpunkt der Erzeugung und die erzeugte Menge durch Nutzung erneuerbarer Ressourcen nicht exakt vorhergesagt werden kann. Verschiedene Konzepte, wie die Lastverschiebung und die Einbindung diverser dezentraler Speichertechnologien, unterstützen dabei, die Balance zu erreichen. [102]

Blickt man global auf die gesamte Energieversorgung in Deutschland oder sogar weltweit, ist eine der wichtigsten Anforderungen an ein Smart Grid die Gewährleistung der Versorgungssicherheit für alle Verbraucher. [103] Dies führt zu einem sehr hohen Koordinationsaufwand, da viele dezentrale Energieverbraucher durch viele dezentrale Erzeuger versorgt werden. Beispielsweise waren Haushalte früher klassische Verbraucher, heute speisen diese durch ihre PV-Anlage auch Strom in das Versorgungsnetz ein und werden so zu einem Prosumer. Nur durch ein andauerndes Management ist die Koordination der Mischformen möglich, so dass weder Schwankungen in der Spannung oder Netzausfälle entstehen. [104] Das hier beschriebene Szenario kann auch auf eine Industriezelle oder -halle übertragen werden. So werden in einem Smart Grid über die Zelle oder Halle verschiedene Verbraucher, Erzeuger und Speicher verbunden. Um die Versorgungssicherheit aller Verbraucher zu gewährleisten, muss jederzeit genügend Energie zur Verfügung stehen. Dazu braucht es ein Energiemanagement. Auch hier ist es möglich, dass ein Verbraucher zu einem Erzeuger wird, denn ein Industrieroboter (IR) kann durch Rekuperation beim Bremsen Energie einspeisen.

Eine weitere Anforderung ist die Verfügbarkeit der Energie. Diese muss jederzeit sichergestellt sein. Gegebenenfalls ist diese über den Energieversorger sicherzustellen. Dazu müssen die Verträge möglichst flexibel gestaltet werden. Dies ist insbesondere durch die Wahl eines passenden Preismodells möglich. So wird bei Übertreten der vereinbarten Maximallast die Versorgung weiterhin gewährleistet, jedoch ein sehr hoher Preis berechnet. Im Sinne der durchgehenden Produktion ist dies durchaus vertretbar. [82] Im Vergleich zur Energieversorgung ist die Verfügbarkeit von Messdaten über das Datennetz nicht kritisch. Deshalb sollte grundsätzlich eine Trennung zwischen Energie- und Datennetz angestrebt werden. [103]

Eine wichtige Anforderung im Zusammenhang mit der oben genannten Datenübertragung sind der Datenschutz und die Cyber-Security. Durch die Digitalisierung wächst die Datenmenge stetig an. Daten werden von den einzelnen Verbrauchern an das Energiemanagement weitergegeben und anschließend eventuell auch an den Energieversorger übermittelt. Dies ist besonders in datensensiblen produzierenden Unternehmen nicht ohne Weiteres denkbar. Hier muss ggf. mit dem Energieversorger eine anonymisierte Auswertung erfolgen. Innerhalb der Unternehmensgrenze ist die Weitergabe von Daten sinnvoll, um so frühzeitig Erkenntnisse zu gewinnen und eingreifen zu können. [104–106]

Es gibt bereits verschiedene Ansätze zur Modellierung der Energieversorgung über ein intelligentes Gleichstromnetz und der dazugehörigen Regelung. Eine Möglichkeit ist Modellierung von Energiebausteinen in einer ereignisdiskreten Materialflusssimulation.

3.3.7 Simulation des Gleichstromnetzes mittels ereignisdiskreter Materialflusssimulation

3.3.7.1 Grundlagen

Zur Modellierung von Energiespeichern und des energetischen Verhaltens von Anlagen finden sich bereits wissenschaftliche Beiträge. So wird in einem Beitrag von BEIER et al. ein Verfahren zur Steuerung von Produktionsanlagen mit einem integrierten Druckluftsystem vorgestellt. Ziel dieses Ansatzes ist es, die Energieflexibilität zu erhöhen, ohne den agilen, dynamischen Systemansatz aufzugeben. Hier wird ein hybrider Ansatz bestehend aus ereignisdiskreter und kontinuierlicher Simulation diskutiert. Beide Simulationsarten werden in einem einzigen Werkzeug bearbeitet.

[107] Ein weiterer Beitrag desselben Autors beschreibt die Möglichkeit, erneuerbare Energiequellen und damit auch Energiespeicher in ein bestehendes Fertigungssystem für Elektrofahrzeuge zu integrieren. An dieser Stelle wird erneut der hybride Simulationsansatz aus ereignisdiskreter und zeitkontinuierlicher Simulation genutzt. [108]

Ein Konzept zur ganzheitlichen, zeitdiskreten Simulation stellen STAHL et al. in ihrem Beitrag vor. Darin wird die Energie- und Materialsimulation genutzt, um die Produktionsinfrastruktur und die -anlagen abzubilden. So wird der gesamte Fabrikbetrieb simuliert. [109] Auch hier findet ein einziges Simulationswerkzeug Anwendung.

Eine modellbasierte, zeitdiskrete Umsetzung für energetische Betrachtungen von Produktionssystemen wird von STOLDT et al. vorgestellt. [110] In diesem Zusammenhang wurde vom Fraunhofer IWU der Simulationsbaustein eniBRIC entwickelt. In der Nutzung innerhalb der Simulation bildet der Baustein auf Grundlage zustandsabhängiger Verbräuche die Energieflüsse in Produktions- und Produktionsinfrastruktursystemen ab. [111] Die Erweiterung der entstandenen Klassenbibliothek eines ereignisdiskreten Simulationswerkzeugs durch Energieerzeuger und -speicher wird durch STOLDT et al. beschrieben. [112] Hier kommt im Gegensatz zu den bewegten Elementen, die zur Materialflusssimulation genutzt werden, die ebenso in der Bibliothek vorgesehene Klasse der Flüssigkeiten zum Einsatz. Damit soll der Stromfluss nachgebildet werden.

Damit wird deutlich, dass der Energiefluss durch verschiedene Objektarten dargestellt werden kann.

3.3.7.2 Modellierung des Energieeinflusses

Eine Möglichkeit ist die Modellierung der Energie durch bewegliche Elemente (BE). Das sind physikalische Elemente, wie beispielsweise Werkstücke, die innerhalb einer Simulation bearbeitet werden. In der ereignisdiskreten Materialflusssimulation werden diese von einer Quelle erzeugt, in Stationen bearbeitet, in der Senke wieder vernichtet oder in einem Lager eingelagert.

Die Menge der benötigten Energie könnte durch BEs, die über keine räumliche Ausdehnung verfügen, modelliert werden. Ein BE bildet beispielsweise 1 kWh elektrische Energie ab. Die Entsprechung, die dabei gewählt wird, muss zum Anwendungsfall und zur gewählten Genauigkeit passen. Eine Quelle wäre in diesem Fall eine Photovoltaik- oder eine Windkraftanlage, eine Senke bilden hingegen Anlagen, welche Energie verbrauchen.

Dabei ist der Wirkungsgrad der Anlage zu berücksichtigen. Ein Energiespeicher wird durch ein Lager abgebildet, das entlang von programmierten Methoden passend zur Ladekurve des jeweiligen Speichers be- und entladen wird. Die standardmäßig vorgegebene lineare Be- und Entladung eines Lagers kann hier nicht herangezogen werden. Die Modellierung des Energieflusses mit BEs ist aufgrund der sehr vielen Objekte und der relativ komplexen Gestaltung des Verhaltens von Quellen und Senken sehr rechenintensiv und mit einigen Einschränkungen verbunden. Vorteile ergeben sich in der guten Nachvollziehbarkeit, weil der Energiefluss tatsächlich sichtbar und reproduzierbar ist. Weiterhin wäre es möglich, eine Bibliothek, welche in die Produktionsinfrastruktur-Bibliothek integriert wird, zu etablieren.

Eine weitere Möglichkeit bildet die MODELLIERUNG DURCH FLÜSSIGKEITSOBJEKTE, die freifließende Materialien in flüssiger oder gasförmiger Form simulieren. Diese werden durch Quellen erzeugt, in Tanks gespeichert, in Mixern zu Zwischen- und Endprodukten vermischt und in Senken vernichtet. Unterschiedliche Energieformen werden durch unterschiedliche Farben (Materialien) modelliert. Die Dichte der Energie ist zu vernachlässigen. Für die Modellierung eines Netz-Bausteins oder einer volatilen Energiequelle ist darauf zu achten, die Abflussrate der Flüssigkeitsquelle anzupassen. Für die Übertragung der Abflussrate auf die Energieversorgung werden Methoden für die Umrechnung der Energiemenge benötigt. Sämtliche Leistungswerte sind wie bei der Modellierung mit den BEs in einer Tabelle gespeichert und durch Methoden ausgelesen und überschrieben. Speicher werden durch Tanks modelliert. Beladung und Entnahme werden in Verbindung mit der Abflussrate modelliert. Wie mit BEs ist auch hier auf Be- und Entladekurven zu achten. Über Mixer wird die Energieumwandlung, die ebenfalls den Wirkungsgrad berücksichtigt, abgebildet. Grundsätzlich sind für Flüssigkeitsbausteine bereits fluidmechanische Berechnungsmethoden implementiert, welche die Nutzung dieser Bausteine für die Modellierung des Energieflusses erschwert. Eine genaue Abbildung von Energie durch Flüssigkeiten ist damit nicht möglich. Allerdings wäre eine gute Visualisierung des Energieflusses möglich.

Die dritte Möglichkeit besteht darin, INFORMATIONSFLUSSOBJEKTE zur Modellierung zu nutzen. Die Peripherie und der Energiefluss werden dabei ausschließlich über Methoden, Variablen und Tabellen modelliert. In den Methoden werden Verhaltenskurven der einzelnen Elemente, wie beispielsweise die Be- und Entladung von Energiespeichern hinterlegt. Sämtliche Parameter werden während der gesamten Laufzeit als Funktionen über die Zeit aufgezeichnet und in Tabellen gespeichert. Die technischen Kenngrößen der Anlagen und der Peripherie werden in globalen Variablen

gespeichert. Diese können bei Veränderungen an der Anlage im Sinne einer parametrisierten Modellierung angepasst werden. Durch die Nutzung von Informationsflussobjekten unterliegt die Modellierung der Energieversorgung keiner Restriktion, wie sie durch BEs oder Flüssigkeiten vorliegen. [P4, P5]

Tabelle 3: Bewertung der Modellierung mittels unterschiedlicher Objekte

	Materialfluss- objekte	Flüssigkeits- objekte	Informations- flussobjekte
Simulations- geschwindigk.	--	-	++
Flexibilität	o	o	++
Fehleranfällig- keit	o	o	+
Übersichtlich- keit	++	++	-
Genauigkeit	-	+	++

Legende: -- = sehr gering, ..., o = mittel, ..., ++ = sehr hoch

Außerdem ist die Modellierung sehr flexibel, da das Verhalten über die Zeit sehr genau abgebildet werden kann. Nachteile bei der Nutzung von Informationsobjekten sind die fehlende Visualisierung des Energieflusses und die damit verbundene hohe Fehleranfälligkeit. Damit werden verschiedene Arten mit Vor- und Nachteilen aufgezeigt, wie Energiefluss modelliert werden kann. Die Bewertung der einzelnen Arten wird in Tabelle 3 dargestellt. Werden Materialfluss oder Flüssigkeitsobjekte zur Modellierung herangezogen, ist festgelegt, dass die Simulation in einem Werkzeug, das über entsprechende Objektklassen verfügt, durchgeführt werden muss.

Im Abschnitt 3 wurde auf den Einsatz von Gleichstrom in der Industrie eingegangen. Dabei wurde insbesondere gezeigt, dass Gleichstrom für industrielle Anwendungen Vorteile bringt. Allerdings sind die Systemkonzepte für Gleichstromkreise noch am Beginn der Entwicklung, Standardisierungen müssen erarbeitet werden und Komponenten für die Sicherheitstechnik fehlen. Das Systemkonzept, welches im Rahmen des Forschungsprojekts DC-Industrie erarbeitet wurde, wurde vorgestellt. Außerdem beschäftigt sich eine Arbeitsgruppe, die aus den beiden DC-Industrie-Projekten

hervorgegangen ist, mit der Erarbeitung neuer Standards für DC-Netze in der deutschen Industrie. Erst wenn Standards vorhanden sind, werden die notwendigen Komponenten seriell hergestellt werden.

Wie bereits beschrieben, ist für das Betreiben eines Smart Grids ein Energie- bzw. Netzmanagement notwendig, das die einzelnen Energieverbraucher, -erzeuger und -speicher orchestriert. Ein solches ist jedoch direkt von der Gestaltung des Smart Grids und der Produktionsanlage mit den Verbrauchern abhängig. Dazu muss bekannt sein, welche Verbraucher parallel mit Energie versorgt werden müssen, welche Energieeinträge die Speicher beisteuern können und welche Einspeisung über die erneuerbaren Energiequellen zu erwarten ist. Folglich müssen sowohl produktionstechnische Anforderungen als auch elektrotechnische Anforderungen gemeinsam betrachtet werden. Um diesen Anforderungen bereits in der Planung von Produktionsanlagen begegnen zu können, bietet es sich an, Simulationswerkzeuge einzusetzen. Sowohl für die Simulation des Prozesses als auch für die Simulation des Energieflusses gibt es verschiedene Ansätze, die vorgestellt wurden. Genutzt wurde bisher stets ein Simulationswerkzeug, das produktionsspezifische und elektrotechnische Aufgaben gemeinsam bearbeitet. Zielführender ist es jedoch, auf Simulationen zurückzugreifen, die bereits erstellt wurden, so dass sich der Aufwand für die Erstellung der Simulation minimiert. Mit der Entwicklung eines solchen Simulationswerkzeugs beschäftigt sich das folgende Kapitel.

4 Plattform für die kombinierte Material- und Energieflusssimulation

4.1 Zielbeschreibung: Picture of the Future

Ein zentrales und hochpolitisches Thema ist zurzeit die zuverlässige Versorgung der Maschinen und Anlagen mit Energie. Immer wieder werden Szenarien von großflächigen und langandauernden Blackouts gezeichnet, Maßnahmenkataloge für den Fall der Fälle entwickelt und Auswirkungen eruiert. [113] Letztendlich sollen Nachrichten diesbezüglich nicht zu Panik in der Bevölkerung führen, sondern für die immer knapper werdenden Ressourcen der Erde und einer damit einhergehenden Krise in der Energieversorgung sensibilisieren. Das Energiesystem muss zukünftig nachhaltiger gestaltet sein, denn die fossilen Rohstoffe der Erde sind endlich. [114]

Ziel dieser Arbeit ist zu zeigen, dass automatisierte Produktionsanlagen nicht nur hinsichtlich Materialfluss und Prozessreihenfolge simuliert werden können, sondern auch die Energieversorgung und das Lastmanagement unter Verwendung von Gleichstrom in die Simulation einbezogen werden können. Dazu wird eine Simulationsplattform entwickelt, welche die einzelnen, für die Planung einer Produktionsanlage notwendigen, Simulationen orchestriert. Dafür soll für die einzelnen Simulationen auf solche zurückgegriffen werden, die für die Planung des Materialflusses, des Produktionsablaufs, der Prozesse und der Energieversorgung unabhängig von der kombinierten Simulation erstellt werden. Mit der entstandenen kombinierten Simulation soll überprüft werden können, ob die Planungen für die Systemarchitektur zur Energieversorgung zum Betrieb der Produktionsanlage ausreichend sind, um Lastspitzen im alltäglichen Betrieb, einen definierten Notfallbetrieb und eine zeitweise Autarkie mit vollständiger Produktion in der Anlage realisieren zu können.

Daraus ergibt sich die Forschungsthese: Es ist möglich, mittels der kombinierten Simulation zu überprüfen, ob ein geplantes Energieversorgungsnetz mit Gleichstrom (DC Smart Grid) in der Produktion für diesen Anwendungsfall sinnvoll, effizient und anwendbar ist.

Diese These soll entlang einzelner Teilschritte (TS) bewiesen werden:

- TS 1. Für eine definierte automatisierte Produktionsanlage werden der vollständige Produktionsprozess in einer multiphysikali-

schen Simulation und der Materialfluss in einer ereignisdiskreten Simulation abgebildet und Informationen über die Betriebszustände der Anlagen gespeichert.

- TS 2. Aus den gespeicherten Betriebszuständen und den zugehörigen Energiebedarfsdaten wird der gesamte Energiebedarf der Verbraucher in der Anlage zu diskreten Zeitpunkten ermittelt und dargestellt.
- TS 3. Das physikalische Verhalten der Energiespeicher und -erzeuger wird in einer kontinuierlichen, mathematischen Simulation modelliert, simuliert und die jeweiligen Betriebszustände werden gespeichert.
- TS 4. In der kombinierten Simulation werden die einzelnen Simulationen hinsichtlich der Zeit synchronisiert und die notwendigen Daten über die Betriebszustände zwischen den Werkzeugen ausgetauscht, so dass eine gesamtheitliche Betrachtung der Produktionsanlage möglich ist.

Im Gegensatz zu bereits bestehenden Ansätzen, in welchen in Simulationen Werkzeugen zur Materialflusssimulation ereignisdiskret Informationen zum Energiebedarf einzelner Prozessschritte abgebildet [32] oder die Energiebedarfe einzelner Maschinen ermittelt [115] werden, ist es über die kombinierte Simulation möglich, kontinuierliche Simulationen zu Vorgängen in Energieversorgern und -speichern mit den ereignisdiskreten Materialfluss- und multiphysikalischen Simulationen zu verbinden und auftretende Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Dabei müssen verschiedene Herausforderungen berücksichtigt werden. Zwischen den Werkzeugen müssen die Zeitschritte und der Zeitpunkt des Beginns der Simulation synchronisiert werden. Weiterhin ist eine Infrastruktur zu schaffen, welche den Austausch der benötigten Daten ermöglicht und auf die von allen beteiligten Simulationen Werkzeugen zugegriffen werden kann.

Es entsteht ein Simulationen Werkzeug, das zur Planung der Energieversorgung automatisierter Produktionsanlagen genutzt werden kann. Im Planungsprozess sind unterschiedliche Aspekte zu berücksichtigen:

1. Dimensionierung der Größe des Speichers über den Energieinhalt, um
 - a. Spitzen in der Entnahme aus dem Versorgungsnetz zu glätten bzw. deren Höhe zu verringern,
 - b. im Notfall die Anlage im Betriebszustand des Nothalts anhalten zu können und

- c. über eine kurze Zeitspanne die vollständige Produktion autark ohne Unterstützung aus dem Versorgungsnetz fortsetzen zu können.
2. Dimensionierung der Einspeisung (ALM), denn die Leistung der Einspeisung ist letztendlich der Flaschenhals für die Leistung der betriebenen automatisierten Produktionsanlage (APA).
3. Dimensionierung der regenerativen Energiequellen, die an das Gleichstromnetz angeschlossen werden.
4. Dimensionierung der Stromschienen und der benötigten Leiter, sowie der Umrichter.
5. Positionierung der Maschinen (Verbraucher) und der Einspeisungsorte aus den Quellen und den Erzeugern.
6. Simulation der Reaktionsgeschwindigkeit der Verbraucher, der Speicher und der Quellen, um die korrekten Typen auszuwählen.
7. Beurteilung der Risiken der APA mittels Simulationsdurchläufen mit dem Ziel, bereits in der Planung der Anlage eine Fehlermöglichkeits- und -Einflussanalyse (FMEA) durchzuführen.

Dabei werden in dieser Arbeit nur die Aspekte 1-3 betrachtet, da es sich bei der verteilten Simulation um ein erstes Konzept handelt, das weiter detailliert und ausgeführt werden kann.

Bei der Steuerung handelt es sich um ein Energieengpassmanagement, denn zunächst erfolgt die Steuerung der Anlage und des Energiemanagements über ein festgelegtes Konzept. Veränderungen daran werden nur vorgenommen, wenn die Energie für die geplanten Prozessschritte nicht ausreichend vorhanden ist, wie z. B. im oben beschriebenen Fall des Notfalls.

Evaluiert werden soll die kombinierte Simulation anhand einer definierten Produktionsanlage, die mit einem Gleichstromnetz mit Erzeugern von erneuerbaren Energien und Speichern versorgt wird. Es soll überprüft werden können, ob die geplante Netzinfrastruktur für diese Anlage mit den gegebenen Anforderungen hinsichtlich Vermeidung von Spannungsspitzen im Betrieb, eines Notfallbetriebs und einer Autarkiezeit für die Weiterführung der Produktion passend dimensioniert ist.

4.2 Synchronisation von Werkzeugen für eine verteilte Simulation

Für die kombinierte Material- und Energieflusssimulation in einem Gleichstromnetz, die nicht in einem einzigen Simulationswerkzeug durchgeführt werden soll, sondern die auf die bereits in der Planungsphase der Anlage entstandenen Simulationen zurückgreift, ist es notwendig, Synchronisationsmechanismen zu erstellen (siehe Abschnitt 2.2.4), welche die einzelnen Werkzeuge synchronisieren. Außerdem müssen für die verteilte Simulation Kommunikationswege gefunden werden, über die alle beteiligten Werkzeuge kommunizieren.

4.2.1 Strategie

Dafür sollen – wie in Abschnitt 2.2.5 beschrieben – direkte, dezentrale Kommunikationskanäle zwischen den einzelnen Simulationsumgebungen und dem Co-Simulationsmaster, dem Orchestrator, etabliert werden.

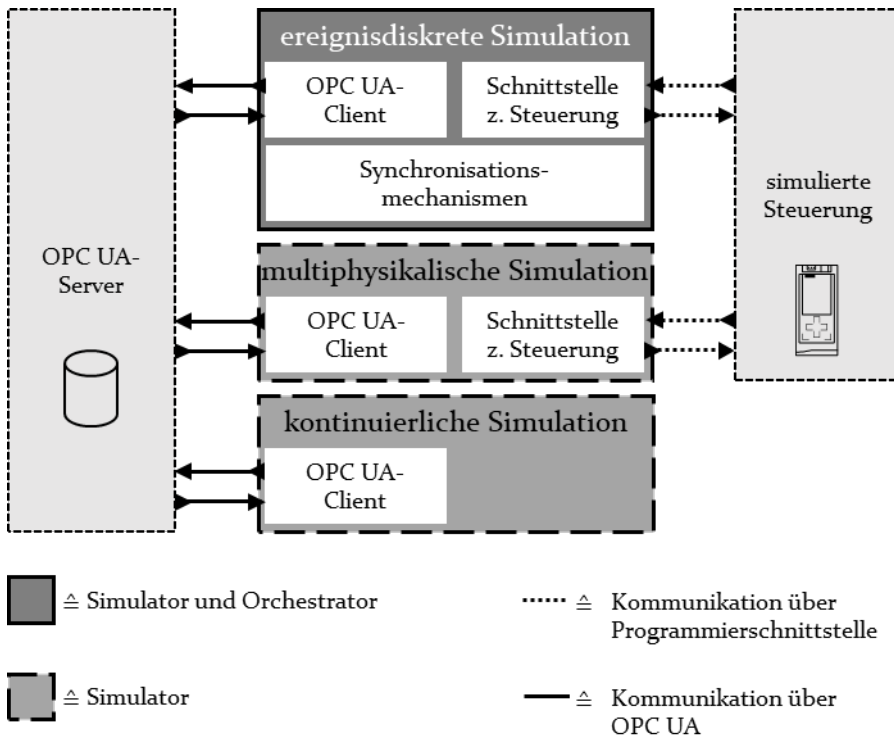


Bild 20: Werkzeugunabhängige Architektur der Co-Simulation

Die Simulationsaufgaben sollen damit vollständig in den einzelnen Simulationswerkzeugen durchgeführt werden, denn der Orchestrator übernimmt ausschließlich die Synchronisierung und die Orchestrierung der einzelnen Werkzeuge. So entsteht für diesen wenig Rechenaufwand und damit kaum erhöhte Latenzzeit in der verteilten Simulation. Zum Austausch der Daten ist eine Datenbank notwendig, welche Schnittstellen zu den unterschiedlichen Simulationsumgebungen unterstützt. Dafür wird OPC UA genutzt, denn es handelt sich um einen maschinenneutralen Standard und viele Simulationswerkzeuge verfügen über eine OPC UA-Schnittstelle. Weitergegeben werden Anlagenzustände bzw. die Zustände der Energiequellen und -speicher, sowie die Entnahme der Energie aus dem Netz als Koppelsignale. Diese Daten werden im OPC UA-Server gespeichert. Folglich müssen alle Werkzeuge, die genutzt werden, über einen OPC UA-Client verfügen, der einen Verbindungsaufbau mit dem Server ermöglicht. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Simulationswerkzeugen geschieht über das standardisierte Kommunikationsprotokoll. Eine Übersicht über die Architektur ist in Bild 20 dargestellt. Die Clients verbinden sich mit dem Server zu diskreten Zeitpunkten, lesen die Variablen, die in den Knoten gespeichert sind, und beschreiben diese wieder oder neu. Auf diese Weise werden die Signale ausgetauscht.

Da eine virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) durchgeführt werden soll, ist auch eine Schnittstelle zu einer simulierten Steuerung notwendig. Hier soll möglichst eine bereits definierte und vorkonfigurierte Schnittstelle zu den jeweiligen Programmen genutzt werden. Ein erster Entwurf der Architektur für die Co-Simulation, der noch toolunabhängig ist, ist in Bild 20 dargestellt. Sämtliche Mechanismen zur Koordination und Synchronisation der Simulationswerkzeuge werden in den Orchestrator-Bausteinen umgesetzt. Beim Orchestrator kann es sich zusätzlich um eine eigene Simulationsumgebung handeln.

4.2.2 Schnittstellen

Über die Schnittstellen werden die anliegenden Zustände mittels Koppelsignalen über den Server zwischen den Anwendungen ausgetauscht. Es werden dabei die Koppelsignale, die aus dem Prozess resultieren, von denjenigen, die das Energiemanagement betreffen, separat aufgeführt. Die Koppelsignale, welche den Prozess betreffen, sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Koppelsignale zum OPC UA-Server für den Prozess

Variable	Funktion	Initialwert
state_foerderband	Betriebszustand des Förderbandes	Standby $\triangleq$ P_{Leerlauf}
state_ir	Betriebszustand des IR	Standby $\triangleq$ P_{Leerlauf}
state_fluxen	Betriebszustand des Schritts Fluxen	Standby
state_vorheizen	Betriebszustand des Schritts Vorheizen	Standby
state_loeten	Betriebszustand des Schritts Löten	Standby
state_testanlage	Betriebszustand der Testanlage	Standby $\triangleq$ P_{Leerlauf}

Das Präfix (in diesem Fall „state“) gibt dabei an, um welche Art von Variable es sich handelt. Mit den hier vorliegenden Variablen werden die Anlagenzustände übergeben. Die notwendigen Koppelsignale sind zugleich die Variablen, die im OPC UA-Server gespeichert sind. Die Koppelsignale für das Energiemanagement leiten sich aus den Komponenten im Gleichstromkreis ab. Diese sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Variablen aus dem Energiemanagement

Variable	Funktion	Initialwert	Einheit
state_akku	Betrieb des Akkumulators i.S.v. laden (true) und entladen (false)	false	
soc_akku	Ladezustand des Akkus	100.00	%
P_pv-anlage	Ertrag der PV-Anlage	0.00	kW
E_gesamt	Gesamtleistungsbedarf der APA	0.00	kWh
E_netz	Netzbezug	0.00	kWh

Mit diesen Variablen wird maßgeblich der Zustand der Energieerzeuger und -speicher übertragen. Auf Basis der Werte agiert das Energiemanagement. Die Signale zwischen den Werkzeugen und der Steuerung ergeben sich direkt aus dem Steuerungsprogramm und werden auch nur zwischen den beiden Teilnehmern ausgetauscht. Ein Speichern im OPC UA-Server ist nicht notwendig, da die anderen Simulationsteilnehmer nur indirekt über die Zustandsvariablen betroffen sind.

4.2.3 Synchronisationsmechanismus

Grundsätzlich erfolgen die Berechnungen für die einzelnen Simulationsteilnehmer in den verschiedenen Werkzeugen selbstgetaktet. Wie in Abschnitt 2.2.4 dargestellt ist, braucht es für eine zeitliche Synchronisierung der Simulationen einen Taktgeber. Die Synchronisation soll anhand der realen Zeit geschehen. Grundsätzlich sollte die Skalierung durch das Simulationstool mit der geringsten Performanz bezüglich der Zeitskalierung vorgegeben werden. Die geringste Performanz weist das Simulationstool auf, das den höchsten Detailgrad im Modell hat und somit die höchste Rechenleistung benötigt. Da nicht jedes Simulationstool über eine Schnittstelle zur eigenen virtuellen Simulationszeit verfügt, soll ein Synchronisationsmechanismus angewandt werden. Die Zeitbasen werden dabei nicht auf die reale Zeit synchronisiert, sondern nur die Zeitskalierung innerhalb der genutzten Simulationstools angeglichen. Die abgelaufene Simulationszeit des Taktgebers wird in einem festen Zeittakt (beispielsweise alle zehn Millisekunden [ms]) auf den OPC UA-Server geschrieben und von allen anderen Simulationsteilnehmern im gleichen Zeitintervall ausgelesen.

Zum Startzeitpunkt T_0 wird der Variablen „time_“ (siehe Tabelle 6) die abgelaufene Simulationszeit des Taktgebers übergeben. Nach einer Sekunde Echtzeit wird einer anderen Variable der aktuelle Wert zum Zeitpunkt T_1 zugewiesen. Auf diese Weise wird mittels der Differenz aus den beiden Zeitpunkten die Zeitskala des taktgebenden Tools ermittelt. Der ermittelte Wert wird über eine Variable an den OPC UA-Server und damit an die anderen Tools übergeben. Daraufhin werden die eigenen Zeitskalen in den anderen Werkzeugen angepasst.

Weiterhin kann durch diesen Mechanismus geprüft werden, in welchem Zustand die Simulation des taktgebenden Tools ist. So wird auch ein Stopp detektiert, wenn die abgelaufene Simulationszeit zum Zeitpunkt T_1 gleich der zum Zeitpunkt T_0 ist. Ein Stopp des Taktgebers führt zum Anhalten und zum Zurücksetzen aller anderen Simulationsteilnehmer in den

initialen Zustand. Über den Single-Step-Mode ist auch eine taktsynchrone Simulation mit der virtuellen Steuerung realisierbar und die Simulatoren tauschen nach jedem Zyklus die Daten mit dieser aus. Im Moment des Datenaustauschs wird die Steuerung in einen Pause-Modus gesetzt und die virtuelle Zeit und der Ablauf des Programms angehalten. Fortgesetzt wird die Simulation der virtuellen Steuerung erst, wenn der Taktgeber und Orchestrator das Signal zum Beenden des Modus gibt und eine neue Zeitspanne abläuft. Auf diese Weise ist grundsätzlich eine Synchronisation zwischen der Steuerung und den Simulatoren möglich. Aufgrund des nötigen Pause-Modus schreitet dann die Simulationszeit langsamer voran als die Echtzeit. Außerdem führt die Nutzung weiterer Schnittstellen zur Einschränkung der Performance, weshalb auf eine Synchronisierung zur Steuerung verzichtet werden soll und lediglich der Stopp-Modus zur Initialisierung genutzt wird. Die tatsächliche Umsetzung des Mechanismus ist grundsätzlich abhängig von den genutzten Simulationswerkzeugen und damit verbunden auch von den verfügbaren Schnittstellen. Somit wird die Umsetzung im Schritt der Implementierung der Simulation dargestellt. Dennoch werden an dieser Stelle die Variablen, welche für die Realisierung der Zeitsynchronisation benötigt werden, ergänzt und in Tabelle 6 aufgeführt. Diese müssen durch die OPC UA-Clients lesbar und beschreibbar sein.

Tabelle 6: Ergänzung der Variablen für die Zeitskalierung

Variable (alt)	Variablenname (neu)	Initialwert
time_multiophysik	mcd_Simulation_Zeit	0.0 s
time_zeitskala	sl_Simulation_Zeitskala	1.0 s
time_diskret	plantsim_Simulation_Zeit	0.0 s
time_kontinuierlich	sl_Simulation_Zeit	0.0 s

4.3 Umsetzung

In Abschnitt 2.1.2 wurde das Referenzmodell Industrie 4.0 vorgestellt. Da sind die einzelnen Hierarchieebenen aufgeführt. Für die Simulation sind mehrere Ebenen notwendig, die über unterschiedliche Simulationswerkzeuge abgebildet werden. Eine Übersicht dazu ist in Bild 5 dargestellt.

4.3.1 Definition der Simulationsarten

Die kombinierte Simulation hat den Vorteil, dass die in den jeweiligen Ebenen bereits bestehenden Simulationen genutzt und synchronisiert werden. Die unterschiedlichen Simulationsarten sind in Bild 21 aufgezeigt.

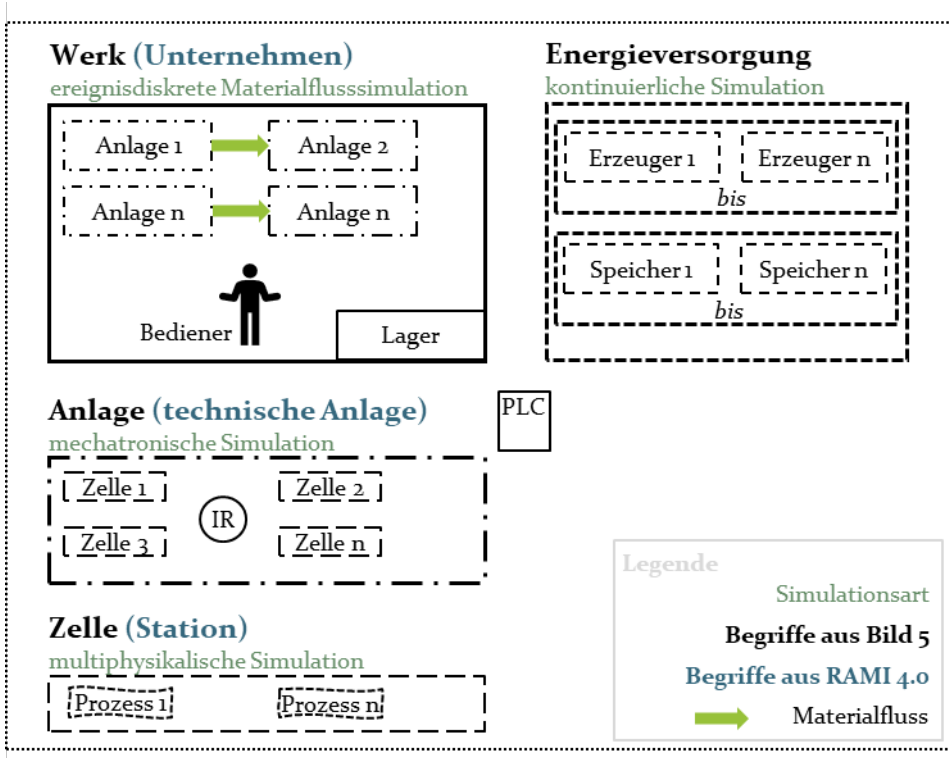


Bild 21: Darstellung der Art der Simulationen entlang der Hierarchieachse des RAMI 4.0

Die Prozesse in den Zellen werden mittels multiphysikalischer Simulation simuliert, während die Anlage, die aus verschiedenen Zellen besteht, in einer mechatronischen Simulation abgebildet wird. Diese beiden Arten werden in einem Tool umgesetzt und auch für die VIBN eingesetzt. Das gesamte Werk oder auch einzelne Fabrikhallen werden mittels der ereignisdiskreten Materialflusssimulation simuliert. Auf dieser Ebene ist die Einbindung des Energiemanagements sinnvoll, da mehr als eine Anlage mit einem intelligenten Stromnetz versorgt wird. Aus den Betriebszuständen der Zellen und somit auch der Anlagen lässt sich der jeweilige Energiebedarf ermitteln. Wie das umgesetzt wird, wurde bereits in den Arbeiten von PARYANTO [115] für die mechatronische Simulation sowie von SOLDING [116], DONHAUSER [32] und THIEDE [117] in der Materialflusssimulation

aufgeführt. Die Methoden zur Ermittlung des Energiebedarfs werden angewandt und so der Energiebedarf der Anlage ermittelt und gespeichert. Dies ist mit moderatem Rechenaufwand möglich, da es sich hier um eine verteilte Simulationsumgebung handelt, und eine Anlage betrachtet wird, die durch ein Gleichstromnetz versorgt wird. Damit entfallen Umrichtvorgänge, die mit Leistungsverlusten einhergehen. Weiterhin gestalten sich die Berechnungen einfacher, da die Sinusform des Wechselstroms keine Berücksichtigung findet.

Die Ergebnisse der Simulation werden genutzt, um zu prüfen, ob die Kapazität der Speicher und die Leistung der regenerativen Quellen in der Planung ausreichen, um das Werk mit allen Anlagen so mit Energie zu versorgen, dass Spitzen gegenüber dem Versorgungsnetz minimiert, eine Autarkiezeit eingehalten und die Situation des Nothalts abgefangen werden kann, oder ob hier nachgebessert werden muss. Schließlich wird ermittelt, welche Energiemenge aus dem Versorgungsnetz entnommen wird und wie hoch die Bedarfsspitzen sind, um die Größe des ALM als Schnittstelle zu definieren. Zur Umsetzung der kombinierten Simulation ist es notwendig, das Gesamtsystem zu definieren und zu detaillieren.

4.3.2 Definition des Gesamtsystems

Grundsätzlich werden zwei verschiedene Aspekte betrachtet, nämlich der Materialfluss und die Prozesse auf der einen Seite und die Energiemodelle zur Versorgung auf der anderen Seite. Modelliert werden müssen folglich alle Komponenten im Gleichstromnetz und der gesamte Ablauf mit allen Prozessen und dem Materialfluss. Diese beiden Simulationsarten werden, wie in Bild 22 gezeigt, über den Co-Simulationsmaster verbunden.

Dabei sollen die in der jeweiligen Disziplin (Mechanik, Elektrik...) gängigen Simulationsarten (ereignisdiskret, mechatronisch, multiphysikalisch, kontinuierlich) verwendet werden und wenn möglich auf bereits bestehende Simulationen zurückgegriffen werden. Ebenso soll kein Export der Modelle aus den bereits genutzten Simulationswerkzeugen vorgenommen werden, sondern die Modelle dort weiterhin bearbeitet werden. Das erlaubt einerseits den Bearbeitern ein Arbeiten in den bekannten Werkzeugen und erfordert keine zusätzliche Einarbeitung in ein neues, gemeinsames Simulationsprogramm, andererseits wird sichergestellt, dass die kombinierte Simulation jeweils mit den aktuellen Simulationsmodellen durchgeführt wird. Die Modellierung des Co-Simulationsmasters und damit die Verbindung der einzelnen Simulationswerkzeuge wird bei Umsetzung dieses Konzepts

gesondert durchgeführt. Innerhalb der einzelnen Simulationsmodelle sollen zur Integration in die kombinierte Simulation Vereinfachungen vorgenommen werden. Dabei geht es vor allem um solche, die keine Auswirkungen auf die verteilte Simulation und vor allem auf die Energieversorgung haben. Nur so ist es möglich, die Planung vollständig zu prüfen.

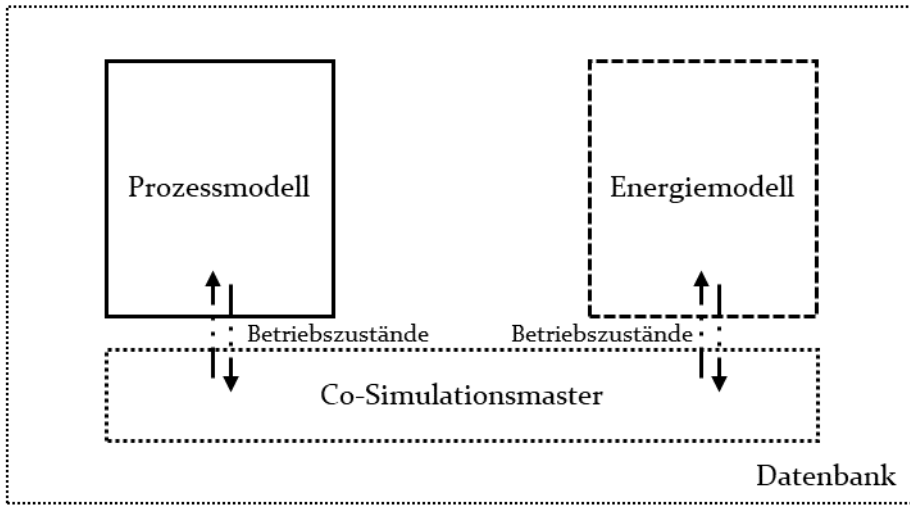


Bild 22: Darstellung der Umsetzung der verteilten Simulation

Als Grundsatz wird festgelegt, dass der Materialfluss auf Ebene des Werkes und die Prozesse in den einzelnen Anlagen hinsichtlich der Reihenfolge und der Art vorgegeben sind. Die Prozesse und Handhabungsaufgaben werden stets in der gleichen Reihenfolge durchgeführt und bearbeitet. Die Tätigkeiten der jeweiligen Arbeitsplätze bleiben immer gleich. Somit lassen sich die Zustände der Zellen und der Anlagen bereits zu Beginn des Planungsprozesses definieren.

Hinsichtlich der Vereinfachung gilt für alle Simulation im Bereich Prozesse und Materialfluss, dass Sicherheitsvorkehrungen, Absperrungen und durch die Umgebung definierte Gegenstände nicht Teil des Modells sind und für die kombinierte Simulation ausgeblendet werden. Damit wird Rechenleistung eingespart. Die in der mechatronischen und multiphysikalischen Simulation übliche Kollisionsprüfung und -erkennung beschränkt sich in der kombinierten Simulation nur auf den Arbeitsraum der Zelle.

Auch für die Modellierung der Komponenten im Gleichstromnetz sollen Vereinfachungen angenommen werden. Es wird in diesem Konzept nur das

Verhalten der Quellen und der Speicher mittels kontinuierlicher Simulation modelliert. Die Energiemenge, die über den Netzanschluss bezogen wird, muss ebenso abgebildet werden. Eine Modellierung der elektrotechnischen Komponenten, des ALM, der Wandler, der Gleichrichter, der Sicherheitstechnik und der elektrischen Leitungen ist nicht vorgesehen, da in dieser Arbeit die grundsätzliche These, dass eine kombinierte Simulation zur Überprüfung des geplanten Gleichstromnetzes genutzt werden kann, überprüft werden soll. Die zukünftige Einführung weiterer Komponenten in die Simulation ist möglich. Diese Einschränkungen führen dazu, dass der Wirkungsgrad der Anlage und die Reaktionszeit des Smart Grid verfälscht werden, da die Wirkungsgrade und die Latenzzeiten der elektrotechnischen Komponenten nicht berücksichtigt werden. Allerdings sind die Reaktionszeiten so gering, dass sie zunächst grundsätzlich vernachlässigt werden sollen. Für die Anpassung des Wirkungsgrads soll die Simulation mit einem Faktor beaufschlagt werden, der sich aus der technischen Spezifikation der Komponenten ergibt.

4.4 Informationsweitergabe

4.4.1 Datenverarbeitung

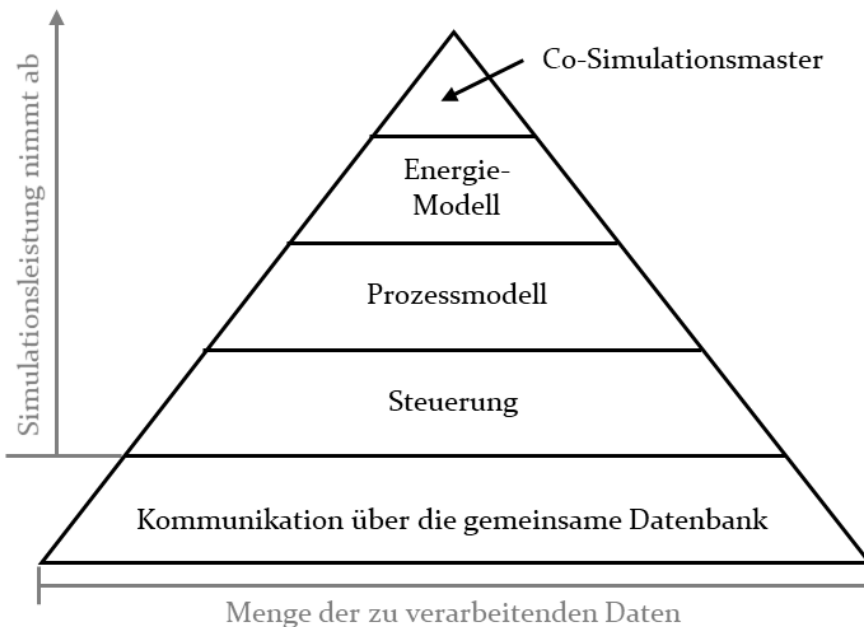


Bild 23: Schematische Darstellung der Datenverarbeitung in der verteilten Simulation

Der Co-Simulationsmaster übernimmt, wie in Bild 23 dargestellt, selbst kaum Simulationstätigkeiten. Aus diesem Grund verarbeitet der Co-Simulationsmaster nur wenige Daten und steht an der Spitze des Dreiecks. Seine Aufgabe ist es, alle an der verteilten Simulation teilnehmenden Simulationen zu synchronisieren und zu orchestrieren, außerdem gibt er Daten weiter. Der Empfang von Daten über den Co-Simulationsmaster führt im jeweiligen Simulationswerkzeug dazu, dass Betriebszustände geändert und Prozesse gestartet werden. So werden auch einzelne Simulationsschritte ausgelöst und Prozesse, die simuliert werden, gestartet. Damit werden die Simulationsleistung erhöht und Daten verarbeitet. Nach Abschluss des Prozesses bzw. des Simulationsschritts ändern sich wieder Betriebszustände der Anlage, die wiederum weitergegeben werden. Innerhalb der Anlage bzw. des Werks werden die Prozesse und die Materialflüsse mit einer Steuerung gelenkt. Diese wird ebenfalls simuliert und regelt in den Simulationswerkzeugen stetig Werte von Signalen und Aktoren. Um die notwendigen Daten weitergeben und verarbeiten zu können, ist eine gemeinsame Datenbasis bzw. eine gemeinsame Datenbank notwendig. Jedes beteiligte Simulationswerkzeug muss über eine Schnittstelle zur Datenbank verfügen. Deshalb wird hier ein OPC UA-Server verwendet. Dieser muss über Schnittstellen zu allen beteiligten Tools verfügen, ist jedoch kein Simulationswerkzeug.

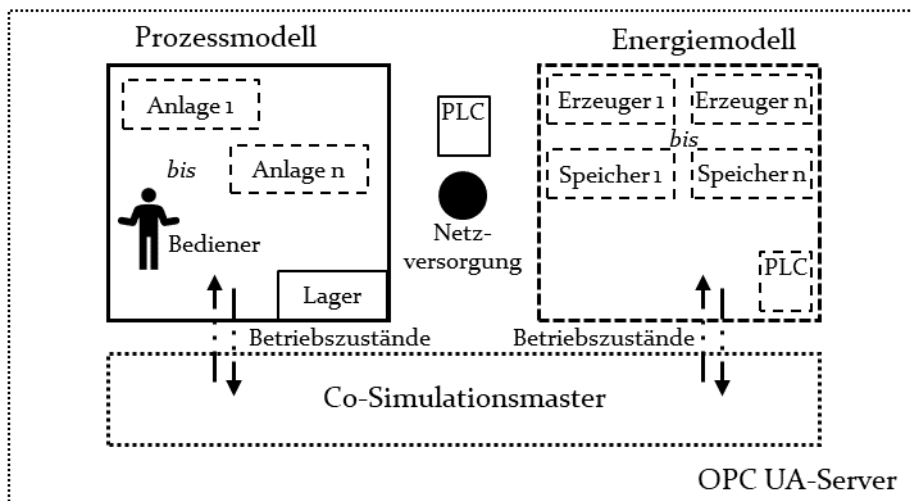


Bild 24: Schematische Darstellung der Informationsweitergabe

Aufbauend auf Bild 21 und Bild 22 ergibt sich Bild 24, das die Informationsweitergabe darstellt. Dazu werden die Betriebszustände der Anlagen notwendig. Diese müssen so formalisiert werden, dass sie mittels des OPC UA-Servers ausgetauscht und von den Simulationswerkzeugen verarbeitet werden können.

4.4.2 Informationsmodell

Die Daten beschreiben das technische System [20]. Diese werden entweder als technische Daten aus den Spezifikationen übernommen oder im Laufe der Simulation erhoben [23]. Das Informationsmodell arbeitet mit einer großen Datenmenge, die sich aus den technischen Spezifikationen ergibt und die für die Simulation benötigt wird. Die Daten zu allen notwendigen Betriebszuständen sind in Tabelle 7 dargestellt. Alle Daten werden zunächst in der gemeinsamen Datenbank mit den jeweiligen Initialwerten angelegt, ehe diese in den beteiligten Simulationswerkzeugen verarbeitet werden. Die veränderten Werte der Daten werden wieder in der Datenbank gespeichert.

Tabelle 7: Darstellung der technischen Daten unabhängig von der Ausgestaltung der APA

Daten	Abkürzung	Werte	Beschreibung
Zustand Anlage 1...n	$Z_{A1...An}$	wartend arbeitend gestört im Stand-by aus	übergibt den jeweiligen Zustand der Anlage aus dem Simulationswerkzeug
Zustand Zelle 1...n	$Z_{Z1...Zn}$	wartend arbeitend gestört im Stand-by aus	übergibt den jeweiligen Zustand der Zelle aus dem Simulationswerkzeug
Zustand manueller Arbeitsplatz	Z_{m_AP}	wartend arbeitend gestört im Stand-by aus / unbesetzt	übergibt den Zustand der manuellen Arbeitsplätze
Zustand Gesamtprozess (Werk)	$Z_{Prozess}$	automatisch manuell gestört	über die Steuerung wird ausgelesen, in welchem Zustand

		im Stand-by aus	sich der gesamte Prozess befindet
Ladezustand Speicher 1...n	$SoC_{S1...Sn}$	0 % bis 100 %	übergibt den Ladezustand (engl.: State-of-Charge [SoC])
Einspeise- leistung Erzeuger 1...n	$P_{E1...En}$	$[P] = W$	übergibt die Einspei- seleistung durch den jeweiligen Erzeuger
Energiebe- zug aus dem Netz	P_{Netz}	$[P] = W$	übergibt den mo- mentanen Bezug aus dem Versorgungs- netz
Strompreis	K_{Strom}	$[K_{Strom}] = \text{€}/\text{kWh}$	Übergibt den Preis einer Kilowattstunde

Eine grafische Übersicht über die Weitergabe der Betriebszustände und der Daten ist in Bild 25 dargestellt. Weitergegeben bzw. ausgetauscht werden nur Daten, die sich mit Ablauf der Prozesse während der Simulation verändern. Im OPC UA-Server werden keine technischen Daten der Anlagen, die aus den Spezifikationen ermittelt werden, gespeichert.

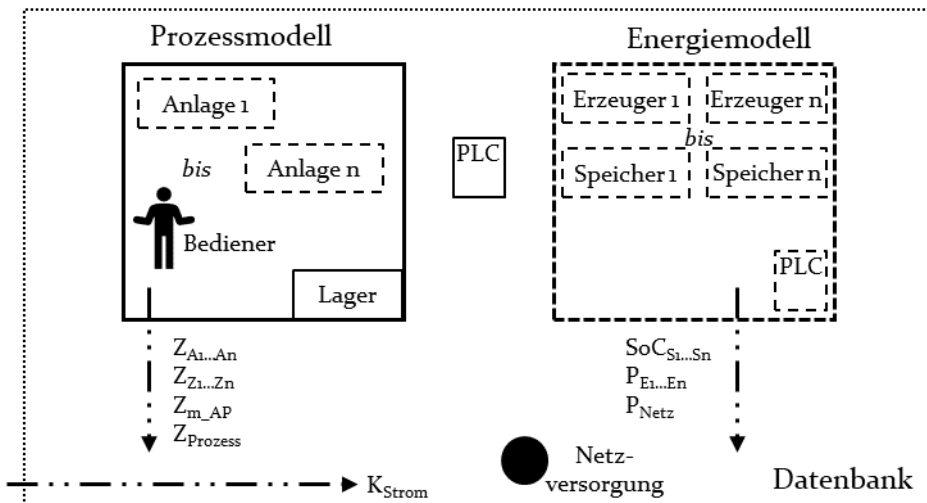


Bild 25: Grafische Darstellung der Datenweitergabe in der kombinierten Simulation

Anlagenspezifische Daten werden aus deren jeweiligen Spezifikation übernommen. Dies betrifft die Leistungsdaten und somit den Energiebedarf der einzelnen Anlagen ($P_{A1...An}$) und Zellen ($P_{Z1...Zn}$) in Abhängigkeit des jeweiligen Betriebszustandes, die Leistungsdaten der Energiespeicher (Lade- und Entladestrom I , Nennspannung U_{Nenn} , Energieinhalt $E_{E1...En}$, obere und untere Ladegrenze SoC_{min} / SoC_{max} , Reaktionszeit t_R) und die technischen Daten der regenerativen Energiequellen. Diese Daten sind direkt von der Art des Speichers und der Art der Quelle abhängig. Damit ist das Informationsmodell vollständig und abgeschlossen beschrieben.

Das Energiemanagement im Smart Grid wird durch die Steuerung definiert. Hierzu sind verschiedene Architekturen denkbar.

4.5 Ausgestaltung des Smart Grids

4.5.1 Architektur des Smart Grids

Für die Architektur des Smart Grids wird auf das Systemkonzept des Konsortiums von DC-Industrie 2 zurückgegriffen. Das Konzept ist in Bild 26 dargestellt. Das DC-Netz wird über die Netzeinspeisung aufgespannt. Sie übernimmt die Ein- und Rückspeisung vom und in das Wechselstromnetz.

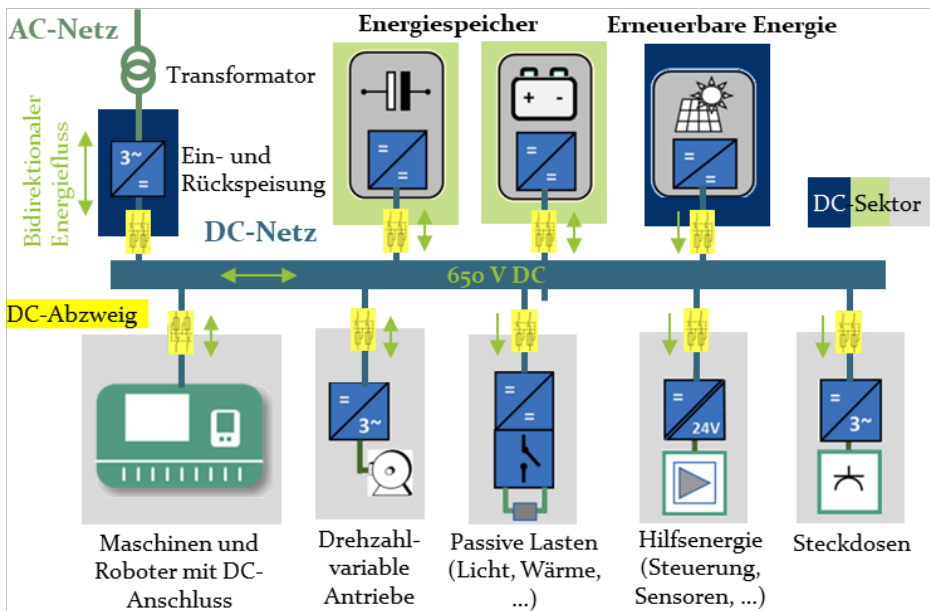


Bild 26: Gleichstromnetz mit DC-Sektoren nach [55]

Das DC-Netz wird an den DC-Abzweigen in unterschiedliche Sektoren mit unterschiedlichen Spannungsniveaus eingeteilt. Die DC-Sektoren bilden jeweils eigene Subnetze, an welchen Anlagen, Zellen, Antriebe, Betriebsmittel und Hilfsmittel angeschlossen werden. [55] Jede Quelle und jeder Speicher bildet einen eigenen DC-Sektor und wird über einen eigenen Abzweig an das DC-Netz angeschlossen.

Diese Architektur liegt auch der Simulation zugrunde. Alle Verbraucher, alle Quellen und alle Speicher entnehmen Energie dem DC-Netz bzw. führen dem DC-Netz Energie zu, jeweils über einen eigenen Abzweig. Neben dem DC-Netz zur Energieversorgung wird ein Kommunikationsnetz benötigt, das dem Energiemanagement dient. Darüber werden Daten erfasst, die die Zustände aller Komponenten im Netzwerk wiedergeben. Diese werden über die angebundenen Sensoren bereitgestellt.

4.5.2 Energiemanagement in einem Smart Grid

Das Energiemanagement steuert den Energiefluss im DC-Stromkreis. Damit beeinflusst es das Quellenmanagement, welches das Ziel verfolgt, die Quellen und Speicher optimal auszunutzen. Damit werden Quellen priorisiert oder das Verhalten der Speicher (i.S.v. Aufladen bzw. Entladen) definiert. Über das Management wird die Stabilität des Netzes sichergestellt, d.h. die Netzspannung gehalten. Nach DC-Industrie 2 lassen sich vier Ausbaustufen des Leistungsflussmanagements unterscheiden, nämlich der Basisverbund, die dezentrale Gruppenregelung, die erweiterte Gruppenregelung und die zentrale Netzregelung. [55]

Die Unterscheidung hinsichtlich der Nutzung von Regelkennlinien und der Kommunikation wird in Tabelle 8 dargestellt.

Im vorliegenden Fall wird auf eine zentrale Netzregelung zurückgegriffen, die über eine standardisierte Steuerung realisiert wird. Diese gibt sämtliche Sollwerte vor, die von den einzelnen Teilnehmern übernommen werden. Aus diesem Grund sind für die einzelnen Teilnehmer keine Regelkennlinien dezentral notwendig. Für diese Regelung müssen neben allen Verbrauchern auch alle Quellen und Speicher in die Kommunikationsstruktur eingebunden werden.

Tabelle 8: Ausbaustufen des Leistungsflussmanagements nach [55]

		Kommunikation	
		ja	nein
Regelkennlinien	ja	Erweiterte Gruppenregelung	Dezentrale Gruppenregelung
	nein	Zentrale Netzregelung	Basisverbund

Diese zentrale Steuerung übernimmt das gesamte Management über alle sich im Smart Grid befindenden Komponenten. Ziel dabei ist, dass die Verbraucher jederzeit mit der benötigten Energie versorgt werden. In Abhängigkeit der Spannung werden über die zentrale Steuerung den einzelnen Teilnehmern Vorgaben gemacht, um die Spannung zu halten. In Kommunikation mit der Steuerung, die den Prozess steuert, werden die Vorgaben vorausschauend getroffen, um die Energie für eine herannahende Leistungsspitze bereitzustellen und diese so gegenüber dem Versorgungsnetz zu verringern.

Je nach Größe der Anlage ist eine einzige Steuerung für Prozess- und Energiemanagement ausreichend. Es handelt sich dabei um eine zentrale Steuerung, die Prozess- und Energiemanagement übernimmt. Nutzt man mehrere für unterschiedliche Aufgaben, ist die Kommunikation zwischen den Steuerungen sicherzustellen, da sonst kaum vorausschauende Entscheidungen getroffen werden können. An die Steuerung ist eine Mensch-Maschine-Schnittstelle angeschlossen. Auf diese Weise ist es für den Bediener möglich, einzugreifen und Veränderungen am Ablauf von Prozessen und Materialfluss sowie am Smart Grid vorzunehmen. So ist mit der zentralen Steuerungseinheit eine schnelle Reaktion auf geänderte Kunden- und Marktanforderungen möglich und es wird eine marktsynchrone Produktion sichergestellt. Durchlaufzeiten und Bestände können angepasst werden. Das führt weiterhin zu einer Steigerung der Effizienz der Anlage und einer Senkung der Energiekosten. Eine Senkung der Energiekosten und eine Steigerung der Effizienz hinsichtlich der benötigten Energie kann nur mit einem sinnvollen und angepassten Energiemanagement gelingen.

Damit ist die Systemarchitektur des Gleichstromnetzes, das simuliert wird, festgelegt:

1. Alle Verbraucher werden über eigene DC-Abzweige als DC-Sektoren angeschlossen.
2. Alle Quellen und Speicher bilden eigene DC-Sektoren.
3. Es gibt eine Schnittstelle zum Wechselstromnetz.
4. Es wird über ein zentrales Energiemanagement, das der Prozesssteuerung folgt, gesteuert. Dies bedeutet, dass der vollständige Ablauf des Prozesses gesichert werden muss – unabhängig davon, aus welcher Quelle oder welchem Speicher die Energie dafür entnommen wird. Falls die priorisierten regenerativen Quellen und Speicher nicht ausreichen, ist die zusätzliche notwendige Energie über die Einspeisung dem Wechselstromnetz zu entnehmen.
5. Das Energiemanagement wird auf Ebene des Werks angesiedelt, da mehrere Anlagen als Verbraucher daran angeschlossen werden können. Dies bedeutet, dass es in die ereignisdiskrete Simulation eingebunden wird.
6. Auf dieser Ebene wird auch der Netzbaustein modelliert.
7. Ebenso auf Werksebene wird die Steuerung angebunden, da diese sowohl den Materialfluss und die Prozesse als auch das intelligente Stromnetz steuert.

4.6 Definition der Steuerungsstrategien

Für das Energiemanagement gibt es unterschiedliche Steuerungsstrategien, die im Folgenden aufgezeigt werden. Zunächst sollen der Materialfluss und die Prozesse mit den darin befindlichen Zustandsübergängen betrachtet werden. Für die Ebene der Anlage wird die mechatronische, für die Ebene der Zelle die multiphysikalische Simulation genutzt.

4.6.1 Prozesssteuerung

Für die Prozessmodellierung ist an manchen Punkten ein hoher Detailgrad notwendig, während es an anderen Stellen ausreicht, eine hohe Abstraktionsebene zu betrachten. Einerseits sollen die Vorgänge innerhalb einzelner Zellen nicht genauer betrachtet, sondern nur die Übergänge zwischen den Zuständen berücksichtigt werden, andererseits sollen andere Vorgänge exakt modelliert werden, so dass die Modellierung bis hin zur Kollisionserkennung in der Simulation reicht. Dazu ist die Simulation physikalischer

Gesetzmäßigkeiten notwendig, wie sie in der multiphysikalischen Simulation genutzt wird, da die tatsächliche Berührung zwischen den Körpern berechnet werden muss. Eine Physik-Engine, die sich der physikalischen Größen wie beispielsweise der Masse oder Gravitation bedient, kommt hier zum Einsatz und detektiert die Kollisionen, berechnet die resultierenden Kräfte und Momente und aktualisiert den Systemzustand. Alternativ kann der physikbasierte Ansatz gewählt werden. Dabei wird die Reibung zwischen den einzelnen Kontaktflächen berechnet. [118]

Auf Ebene des Werkes ergibt sich aus dem geplanten Ablauf für die Anlagen und den Materialfluss ein Konzept für die Steuerung. Ebenso ergibt sich ein solches für jede einzelne Anlage, welches die zeitliche Reihenfolge der Prozesse in den Zellen vorgibt. Alle Abläufe sollen in einer einzigen, zentralen Steuerung abgebildet werden, während Zellen bzw. Stationen ggf. über eine integrierte Steuerung verfügen. Der Ablauf, der letztendlich in der Steuerung implementiert wird, ist abhängig von den beteiligten Anlagen und Zellen und muss je nach Anwendung definiert und programmiert werden.

Für die Simulation der Komponenten aus dem Smart Grid muss in der verteilten Simulation nicht unbedingt ebenfalls eine multiphysikalische Simulation genutzt werden. In einem Review über Werkzeuge für die virtuelle Inbetriebnahme wurde deutlich, dass unterschiedliche Tools verschiedene Funktionalitäten haben, jedoch energetische Einflussfaktoren nicht berücksichtigt werden. [P6] Dass es unterschiedliche Möglichkeiten, wie Energiefluss in ereignisdiskreten Simulationswerkzeugen abgebildet werden kann, gibt, wurde bereits in Abschnitt 3.3.7 dargestellt.

Im vorherigen Abschnitt wurde bereits festgelegt, dass das Energiemanagement zentral angesiedelt ist. Im folgenden Abschnitt werden zwei Möglichkeiten für Steuerungsstrategien aufgezeigt.

4.6.2 Steuerungsstrategien im intelligenten Gleichstromnetz

Grundsätzlich sollen zwei unterschiedliche, jedoch nicht gegensätzliche Konzepte für das Verhalten der Energieversorgung ermöglicht werden: ein energieeffizientes und ein kosteneffizientes Konzept.

Das energieeffiziente Konzept ist darauf ausgelegt, einen möglichst hohen Grad an Eigenversorgung durch eigene regenerative Energiequellen zu erzielen, während das kosteneffiziente Konzept eine möglichst hohe Wirtschaftlichkeit forciert. Hier ist neben der Nutzung der Energie eine Rück-

speisung in das Versorgungsnetz und damit ein Verkauf von Energie denkbar. Damit bildet der zeitabhängige Einkaufs- und Verkaufswert von Energie eine Eingangsgröße für die Steuerung.

In dieser Arbeit wird das energieeffiziente Konzept umgesetzt. Dennoch ist das Ziel, auch Spannungsspitzen, welche durch die temporäre Gleichzeitigkeit von Prozessen im Ablauf entstehen, zu reduzieren, so dass diese nicht vom Versorgungsnetz abgefangen werden müssen. Damit ist es laut Abschätzungen möglich, Leistungsspitzen um bis zu 30 % zu reduzieren. Um das zu realisieren werden die vorhandenen Energiespeicher geregelt. [55] Dies geschieht im vorliegenden Fall über die zentrale Steuerung. Die energieeffiziente Steuerung ist nicht neu, sondern wird bereits in vielen Energiesystemen, die erneuerbare Energiequellen enthalten, umgesetzt. Der zentrale Parameter ist die Leistung, die durch die Energiequellen eingebracht wird. Alle weiteren Schritte der energieeffizienten Steuerung sind von diesem Wert abhängig. Ist die Leistung durch die Einspeisungen größer als der kumulierte Leistungsbedarf aller Anlagen, werden eine autarke Energieversorgung erreicht und zusätzlich die Speicher befüllt. Dieser Puffer wird dann genutzt, wenn der Ertrag durch die Stromquellen geringer ist als der kumulierte Leistungsbedarf.

Aus den Festlegungen und Definitionen für die verteilte Simulation lässt sich Bild 24 weiterentwickeln und es ergibt sich unter Einbezug von Bild 7 eine vollständige Übersicht über die verteilte Simulation. Diese ist in Bild 27 gezeigt. Zu sehen sind die Simulationswerkzeuge der ereignisdiskreten, der multiphysikalischen und der kontinuierlichen Simulation, die über den Kommunikationskanal (Betriebszustände werden über den OPC UA-Server ausgetauscht) miteinander kommunizieren. Allerdings kommunizieren die Werkzeuge nur über den CO-Simulationsmaster und nicht untereinander. An diesen ist auch die zentrale Steuerung angebunden, die sowohl das Energiemanagement steuert als auch die Ablaufsteuerung von Prozess- und Materialfluss in der multiphysikalischen bzw. ereignisdiskreten Simulation übernimmt.

Der kumulierte Energiebedarf aller Anlagen des Werks wird ebenfalls im Co-Simulationsmaster ermittelt. Deshalb ist es auch sinnvoll, hier die Netzversorgung zu modellieren. Da bereits in Abschnitt 3.3.7 gezeigt wurde, dass Energiefluss grundsätzlich in ereignisdiskreten Simulationswerkzeugen abgebildet werden kann, wird auch dafür ein solches genutzt.

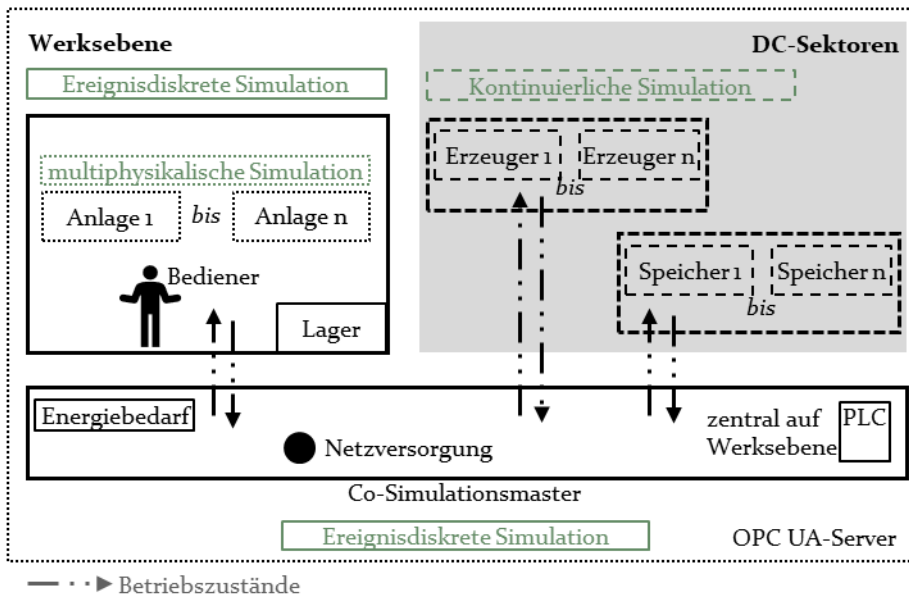


Bild 27: vollständige Übersicht über die verteilte Simulation

Unabhängig von konkreten Komponenten ist es möglich, aufgrund der Simulationsarten geeignete Werkzeuge auszuwählen.

4.7 Auswahl geeigneter Simulationswerkzeuge für die verteilte Simulation

Ausgangspunkt für die Spezifikation der Software ist die Anwendbarkeit auf den vorliegenden Anwendungsfall sowie die Eignung für eine verteilte Simulation. Dazu müssen die Werkzeuge auf Verfügbarkeit von OPC UA-Schnittstellen hin überprüft werden. Falls diese nicht bereits vorhanden sind, muss es möglich sein, OPC UA-Schnittstellen zu erstellen. Sonst ist eine Teilnahme als Simulationswerkzeug an der vorgestellten, verteilten Simulation nicht möglich. Die Simulationsumgebung ist so definiert, dass sie mit weiteren, auch anders aufgebauten, Anlagen ebenso funktioniert.

Die für den jeweiligen Anwendungsfall eingesetzten Simulationswerkzeuge, deren verwendete Funktionalitäten und die genutzten Schnittstellen sind in der folgenden Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9: Softwarekomponenten der verteilten Simulation

Software	Schnittstellen	Verwendungszweck
Siemens NX Mechatronics Concept Designer (MCD)	- OPC UA	- Geometriemodell - multiphysikalische Simulation - mechatronisches Konzept - virtuelle Inbetriebnahme
Siemens Tecnomatix Plant Simulation	- PLCSIM Advanced (virtuelle Steuerung) - OPC UA	- Prozessablauf - Energieverbräuche - ereignisdiskrete (Materialfluss-)Simulation - virtuelle Inbetriebnahme
MATLAB Simulink Simscape Electrical OPC Toolbox	- OPC UA	- kontinuierliche Simulation - Verhaltensmodelle - Simulation elektrischer Komponenten
Python		Implementierung des OPC UA-Servers
Visual Studio Code		Code-Editor
SIMATIC S7-PLCSIM Advanced	- Siemens NX - Plant Simulation - TIA-Portal	Simulation einer SIMATIC S7-1500 Steuerung
TIA-Portal (Totally Integrated Automation Portal)	- PLCSIM Advanced - WIN CC	- Projektierung von Steuerungscode, des Anwenderprogramms - Online-Überwachung des Programmablaufs - Simulation von HMIs

Mit Blick auf die ausgewählten Simulationswerkzeuge ist Plant Simulation aufgrund der programmspezifischen und gut individualisierbaren Programmiersprache SimTalk als Co-Simulationsmaster geeignet.

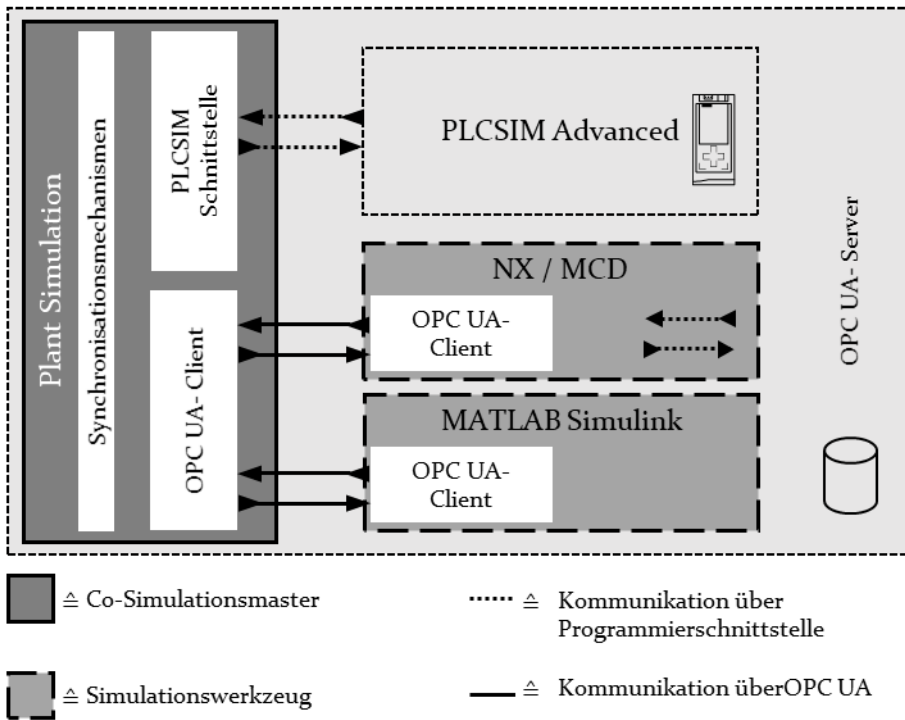


Bild 28: Implementierung der verteilten Simulation mit den ausgewählten Simulationswerkzeugen

NX und der MCD übernehmen die multiphysikalische Simulation, die elektrischen Komponenten werden als Verhaltensmodell über eine kontinuierliche Simulation in MATLAB Simulink erstellt. PLCSIM Advanced simuliert die genutzte Steuerung. Die sich daraus ergebende verteilte Simulation ist in Bild 28 dargestellt.

Im nächsten Abschnitt der Arbeit wird die kombinierte Simulation anhand einer konkreten Infrastruktur erstellt und im darauffolgenden Abschnitt validiert. Die kombinierte Simulation wird mit den hier ausgewählten Werkzeugen umgesetzt.

4.8 Implementierung der verteilten Simulation

Die Kommunikation in der verteilten Simulation wird über den OPC UA-Server und die Simulationswerkzeuge als OPC UA-Clients realisiert. Für die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Werkzeuge muss keine neue Schnittstelle definiert werden, denn sie verfügen bereits werkseitig über die Möglichkeit, als OPC UA-Client zu agieren.

4.8.1 Erstellung des OPC UA-Servers

Der OPC UA-Server wird unter Nutzung der vorhandenen Bibliothek „freeopcua“ implementiert. Dazu sind die Ausführung und Nutzung von Python-Skripten notwendig. Diese werden mit dem Code-Editor Visual Studio Code in Verbindung mit der Erweiterung für die Programmiersprache Python erstellt. Zunächst soll bei der Erstellung auf die Nutzung einer Authentifizierung verzichtet werden. Für die Implementierung des OPC UA-Servers wird die Klasse „Server“ des vordefinierten Moduls „opcua“, sowie die Klasse „bool“ aus dem ebenso vordefinierten Modul „builtins“ benötigt. Nach dem Import dieser kann ein Objekt der Klasse „Server()“ angelegt werden. Als Übergabeparameter erwartet die Klasse eine Variable mit Serveradresse und dem zugehörigen Port. Da die Ausführung der verteilten Simulation zunächst lokal auf einem einzigen Computer durchgeführt werden soll, wird die Loopback-Adresse „localhost“ mit der IP-Adresse 127.0.0.1 genutzt werden. [119] Der Server erhält die Bezeichnung „OPCUA_Simulation_Server“, wodurch auch der Namensraum definiert wird. Über eine Methode wird der Knoten „Objects“, angelegt, welcher die für die verteilte Simulation benötigten Objekte „MCD“, „PlantSim“ und „Simulink“ enthält. In diesen Knoten werden mithilfe der Methode „add_variable“ die in Tabelle 4, Tabelle 5 und Tabelle 6 genannten Koppelsignale implementiert. Diesen werden der Namensraum, der Variablenname und der Initialwert übergeben. Die aufgeführten Variablen sollen nicht nur gelesen werden können, sondern auch beschrieben werden. Dies wird über die Funktion „set_writable()“ umgesetzt. Mit diesen Voreinstellungen ist es bereits möglich, den OPC UA-Server zu starten. In der Konsole des Computers wird die an den Server vergebene Adresse ausgegeben. So ist es möglich, dass sich die Clients mit dem Server verbinden. Die tatsächliche Umsetzung der Kommunikation und der Synchronisierung wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

4.8.2 Signalkopplung mit NX

Für den in Abschnitt 4.2.3 entworfenen Synchronisationsmechanismus wird aufgrund der Priorität der Produktionsprozesse die abgelaufene Simulationszeit in NX benötigt. Einige Koppelsignale wurden bereits in den vorherigen Abschnitten genannt. Der Start des Produktionsprozesses wird über Plant Simulation realisiert. Ein Austausch der Koppelsignale findet über die OPC UA-Verbindung statt. Um die Informationen aus dem MCD auszulesen und weiterzugeben, sind Signale, die mit den internen Parametern

tern des formalen Modells verknüpft sind, anzulegen. Diese sind im Anschluss mit den Variablen des in Abschnitt 4.8.1 erstellten OPC UA-Servers zu verknüpfen.

Ein Laufzeitausdruck liefert über „sim_elapsed_time()“ die abgelaufene Simulationszeit des MCD. Dieser kann intern einem Signal zugewiesen werden. Außerdem werden die Koppelsignale zum Start des Produktionsprozesses im MCD über einen Signaladapter angelegt. Mittels des Signaladapters werden Ein- und Ausgangssignale mit den Parametern der physikalischen Objekte verknüpft. Hier sind auch mathematische Umrechnungen oder die Einführung von Bedingungen möglich. Die Signale und die Parameter sind direkt von den Produktionszellen und den zugehörigen Prozessen abhängig. Die Koppelsignale aus dem OPC UA-Server bilden im MCD Eingangssignale und werden mit den jeweiligen Parametern über Bedingungen verknüpft. Innerhalb des MCD werden angelegte Signale in eine Tabelle aufgenommen und fortlaufend mit den Koppelsignalen verknüpft. Um die Kopplung und den Zugriff auf den Server umzusetzen wird der OPC UA-Client an der integrierten Schnittstelle konfiguriert und die Zykluszeit synchronisiert. Da die Nomenklatur der Signale in den Simulationswerkzeugen konsistent umgesetzt wird, werden die Signale des MCD automatisiert mit den im Server vorhandenen verknüpft.

Berücksichtigt werden neben den Koppelsignalen für die kombinierte Simulation auch die Signale zur Kommunikation mit der virtuellen Steuerung. Der Übersicht wegen werden dazu Ein- und Ausgangssignale für die Prozesse in den Zellen mit Hilfe mehrerer Signaladapter angelegt. Daraus ergeben sich weitere Tabellen mit den vorliegenden Ein- und Ausgangssignalen des MCD, auf die über den Server zugegriffen wird.

Als Co-Simulationsmaster übernimmt Plant Simulation die direkte Kommunikation mit der Steuerung. Außerdem interagiert Plant Simulation über den OPC UA-Server mit Simulink.

4.8.3 Einbindung von Simulink in die kombinierte Simulation

Da NX über die multiphysikalische Simulation keine Betrachtungen zum Leistungsbedarf der Anlage durchführt, werden die Leistungswerte aus den Betriebszuständen der Zellen im Co-Simulationsmaster Plant Simulation ermittelt und an den OPC UA-Server übergeben. Die Werte des Leistungsbedarfs werden durch Simulink mittels eines OPC UA-Clients vom Server gelesen. Weiterhin sind für die kontinuierliche Simulation in Simulink die

Zeitskalierung und die abgelaufene Simulationszeit, die auf den OPC UA-Server geschrieben wurden, relevant. Dazu muss eine Verbindung zwischen dem Server und Simulink etabliert werden. Dies wird über eine Funktion realisiert. Der dazugehörige Code ist in Bild 29 gezeigt. Die Funktion wird während jedes Simulationsschritts zyklisch aufgerufen, um dem Modell die Werte der Koppelsignale aus dem Server zur Verfügung zu stellen. Den Status über den Verbindungsaufbau und die erfolgte Definition von Knoten, geben die Variablen „init_Server“ und „init_Nodes“ aus. Die Werte dieser Variablen werden nur beim ersten Aufruf der Funktion gesetzt. Anschließend bleiben diese konstant. Für die Kopplung wird die bereits vorhandene OPC-Toolbox genutzt. Hier stehen bereits einzelne Funktionen zur Verfügung. So werden mittels der Funktion `opcua()` Serveradresse und Port des Servers übergeben. Im Anschluss an den erfolgreichen Verbindungsaufbau wird der auf dem Server vorhandene Objektknoten „Simulink“ nach den Variablenknoten der Koppelsignale durchsucht.

```
function [x] = Read_Write OPCUA(y)
%variables
persistent init_Server;
persistent init_Nodes;
persistent uaClient;
persistent sl_PV_Leistung;
persistent sl_Widerstand;
persistent sl_Simulation_Zeit;
persistent sl_Simulation_Zeitskala;
%initialize variables
if (isempty(init_Server))
    init_Server = 0;
    init_Nodes = 0;
end
%OPC UA server address and connecting client to the server
if init_Server == 0
    init_Server = 1;
    uaClient = opcua('127.0.0.1',1025);
    connect(uaClient);
end
%define variable nodes in the server
if uaClient.isConnected == 1 && init_Nodes == 0
    init_Nodes = 1;
    Node = findNodeByName(uaClient.Namespace, 'Simulink', '-once');
    sl_PV_Leistung = findNodeByName(Node, 'sl_PV_Leistung', '-once');
    sl_Widerstand = findNodeByName(Node, 'sl_Widerstand', '-once');
    sl_Simulation_Zeit = findNodeByName(Node, 'sl_Simulation_Zeit', '-once');
    sl_Simulation_Zeitskala = findNodeByName(Node, 'sl_Simulation_Zeitskala', '-once');
end
```

Bild 29: Anlegen eines OPC UA-Clients in Simulink

Sämtliche Koppelsignale werden in einer Variablen gespeichert. Mit Hilfe des Parameters „-once“ wird die Suche nach einem Knoten abgebrochen, sobald dieser gefunden worden ist, so dass eine schnellere Auswertung der Funktion möglich ist. Der dazugehörige Code ist in Bild 30 abgebildet.

```
%read and write variables of the server
if uaClient.isConnected == 1 && init_Nodes == 1
    %read variables from server and store in val
    [val1, ~, ~] = readValue(uaClient, sl_PV_Leistung);
    [val2, ~, ~] = readValue(uaClient, sl_Widerstand);
    [val3, ~, ~] = readValue(uaClient, sl_Simulation_Zeitskala);
    %assign SimulationTime to Node 'sl_Simulation_Zeit'
    writeValue(uaClient, sl_Simulation_Zeit, get_param(
('charging_discharging','SimulationTime')));
end
%set pacing rate of simulation
if val3 == 0
    set_param('charging_discharging', 'SimulationCommand', 'stop')
else
    set_param('charging_discharging', 'PacingRate', val3)
end
%assign val1,val2 to the output x
x = [val1, val2];
end
```

Bild 30: Nutzung des OPC UA-Clients in Simulink

Die ausgelesenen Werte der Variablen des Leistungsbedarfs und der Leistung der Energiequellen werden in einem Vektor gespeichert und dienen als Eingangsparameter für die kontinuierliche Simulation. Weiterhin wird die Zeitskalierung durch die Funktion „set_param“ übergeben. Mittels der Funktion „get_param“ wird in umgekehrter Weise die abgelaufene Simulationszeit in Simulink ermittelt und auf den OPC UA-Server geschrieben.

Die Funktion, welche die Koppelsignale bereitstellt, wird durch einen Block „Interpreted MATLAB Fcn“ aufgerufen. So werden die benötigten Werte der Leistungsaufnahme und der Leistungserzeugung an die Simulation des Speichers übergeben, um dessen Lade- und Entladerverhalten zu simulieren. Für die Simulation werden stets die zugehörigen Werte aus den anderen an der kombinierten Simulation beteiligten Programmen als Eingangsparameter berücksichtigt. Als Ausgangsparameter wird der Ladezustand des Speichers auf den Server geschrieben, denn die Steuerung trifft Entscheidungen in Abhängigkeit des Ladezustands der Energiespeicher.

Mit den beiden vorgestellten Kopplungen sind die Kommunikationswege zu den für die kombinierte Simulation benötigten Werkzeugen definiert. Zusätzlich sind Anpassungen am Co-Simulationsmaster Plant Simulation notwendig. Auf die Implementierung der Synchronisierung dort soll im folgenden Abschnitt eingegangen werden.

4.8.4 Implementierung der Synchronisierung im Co-Simulationsmaster

An dieser Stelle wird der in Abschnitt 4.2.3 vorgestellte und entwickelte Synchronisationsmechanismus für den Co-Simulationsmaster implementiert. Weiterhin ist eine Verbindung zwischen dem Master und dem OPC UA-Server notwendig. Hierzu wird der integrierte OPC UA-Client „OPCUA“ dem Netzwerk hinzugefügt. Als Co-Simulationsmaster und Schnittstelle zur virtuellen Steuerung greift Plant Simulation auf alle Variablen, die für die kombinierte Simulation notwendig sind, zu. Diese werden intern in Tabellen abgelegt, indem die Methoden „holeItemWert“ und „setzItemWert“ aufgerufen werden. Der Begriff „Item“ ist im Bereich des Engineerings ein gängiger Begriff und steht für das Element. Angesprochen werden die Variablen über deren Alias.

Weiterhin wird eine Methode zum Zurücksetzen (reset) des Simulationsmodells benötigt. Beim Ausführen werden alle Variablen des OPC UA-Servers auf den Initialwert zurückgesetzt.

Tabelle 10: Anpassung der Variablennamen an die verwendeten Softwarewerkzeuge

Variable (alt)	Variablenname (neu)	Initialwert
time_multiphysik	mcd_Simulation_Zeit	0.0
time_zeitskala	sl_Simulation_Zeitskala	1.0
time_diskret	plantsim_Simulation_Zeit	0.0
time_kontinuierlich	sl_Simulation_Zeit	0.0

Genutzt werden für die Synchronisierung die Koppelsignale „time_multiphysik“ und „time_kontinuierlich“, die zyklisch aus dem OPC UA-Server ausgelesen werden. Diese Methode wird zu Beginn der Simulation aufgerufen und während der gesamten Laufzeit wiederholt durchlaufen. Da nun die konkreten Simulationswerkzeuge feststehen, werden die bereits vorgestellten Signale mit der Nennung des jeweiligen Programmnamens angepasst. Die Übersicht dazu ist in Tabelle 10 aufgeführt.

Die Methode durchläuft den Ablauf, der in Bild 31 dargestellt ist. Ehe die Methode im Co-Simulationsmaster aufgerufen wird, sollen alle beteiligten Simulationswerkzeuge gestartet sein. Zum Startzeitpunkt T_0 wird mittels zweier Variablen der Wert der abgelaufenen Simulationszeiten gelesen. Im Anschluss daran wird die Methode für eine Sekunde in Echtzeit pausiert

und die Simulationszeiten mittels zweier Variablen zum Zeitpunkt T_1 ausgelesen. Aus der Differenz der Werte zu T_1 und T_0 ermittelt sich die Zeitskala des MCD. Diese kann nicht angepasst werden, so dass alle anderen Werkzeuge damit synchronisiert werden müssen. Dieser Wert wird in Plant Simulation gespeichert und auf den OPC UA-Server geschrieben.

```

1  if OPCUA.aktiv
2      repeat
3          var mcd_Zeitskala: real
4
5          --mcd_Simulation_Zeit und sl_Simulation_Zeit zum Zeitpunkt T0 zuweisen
6          var mcd_Zeit_T0 := OPCUA.holeItemWert("mcd_Simulation_Zeit")
7          var sl_Zeit_T0 := OPCUA.holeItemWert("sl_Simulation_Zeit")
8
9          /*Simulation im MCD oder MATLAB Simulink noch nicht gestartet, Ereignisverwalter zurücksetzen,
10         Nachricht ausgeben*/
11         if mcd_Zeit_T0 = 0 then
12             Ereignisverwalter.rücksetzen
13             PromptMessage("Simulation im Mechatronic Concept Designer starten!", "",
14                 "Gegebenenfalls im Mechatronic Concept Designer Verbindung mit OPC UA-Server aufbauen.")
15         elseif sl_Zeit_T0 = 0 then
16             Ereignisverwalter.rücksetzen
17             PromptMessage("Simulation in MATLAB Simulink starten!")
18         end
19
20         --Methode für eine Sekunde Echtzeit anhalten
21         sleep(1, false)
22
23         --mcd_Simulation_Zeit und sl_Simulation_Zeit zum Zeitpunkt T1 zuweisen
24         var mcd_Zeit_T1 := OPCUA.holeItemWert("mcd_Simulation_Zeit")
25         var sl_Zeit_T1 := OPCUA.holeItemWert("sl_Simulation_Zeit")
26
27         --Zeitskala MCD ermitteln
28         mcd_Zeitskala := round((mcd_Zeit_T1 - mcd_Zeit_T0), 1)
29         Zeitskala := mcd_Zeitskala
30
31         --Zeitskala MCD an Plant Simulation übergeben
32         Ereignisverwalter.Echtzeitfaktor := mcd_Zeitskala
33
34         --Zeitskala MCD an MATLAB Simulink übergeben
35         OPCUA.setzeItemWert("sl_Simulation_Zeitskala", mcd_Zeitskala)
36
37         /*Simulation im MCD oder MATLAB Simulink gestoppt: Ereignisverwalter zurücksetzen,
38         Simulation anhalten, Nachricht ausgeben */
39         if mcd_Zeit_T0 = mcd_Zeit_T1 and (mcd_Zeit_T0 /= 0) then
40             OPCUA.setzeItemWert("sl_Simulation_Zeitskala", 0)
41             PromptMessage("Simulation im Mechatronic Concept Designer gestoppt!", "",
42                 "Simulation in MATLAB Simulink und Plant Simulation wird zurückgesetzt.")
43             Ereignisverwalter.rücksetzen
44         elseif sl_Zeit_T0 = sl_Zeit_T1 and (sl_Zeit_T0 /= 0) then
45             PromptMessage("Simulation in MATLAB Simulink gestoppt!", "",
46                 "Simulation in Plant Simulation wird zurückgesetzt.")
47             Ereignisverwalter.rücksetzen
48         end
49
50         --Abbruchbedingung Schleife
51         until not Ereignisverwalter.SimulationGestartet
52     end

```

Bild 31: Methode für die Zeitsynchronisierung

Eine weitere Kopplung erfolgt vom Co-Simulationsmaster zur virtuellen Steuerung. Dazu muss diese zunächst modelliert werden.

4.8.5 Modellierung und Kopplung der virtuellen Steuerung

Zur Simulation der virtuellen SPS gibt es passend für die Generation der S7-1500 ein eigenes Programm, PLCSIM Advanced, das die Erstellung der virtuellen Steuerung übernimmt. Dazu muss lediglich ein Instanzname vergeben und der korrekte Typ der Steuerung ausgewählt werden. Die korrekte Steuerung innerhalb des ausgewählten Typs wird während der Übertragung der Software festgelegt. Das so erstellte Programm wird auf die virtuelle Steuerung geladen und so der Zugriff auf die Variablentabellen in Plant Simulation und dem MCD ermöglicht. Der Erfolg kann mittels der online-Diagnose im TIA-Portal überprüft werden.

Dazu wird das Modul für PLCSIM Advanced dem Netzwerk in Plant Simulation hinzugefügt, der Instanzname eingegeben und die Schnittstelle gestartet. Weiterhin wird ein Echtzeit-Simulationsmodus ausgewählt und das Datenaustauschintervall auf 20 ms festgelegt.

Nach erfolgreicher Verbindung werden die Variablentabellen von der Steuerung importiert und in einer internen Tabelle in Plant Simulation abgelegt. Die Ein- und Ausgangssignale der PLCSIM Advanced werden dann entweder mit einem Attribut des Simulationsmodells verknüpft oder über ihren Alias gelesen bzw. geschrieben.

Dem Simulationsnetzwerk in Plant Simulation werden Variablen entsprechend der bereits definierten Variablentabelle „PlantSimulation“ hinzugefügt, welchen durch Ausführung der Methode „zyklisch_PLCSIM“ zyklisch der Wert der Koppelsignale zugewiesen wird. Die Methode wird am Beginn der Simulation aufgerufen. Um die Leistungsfähigkeit der Simulation beizubehalten, wird die Ausführung der Methoden bei jeder Iteration für 50 ms (Echtzeit) pausiert. In Zusammenhang mit dem gewählten Datenaustauschintervall mit 20 ms werden die Variablen des Netzwerks in einem Intervall von 70 ms aktualisiert.

Im folgenden Kapitel wird die kombinierte Simulation anhand einer konkreten Produktionsinfrastruktur mit einem definierten intelligenten Gleichstromnetz durchgeführt.

5 Implementierung: Kombinierte Material- und Energieflusssimulation einer gleichstrombasierten, automatisierten Produktionsanlage

Mit der vorgestellten Simulationsumgebung soll die Forschungsthese bewiesen werden, dass es möglich ist, mittels der kombinierten Simulation zu überprüfen, ob ein geplantes Energieversorgungsnetz mit Gleichstrom in der Produktion für diesen Anwendungsfall sinnvoll, effizient und anwendbar ist. Hierzu werden zunächst die Produktionsumgebung und das intelligente Stromnetz vorgestellt, die verwendeten Simulationsumgebungen erstellt und die Umsetzung des Co-Simulationsmasters gezeigt. Weiterhin wird die Werkzeugkopplung mit dem Synchronisationsmechanismus, der in Abschnitt 4.2.3 vorgestellt wurde, umgesetzt.

5.1 Erstellung des Modells einer gleichstrombasierten Produktionsanlage

Grundlegend ist festzustellen, dass es sich bei dem vorliegenden Anwendungsfall um ein Werk handelt, in dem nur eine Produktionsanlage zu finden ist. Deshalb ist ausschließlich der Materialfluss innerhalb dieser Anlage relevant. Die Anlage besteht aus mehreren verbundenen Zellen. Manuelle Tätigkeiten werden auch innerhalb dieser Anlage durchgeführt

5.1.1 Gestaltung der Produktion

Die automatisierte Produktionsanlage ist schematisch in Bild 32 dargestellt. Sie beinhaltet einen manuellen Arbeitsplatz zur Bedienung der Testanlage zur Komponentenprüfung. Die Testanlage erzeugt während des Prüfvorgangs eine Lastspitze, weil sie einen hohen Energiebedarf über eine kurze Zeitdauer aufweist. Alle weiteren Arbeitsschritte werden automatisiert durchgeführt. Für den Handhabungsprozess steht ein Industrieroboter (IR) zur Verfügung. Der Prozess besteht aus mehreren Schritten, nämlich der Zuführung zur Lötanlage und zum Handarbeitsplatz.

5 Implementierung: Kombinierte Material- und Energieflusssimulation einer gleichstrombasierten, automatisierten Produktionsanlage

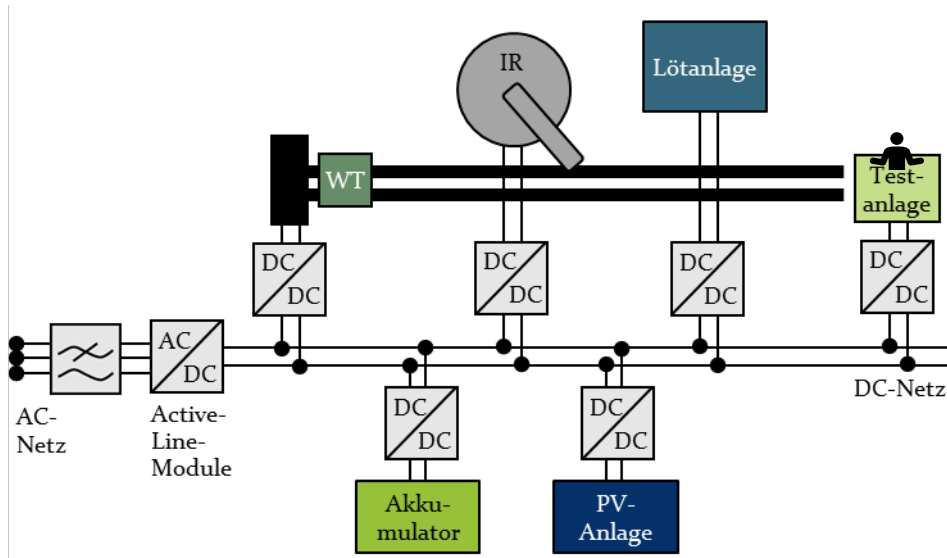


Bild 32: Schematischer Aufbau der APA mit allen Komponenten

Die Anlage dient der Bestückung von Leiterplatten mit folgendem Ablauf: Außerhalb der Systemgrenze werden die bestückten, jedoch noch nicht gelöteten Leiterplatten auf einem Werkstückträger (WT) auf das Band gelegt. Am definierten Übergabeplatz nimmt der IR diesen auf und transportiert ihn zur die Lötanlage. Für diese Tätigkeit ist aufgrund des geringen Gewichtes der Leiterplatte und des WT ein konstanter Leistungsbedarf zu verzeichnen. Am Eingang der Lötanlage befindet sich ein Förderband, das den WT automatisiert durch die Lötanlage befördert. Dort durchläuft die Leiterplatte unterschiedliche Prozessschritte. Insgesamt weist der Lötprozess eine hohe Leistung auf. Nach Abschluss des Lötvorgangs wird der WT am Ausgang der Zelle wieder vom IR aufgenommen, zu einem anderen Übergabeplatz auf dem Band gebracht und auf dem Band zum manuellen Arbeitsplatz transportiert. Dort entnimmt der Bediener den WT und legt die gelötete Leiterplatte in die Testanlage zur Komponentenprüfung ein, ehe die Platte außerhalb der Systemgrenze weiterverarbeitet wird. Die einzelnen Prozesse bauen aufeinander auf und werden nacheinander durchgeführt. Den Materialfluss stellen das Band und der IR sicher. Ein Eingriff des Bedieners ist nur für den manuellen Vorgang notwendig. Der manuelle Arbeitsschritt ist auch derjenige, der mit zeitlichem Versatz durchgeführt werden kann. Ein vollständiger Stillstand der Anlage ist nicht geplant. Die Steuerung der Anlage übernimmt eine zentrale speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). Die jeweiligen Betriebszustände werden im OPC UA-Server gespeichert und an den Co-Simulationsmaster weitergegeben.

Der Prozessablauf in der automatisierten Produktionsanlage ist in Bild 33 dargestellt. Die Zustandsänderungen ergeben sich aus der Simulation und führen zur Änderung der Signalwerte an den jeweiligen Übergabepunkten. Die Änderungen werden durch Sensoren detektiert. Sämtliche Betriebszustände werden im OPC UA-Server gespeichert.

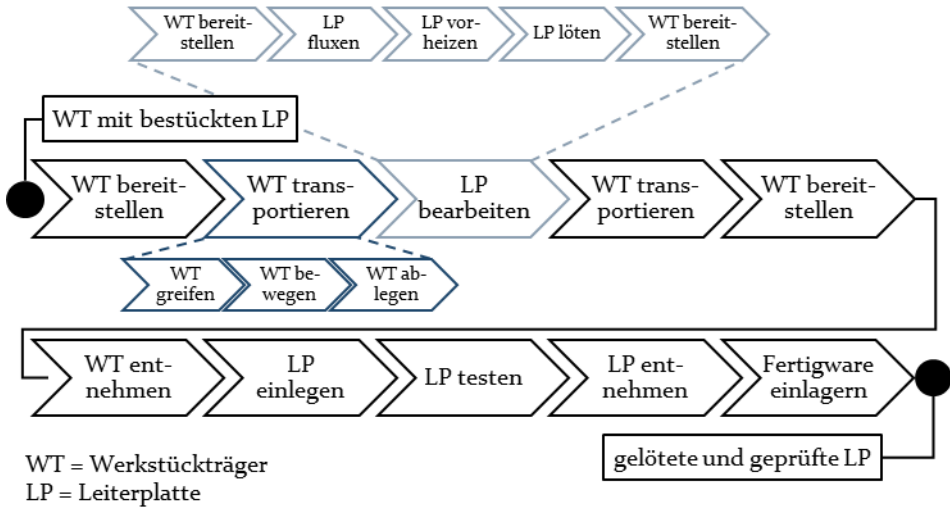


Bild 33: Prozessanalyse für die APA

Aus dem in Bild 33 dargestellten Ablauf ergibt sich ein einfaches Programm für die Software, das in der simulierten Steuerung abgebildet ist.

Die Produktionsanlage wird durch ein intelligentes Gleichstromnetz mit Energie versorgt. Dazu ist die Kenntnis über die Verbraucher und deren zugehörige Lastprofile notwendig.

5.1.2 Verbraucher in der automatisierten Produktionsanlage

Als Verbraucher sind wie bereits oben beschrieben ein Transportband (Band), das mit Gleichstrom betrieben wird, ein Industrieroboter, eine Lötanlage sowie eine Testanlage verbaut. In der folgenden Tabelle sind alle Verbraucher mit den notwendigen Leistungsdaten vollständig dokumentiert. Aus den in Tabelle 11 aufgeführten spezifischen Daten für die einzelnen Verbraucher ergibt sich kumuliert ein Lastprofil für die Produktionsanlage.

Tabelle 11: Leistungskennndaten der Verbraucher

Nr.	Gerät	Leistungsaufnahme	Prozesszeit / Zyklus	Ø Energiebedarf / Zyklus
1	Transportband	0,20 kW	180 s	0,01 kWh
2	IR KUKA KR30	3,30 kW (P_{Nenn}) 0,30 kW ($P_{\text{Leerl.}}$)	4 s	0,02 kWh
3	Lötanlage	1 kW (Fluxen) 10 kW (Vorheizen) 1 kW (Löten) 0,1 kW (P_{Standby})	15 s 80 s 40 s 45 s	0,01 kWh 0,225 kWh 0,016 kWh 0,001 kWh
4	Prüfanlage	14 kW (P_{Nenn}) 1 kW ($P_{\text{Leerl.}}$)	60 s	0,27 kWh

Eine Besonderheit in der Ermittlung des Energieverbrauchs bildet der IR, für den ein individuelles Lastprofil zu erstellen ist [120]. Jede Bewegung eines IR wird in die folgenden drei Abschnitte gegliedert werden: Beschleunigung, Phase mit relativ konstanter Bahngeschwindigkeit und Abbremsvorgang.

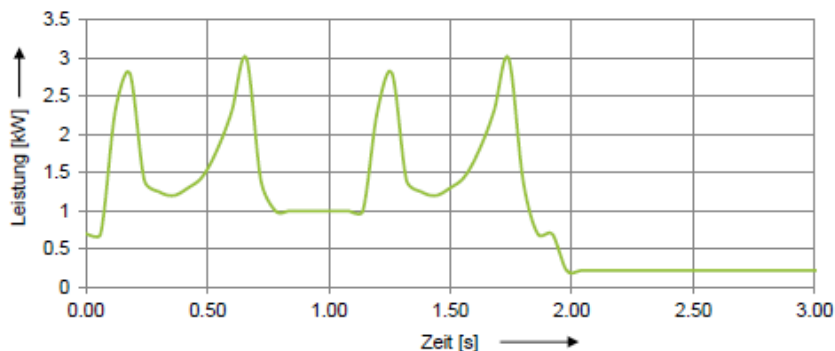


Bild 34: Lastprofil des IR

Durch die Massenträgheit und Haftkräfte ist jede Roboterbewegung durch Leistungsspitzen am Anfang und Ende jedes Bewegungsvorgangs gekennzeichnet [121]. Die Leistungsspitze am Ende wird durch die elektrischen Bremsen verursacht. Insgesamt resultiert daraus ein M-förmiges Lastprofil,

das in Bild 34 dargestellt ist. Der exakte Verlauf kann auch nach dem Vorgehen von PARYANTO ermittelt werden [115]. Die Bewegung des IR in der genutzten Anlage ist mit jeweils 2 s sehr kurz. Außerdem ist die Last, die er bewegen muss, im Vergleich zu seinem Eigengewicht und seiner Tragfähigkeit sehr gering, so dass diese vernachlässigbar ist. Aus diesem Grund wird die M-förmige Kurve hier vernachlässigt und lediglich die Spitzenlast aus den Herstellerdaten herangezogen.

Innerhalb der Lötanlage kann der Leistungsbedarf nicht konstant über alle Schritte gemittelt werden. Innerhalb der Lötanlage wird die Leiterplatte geflucht, vorgeheizt und gelötet. Ein integriertes Transportband für den WT durch die Anlage vom Übergabepunkt am Eingang zum Ausgang. Der Prozessschritt des Vorheizens ist der längste Schritt und der mit dem höchsten Energiebedarf.

Der letzte Verbraucher, der betrachtet werden muss, ist die Prüfanlage. Diese kann grundsätzlich am Wechselspannungsnetz betrieben werden. Für den Anschluss an das Gleichstromnetz für die APA wird diese Zelle direkt am internen Gleichstromkreis angebunden. An dieser Stelle wird die Anlage mit einer Spannung von 24V DC versorgt. Der Leistungsbedarf ist im Vergleich zu anderen Komponenten in der APA relativ hoch. Ein Prüfdurchlauf dauert 60 s. Zusätzlich benötigt der Bediener jeweils 10 s, um das Prüfobjekt in die Anlage zu legen und die Prüfung zu starten.

Weiterhin sind Steuerungen und Komponenten der Leistungselektronik verbaut, die ebenso Energiebedarf haben. Hierfür wird ein Ersatzwert für den Leistungsbedarf angenommen. Dieser beträgt konstant 0,03 kW.



Bild 35: Kumulierter Leistungsbedarf der APA über der Zeit für einen Zyklus

Die Zykluszeit für einen Durchlauf in der APA ergibt sich aus allen oben genannten Parametern zu 260 s. Der Leistungsbedarf der gesamten Anlage und der einzelnen Anlagen über die Zeit ist in Bild 35 und Bild 36 gezeigt.

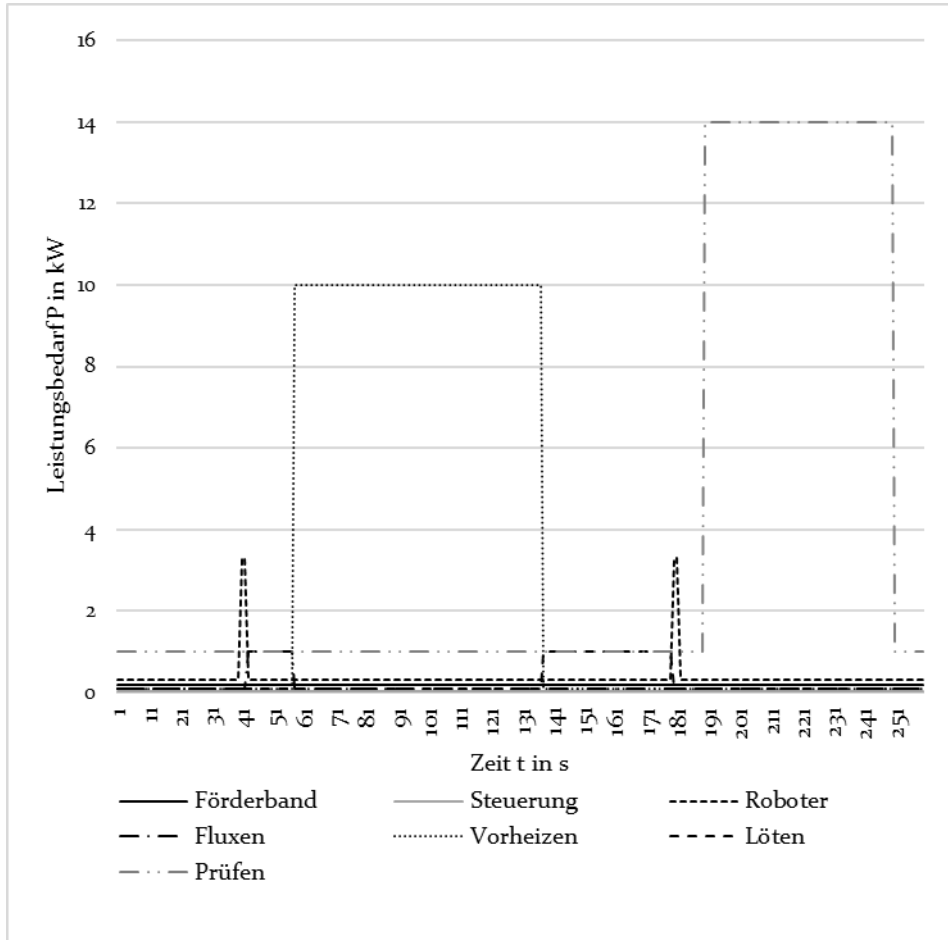


Bild 36: Darstellung des Leistungsbedarf der einzelnen Komponenten über der Zeit

Der Ablauf für den Prozess in der APA ist so beizubehalten, wie er in Bild 33 dargestellt ist. Damit ergibt sich der Energiebedarf der APA in einem Zyklus aus der Fläche unter dem Graphen der Gesamtanlage oder durch Addition der Fläche unter den einzelnen Leistungskurven zu 2.124,10 kWs oder 0,59 kWh.

Im nächsten Schritt wird das Gleichstromnetz zur Energieversorgung des Werks definiert. Das Werk umfasst nur die eine beschriebene Anlage.

5.1.3 Definition der Energieversorgung

Analog zur Beschreibung des Smart Grids in Abschnitt 3.3.1 werden an dieser Stelle zusätzlich zu den im vorherigen Absatz beschriebenen Verbrauchern Speicher und Erzeuger eingebunden. Die Schnittstelle zum Versorgungsnetzwerk bleibt erhalten.

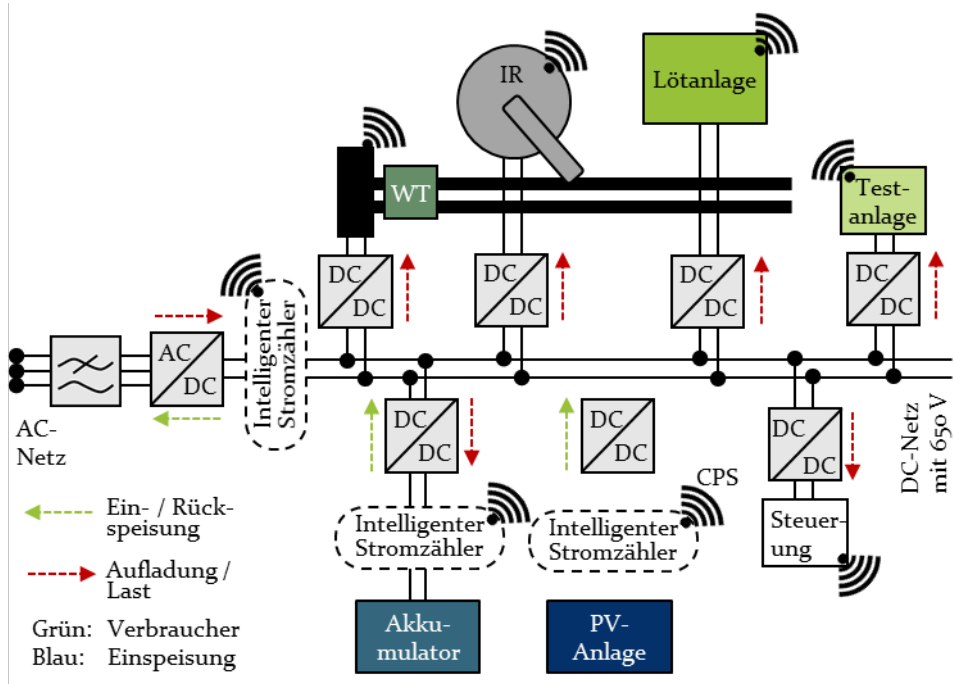


Bild 37: Darstellung des Aufbaus des intelligenten Smart Grid für die Werksebene

Da das Werk im vorliegenden Fall nur aus einer Anlage besteht, wird ein eigener Gleichstromkreis zur Energieversorgung etabliert, so dass eine Wechselwirkung mit anderen Anlagen oder der Infrastruktur des Gebäudes ausgeschlossen werden kann. Es ist möglich, das methodische Vorgehen und die Modellierungsansätze, die vorgestellt wurden, für verschiedene Speicher und regenerative Energiequellen zu nutzen. Bisher gilt die Kombination aus PV-Anlage als Quelle und einem Akkumulator als Speicher als die gängigste Variante [55], so dass diese in das zu definierende Smart Grid integriert werden. Vor diesen Komponenten werden jeweils intelligente Stromzähler eingebaut, welche den elektrischen Strom messen und die ermittelten Daten an den OPC UA-Server übertragen.

In diesem Fall dient der IR nicht als Prosumer im Sinne von Abschnitt 3.3.5, sondern ausschließlich als Verbraucher. Energie, die durch Abbremsvorgänge entsteht, wird wie bisher über Widerstände in Wärme überführt und als verloren gewertet. Mit dieser Vereinfachung lässt sich der schematische Aufbau des Gleichstromnetzes, wie in Bild 37 gezeigt, mit einer klaren Trennung zwischen den Quellen und Speichern (blaue Färbung) auf der einen und den Verbrauchern (grüne Färbung) auf der anderen Seite, darstellen. Neben den Komponenten sind die intelligenten Zähler zu erkennen. Mit den Pfeilen lässt sich vereinfacht die mögliche Energieflussrichtung darstellen.

5.1.4 Leistungsdaten der Komponenten im Gleichstromnetz

Ebenso wie für die Energieverbraucher sollen im folgenden Abschnitt die technischen Leistungsdaten für den Akku und die PV-Anlage aufgenommen und dargestellt werden. Damit wird Tabelle 11 ergänzt.

Tabelle 12: Leistungsdaten der Komponenten des Gleichstromnetzes

Nr.	Gerät	Leistung	Wirkungsgrad	Speicherkapazität / Ø Energieeintrag
1	Akkumulator (Lithium-Ionen)	6,5 kW	95 %	32 kWh ($\pm$ 100%)
2	PV-Anlage	20 kWp		Sommertag: 102 kWh Wintertag: 4 kWh

Die Leistung der PV-Anlage wird in Kilowatt-Peak (kWp) angegeben.

Der Hersteller weist für Lithium-Ionen-Akkumulatoren einen typischen Wirkungsgrad von 95 % aus [122, 123]. Akkumulatoren verfügen über typische Be- und Entladekurven. Diese sollen jeweils im Modell hinterlegt werden. Für den hier genutzten Speicher soll eine Vereinfachung hinsichtlich der Be- und Entladezeit getroffen werden. Unterschiedliche Zeiten für Be- und Entladevorgänge entstehen durch Veränderung des Stroms. Um dazu eine Aussage treffen zu können, werden Speicher mithilfe des C-Koeffizienten, der sich aus dem Quotienten von Kapazität und Ladestrom berechnet, charakterisiert. Ein Akkumulator mit einem C-Koeffizienten von 1 und einer Kapazität von 100 Ah kann beispielsweise eine Stunde lang einen Strom von 100 A bereitstellen. [124] Der C-Koeffizient hat für den hier verwendeten Akku den Wert 1.

Ebenso sind für die PV-Anlage die Leistungsdaten bekannt. Genutzt wird hier eine Anlage, die in Mitteldeutschland aufgebaut ist und von der die Leistungsdaten frei verfügbar sind.

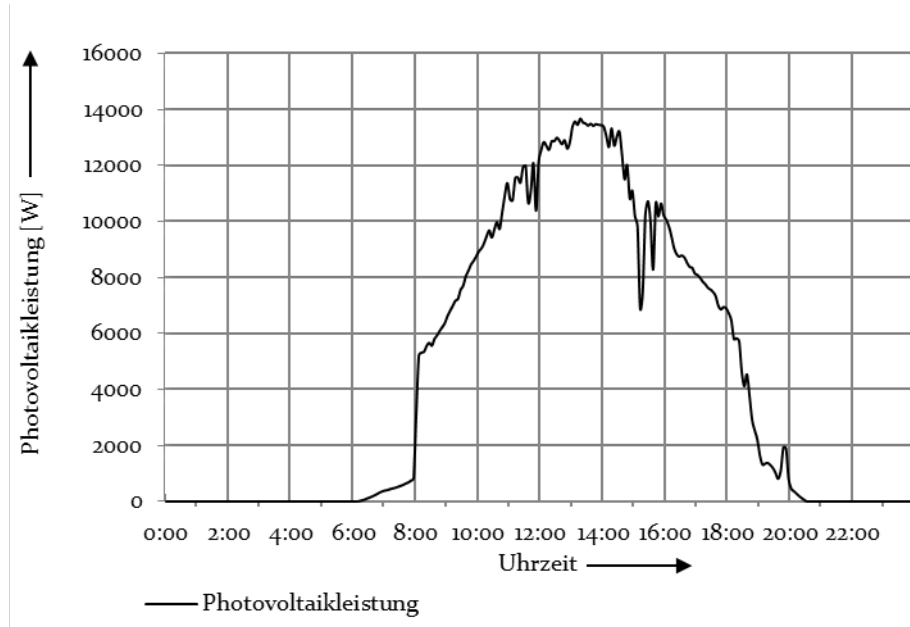


Bild 38: Leistung der PV-Anlage an einem typischen sonnigen Sommertag

Die Daten der Anlage für einen sonnigen Sommertag sind in Bild 38 als Funktion über der Zeit für einen gesamten Tag mit 24 Stunden aufgetragen. Die hier genutzte PV-Anlage verfügt über eine Spitzenleistung von 20 kWp, die durch die Wetterverhältnisse und Überdeckung nicht erreicht wird. Die Daten dafür werden mit einer Auflösung von fünf Minuten bereitgestellt. Um diese kontinuierlich oder mit einer höheren Auflösung verwenden zu können, werden die Leistungswerte dazwischen linear interpoliert. Die Interpolation ist in Bild 38 dargestellt. Die elektrische Energie, welche die PV-Anlage an diesem Tag erzeugt, beträgt 101,57 kWh.

Betrachtet man einen Tag mit sehr geringer Sonneneinstrahlung, wie er in Bild 39 dargestellt wird, ergibt sich eine veränderte Leistungskurve. An diesem Tag erzeugt die PV-Anlage lediglich Energie in Höhe von 4,44 kWh.

Mit den online bereitgestellten Daten ist es möglich, typische Werte einer bereits bestehenden Anlage in die Simulation einzupflegen. So werden durchschnittliche Verläufe für einzelne Tage und für den Verlauf eines gesamten Jahres berechnet. Diese werden in die Datenbank eingepflegt. Wäre

die Nutzung online verfügbarer Daten nicht denkbar, ist es möglich, mit synthetisch erzeugten Daten zu arbeiten.

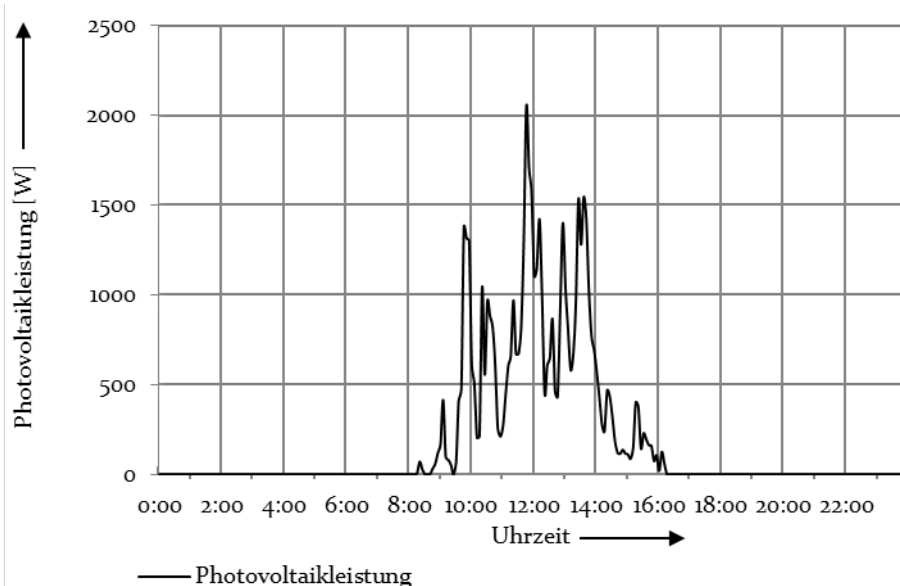


Bild 39: Leistung der PV-Anlage an einem typischen Wintertag

Für die verteilte Simulation müssen alle Verbraucher im multiphysikalischen Werkzeug und die Komponenten im Gleichstromnetz in kontinuierlichen Werkzeugen modelliert werden. Da über die PV-Anlage und den Akku hinaus Strom aus dem öffentlichen Versorgungsnetz genutzt wird, muss dieses ebenfalls in der Simulation modelliert werden. Die Umsetzung in den einzelnen Simulationswerkzeugen erfolgt im folgenden Abschnitt.

5.2 Umsetzung der Prozesssimulation

5.2.1 Multiphysikalische Simulation

Die multiphysikalische Simulation wird in NX durchgeführt. In NX werden die digitalen Abbilder der Zellen und der zugehörige Prozess vollständig modelliert und simuliert. Neben dem Transport der WT über das Band wird auch der Greifvorgang der WT mit einem geringen Abstraktionsgrad modelliert. Für den Greifvorgang ist die Modellierung von Kollisionskörpern notwendig. Hierfür ist eine hohe Rechenleistung erforderlich. Deshalb werden nur die notwendigen Körper als Kollisionskörper definiert.

Für das digitale Modell werden sämtliche Geometrien im CAD-System NX erstellt und detailliert konstruiert. Sowohl das CAD-System als auch der MCD sind Teil der Software NX. Folglich werden die gleichen Elemente, die in der Konstruktionsphase entstehen, auch für die multiphysikalische Simulation verwendet. Deshalb wird vor allem bei funktionalen Bauteilen auf einen sehr hohen Detailgrad geachtet. Zusätzliche Informationen, die für die multiphysikalische Simulation benötigt werden, werden im gleichen Modell gespeichert. Es entsteht das funktionale Modell. Dieses wird auf oberster Ebene in der Gesamtbaugruppe angelegt. Hier sind, wie im Ansatz des modellbasierten Systems-Engineering vorgeschlagen, Anforderungen, Logikstruktur und die zugehörigen Funktionalitäten zu verknüpfen. Die Produktstruktur und die zugehörigen Elemente bildet das geometrische Modell.

Jede Zelle der Anlage wird in einer eigenen Baugruppe modelliert. So entsteht ein modular gegliedertes Modell der Anlage aus Transportband, IR, Lötanlage und Testanlage. Im Folgenden werden die funktionalen Modelle aller Zellen und des WT erstellt. Das vollständige Ergebnis der Implementierung des funktionalen Modells ist in Bild 41 dargestellt.

5.2.1.1 Modellierung des funktionalen Modells der Komponenten

Der **Werkstückträger** besteht aus der realen Geometrie, die der Hersteller vorgibt, und wird in die Gesamtbaugruppe integriert. Untrennbar mit dem Werkstückträger ist die gelötete Leiterplatte verbunden, da diese während des gesamten automatisierten Prozessablaufs nicht vom WT genommen werden. Somit bilden WT und Leiterplatte gemeinsam einen Starrkörper, der an allen Seiten um Kollisionsflächen ergänzt wird. Damit werden Transport auf dem Band, Führung des WT innerhalb des Gestells, Anhalten an den Stoppern und der Greifvorgang ermöglicht.

Das **Transportband** besteht aus einem Gestell mit vielen einzelnen Bauteilen wie Profilen, Schrauben, Muttern, dem Antriebsstrang und dem Band an sich. Zusätzlich ist es mit einem Stopper am Übergabepplatz und Sensorik ausgestattet. Das Gestell mit allen Anbauteilen wird als ein einziger Starrkörper definiert, weil sich die Elemente zueinander nicht bewegen können. Ein Starrkörper erhält durch die Wahl des Materials und der bestehenden Geometrie eine Masse. Auf die Masse wirkt in der multiphysikalischen Umgebung die Gewichtskraft. Am Gestell wird kein Kollisionskörper definiert, weil keine Untersuchungen diesbezüglich durchgeführt werden.

Der Antriebsstrang wird separat und auch nicht als ein einziger Starrkörper definiert, da sich die Welle relativ zum Gehäuse dreht. Über eine weitere Welle wird über die Reibkraft, die durch die verwendeten Materialien und deren Reibkoeffizienten definiert ist, das eigentliche Band mitgenommen. Zwei Achsen, die über Gelenke rotatorisch am Gestell angebracht sind, lenken das Band um. Die Ansteuerung des Motors erfolgt über einen Geschwindigkeitsregler, der die passende Geschwindigkeit des Motors definiert. Diese wird über die Übersetzung im Getriebe an das Band übertragen und das Band in der Simulation bewegt. Das Band ist ein Starrkörper und auf der Oberfläche ein Kollisionskörper, der mit dem richtigen Material und dem zugehörigen Haftreibungskoeffizienten modelliert wird, denn nur so wird der WT transportiert.

Am Übergabeplatz in der Mitte des Bandes sind links und rechts an den Seiten mechanische Stopper angebracht. Diese sind unbeweglich und fest mit dem Gestell verbunden, weil der WT in dem vorliegenden Anwendungsszenario immer am Übergabeplatz anhält. Definiert sind die Stopper jeweils als Starrkörper mit einer Kollisionsfläche an der Vorderseite. Zusätzlich ist dort eine Lichtschranke als Sensor installiert. Diese ist in dem Modell nur als ein dünner Lichtstrahl abgebildet. Sensoren werden in der Simulation mittels Kollisionsflächen ausgelöst, weshalb der WT als Kollisionskörper definiert wird.

Das Förderband wird zu Beginn der Simulation stets gestartet und läuft im Nennbetrieb.

Das geometrische Modell des **Industrieroboters** wurde in einer vereinfachten Form durch den Hersteller zur Verfügung gestellt. Bis zum Werkzeugaufnahmepunkt (engl. Tool-Center-Point [TCP]) werden die sechs Achsen als Starrkörper und die dazugehörigen Gelenke als Drehgelenke modelliert. Daneben werden einige Kollisionsflächen an den Außenflächen definiert, so dass Berührungen an nebenstehenden Komponenten detektiert und außerdem keine unrealistischen Bewegungen simuliert werden. Der TCP wird vergleichbar der Teach-In-Programmierung entlang einer durch feste Punkte definierten Trajektorie geführt. So entstehen für jede Aufgabe und jede Bahn einzelne Trajektorien, die abgespeichert werden.

Der **Greifer** ist ein Anbauteil, das am TCP an den IR angefügt wird. Die Geometrie des Greifers ist exakt ausgeformt, weil während der Simulation der Greifvorgang im Detail modelliert ist. Die Komponente besteht im Wesentlichen aus drei Starrkörpern, den beiden Zangen und der Grundplatte, die sich gegeneinander bewegen. Da es sich um einen pneumatisch ausgeführten Greifer handelt, wird er durch Druckluft geöffnet und geschlossen.

Dazu reagiert der Parameter für die Positionsregler auf ein boolsches Signal. Der Greifprozess wird, in Analogie zum realen Greifvorgang, physikbasiert als Kollisionskörper modelliert. Das verwendete Kollisionsmaterial verfügt über eine hohe dynamische Haftreibung. Mittig zwischen den Zangen ist ein Sensor analog der Lichtschranke verbaut. Dieser wird ausgelöst, wenn sich der WT zwischen den Zangen befindet.

Der erste Bewegungsvorgang führt entlang der ersten Trajektorie von der Ausgangsposition zum Übergabeplatz, wenn der Sensor dort den WT erkennt. Am Übergabeplatz wird durch den WT der Sensor am Greifer ausgelöst und der Greifvorgang startet. Nach Beendigung wird der Bewegungsvorgang zum Eingang der Lötanlage angestoßen. Ein dort verbauter Sensor führt zum Öffnen der Greifzangen und der WT wird durch das in die Lötanlage integrierte Band weitertransportiert. Der IR wartet an der Position bis der WT die Lötanlage wieder verlässt. Dort wird erneut der Greifvorgang ausgelöst und über eine weitere Trajektorie bewegt sich der TCP mit dem WT zurück zum Transportband. Der WT wird hinter dem feststehenden Stopper am zweiten Übergabeplatz (blaue Markierung in Bild 40) durch das Öffnen der Greifzangen abgelegt. Nachdem der Sensor im Greifer nicht mehr ausgelöst ist, da der WT auf dem Band abgelegt wurde, bewegt sich der IR entlang einer Trajektorie in die Ausgangsposition zurück. Für den IR ist mit dieser Bewegung der Zyklus abgeschlossen.

Eine schematische Darstellung der Anlage mit den Übergabeplätzen und den Sensoren (gelbe Rauten) zeigt das Bild 40.

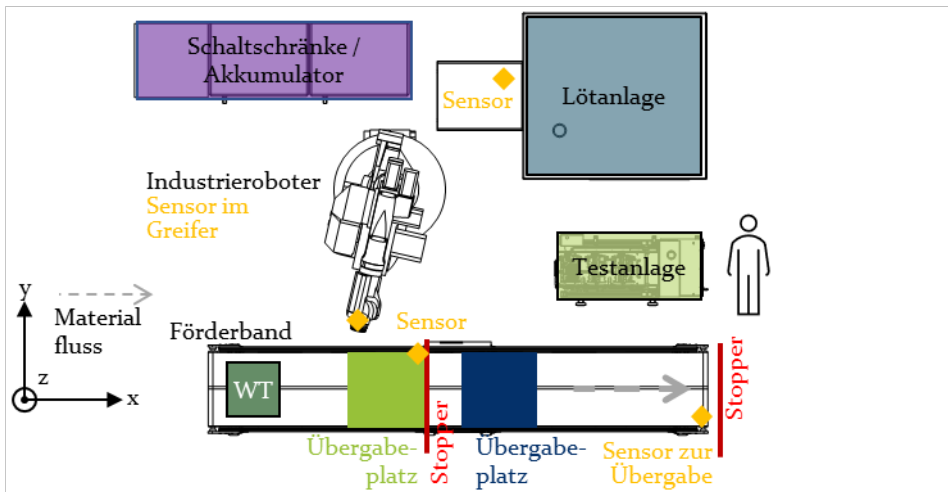


Bild 40: Schematische Darstellung der Anlage

5 Implementierung: Kombinierte Material- und Energieflusssimulation einer gleichstrombasierten, automatisierten Produktionsanlage

Da die Funktionsweise der **Lötanlage** bereits durch den Hersteller getestet ist und die einzelnen Laufzeiten zwischen den Prozessschritten vorliegen, wird diese nur an den Übergabestellen in einem hohen Detailgrad modelliert. Für alle Schritte im Inneren der Anlage wird die Außengeometrie Black-Box-Modell genutzt. Interessant für den Simulationsablauf ist der Übergabepplatz am Ein- bzw. Ausgang. Dort wird ein Transportband mit einem Kollisionskörper als Oberfläche und Antriebsparameter modelliert. Alle Parameter sind durch den Hersteller vorgegeben. Das Band wird gestartet, sobald die Lötanlage in den Modus „betriebsbereit“ versetzt wird. Die Last, die durch das Band entsteht, ist im Energiebedarf des Leerlaufs berücksichtigt. Am Ein- bzw. Ausgang ist ein Sensor angebracht, der erkennt, wenn ein WT in die Anlage eintritt oder diese verlässt.

Da die jeweilige Dauer der einzelnen Prozessschritte bekannt ist, wird auf die Modellierung weiterer Sensorik verzichtet. Die zum jeweiligen Prozessschritt zugehörigen Zustandsvariablen werden zeitbasiert angepasst.

Die **Testanlage** ist die letzte noch zu beschreibende Komponente im Prozessablauf. Sie wird wie die Lötanlage als Black-Box-Modell integriert. Da die Testanlage manuell bestückt wird, sind dort keine weiteren Sensoren notwendig. Der Bediener entnimmt die LP direkt vom Transportband und dem WT und schiebt sie in die Testanlage ein. Damit ist nur ein Sensor am Ende des Transportbands als Übergabesignal notwendig. Nach dem Testvorgang wird die LP manuell entnommen.

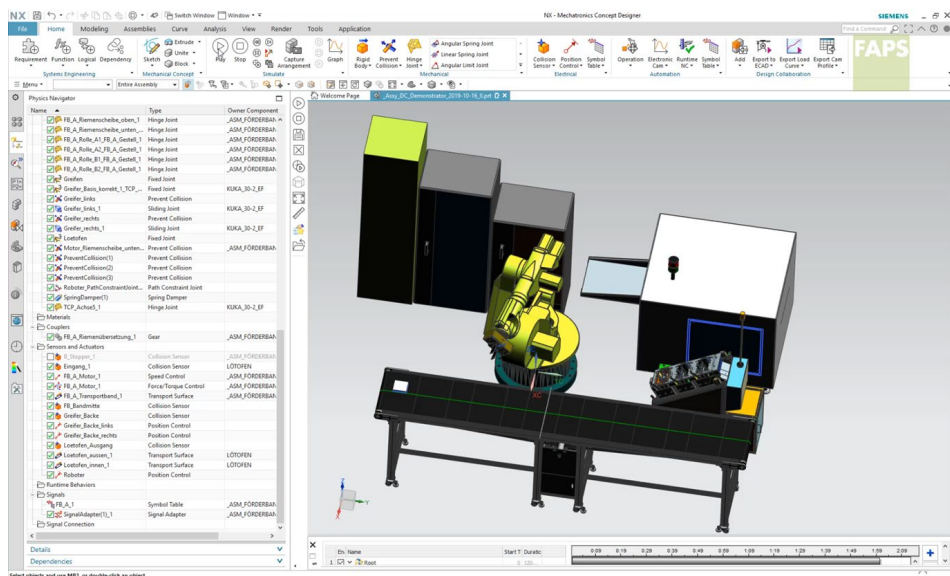


Bild 41: Funktionales Modell der APA in NX

Der gesamte Aufbau des funktionalen Modells in der multiphysikalischen Simulation ist in Bild 41 als Screenshot aus NX dargestellt. Es sind die einzelnen Komponenten und deren Anordnung im Raum erkennbar. Außer den beschriebenen Komponenten sind noch die Schaltschränke modelliert. Sie dienen der Abschätzung des gesamten Platzbedarfs der Anlage.

5.2.1.2 Simulation

In der Simulation wird nicht nur ein Zyklus durchlaufen, weshalb die WT mit den LP mittels Quellen ereignisbasiert erzeugt und von Senken nach Durchlaufen des Prozesses vernichtet werden. Der Grund für die ereignisbasierte Erzeugung liegt in der Zykluszeit und der einhergehenden Latenz der OPC UA-Verbindung. Die Zykluszeit des MCD und von Plant Simulation liegt bei 10 ms. Bis das Signal zum Erzeugen eines WT von Plant Simulation auf den OPC UA-Server geschrieben und durch den MCD gelesen ist, vergehen bis zu 20 ms. In jedem Simulationszeitschritt, in dem eine Quelle aktiviert ist, wird ein Objekt erzeugt. In Verbindung mit einem Simulationszeitschritt von 2 ms, ergibt sich bei einer über einen Zeitraum von 20 ms aktivierten Quelle eine mögliche Anzahl von zehn Objekten. So viele Objekte sollen aber nicht gleichzeitig erzeugt werden. Deshalb werden die Quellen durch den Co-Simulationsmaster über das Koppelsignal „mcd_WT_generieren“ aktiviert, wodurch eventbasiert ein Objekt erzeugt wird. Für einen einzelnen WT nimmt das Signal mindestens für 20 ms den Wert „wahr“ an, um im Anschluss wieder den Wert „falsch“ aufzuweisen.

Nach der Beendigung eines automatisierten Prozessdurchlaufs werden die WT am Ende des Transportbandes mittels einer Senke vernichtet. Dies stellt das Entnehmen des WT durch den Bediener dar. Manuelle Vorgänge werden im MCD nicht simuliert, weshalb dieser Vorgang in Plant Simulation abgebildet ist. Die Senke wird also ausgelöst durch das Koppelsignal „mdc_WT_vernichten von Plant Simulation“.

Gesteuert wird die Anlage mit den Prozessen über die virtuelle Steuerung, die an Plant Simulation gekoppelt ist. Aus der Steuerung werden die Geschwindigkeiten für das Transportband, das Signal zum Starten des Roboters (`mcd_roboter_start = true` bzw. `false`) und die Wahl der Trajektorie (`mcd_trajektorie = 1` bzw. `2` usw.), das Signal zur Öffnung oder zum Schließen der Greiferzangen (`mcd_greifer = true` bzw. `false`) an das Modell übergeben. Baulich vorgegebene Grenzen, wie Endlagen der Achsen, sind im Modell als feste Werte hinterlegt. Weiterhin werden über Ausgangssignale die Werte der Sensoren ohne Umrechnung an den OPC UA-Server und so an die virtuelle Steuerung weitergegeben.

Im vorherigen Abschnitt wurde bereits darauf hingewiesen, dass der manuelle Vorgang in Plant Simulation modelliert werden muss. Deshalb ist eine Verknüpfung zum ereignisdiskreten Simulationswerkzeug notwendig und das Signal des ausgelösten Sensors am Ende des Transportbandes zur Entnahme des WT muss weitergegeben werden.

5.2.2 Plant Simulation

Die Zellen und Materialflusskomponenten der Anlage werden neben dem MCD auch in Plant Simulation abgebildet.

5.2.2.1 Abbildung der Anlage

In Plant Simulation werden die Komponenten der Anlage nicht modelliert, sondern nur als Bausteine zur Visualisierung dargestellt. Durch die Übergabe der Betriebszustände ist es möglich, zu visualisieren, an welcher Stelle sich der WT gerade befindet und welche Zelle in welchem Betriebszustand ist. Weiterhin wird die bisher fehlende Tätigkeit des Werkers nachgebildet und das Lager für die Fertigteile definiert, da der Werker die LP dort ablegt.

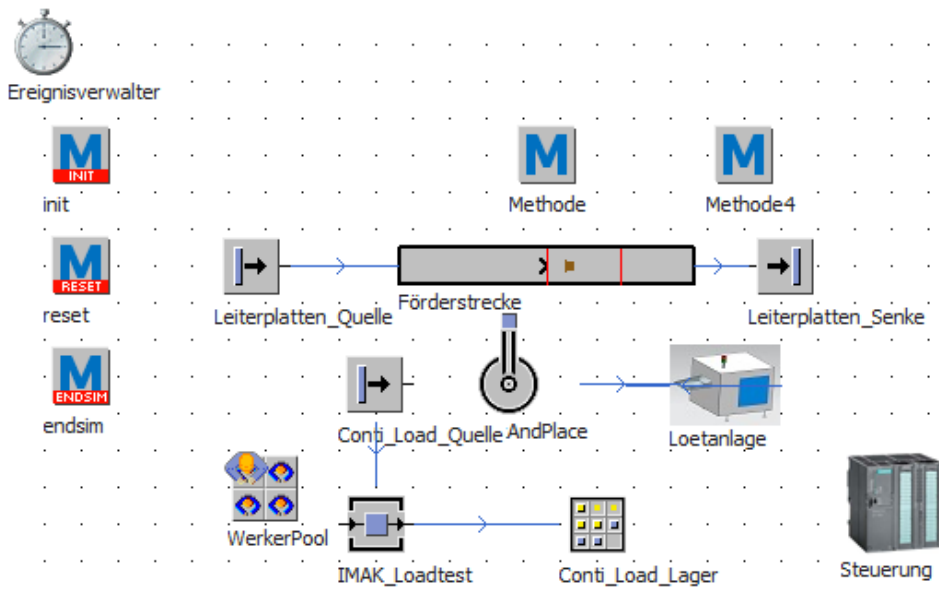


Bild 42: Darstellung des Produktionsprozesses in Plant Simulation

Das in Plant Simulation entstandene Netzwerk des Produktionsprozesses ist in Bild 42 dargestellt und stellt die Ebene des Werkes dar. Wie definiert, wurde an dieser Stelle die zentrale Steuerung integriert. Da es sich bei Plant

Simulation um den Co-Simulationsmaster handelt, wird der Produktionsprozess über die Steuerung in Plant Simulation gestartet bzw. beendet.

5.2.2.2 Energieverbrauch auf Anlagenebene

Neben der manuellen Tätigkeit wird der Leistungsbedarf der Anlage in Plant Simulation umgesetzt, weil im MCD die notwendigen Funktionalitäten fehlen. Aus diesem Grund wurde der Prozess in einem eigenen Netzwerk nachgebildet. Dort werden aus den über den OPC UA-Server übertragenen Betriebszuständen der Zellen im MCD der jeweilige Energiebedarf ermittelt und zu den diskreten Zeitpunkten mittels Methode in eine in Plant Simulation intern verwendete Tabelle übertragen. Dies ist unter Verwendung von integrierten Bausteinen und der Programmiersprache SimTalk möglich. Eine Methode ist dabei in Plant Simulation ein Programmablauf bzw. eine Zuordnungsfunktion. Neben dem Leistungsbedarf für den Betriebszustand können auch Daten für den Anlagenhochlauf oder den Wechsel zwischen zwei Zuständen hinterlegt werden. Sämtliche Daten werden aus den technischen Spezifikationen (siehe Tabelle 11) übernommen.

Die interne Tabelle mit Werten zum Leistungsbedarf bildet in Plant Simulation die Schnittstelle zwischen dem Produktionsprozess und dem modellierten Gleichstromnetz. Aufgetragen wird der Leistungsbedarf pro Komponente über der Zeit und als Summe davon der kumulierte Bedarf an elektrischer Energie ermittelt. Dazu wird eine Methode erstellt, die anschließend den Summenwert in einer weiteren Tabelle speichert und an den OPC UA-Server übergibt.

Über diese Tabelle werden Prozess und Infrastruktur vollständig entkoppelt, denn es ist unerheblich, welcher Verbraucher mit Energie versorgt wird, da lediglich der gesamte Leistungsbedarf zum Zeitpunkt T gedeckt werden muss. Für die Ermittlung des Leistungsbedarfs wurde ein Zeitintervall von 100 ms gewählt. Dazwischen werden die Werte linear interpoliert.

Die so ermittelte elektrische Gesamtleistung P_{Ges} entspricht der Leistung, die durch das Gleichstromnetz aufgebracht werden muss. Um das zu simulieren wird ein Ersatzwert benötigt. Als Ersatzwert dient der Ohm'sche Widerstand. Denn die benötigte Leistung entspricht im Gleichstromnetz einem Widerstand (R). Er wird über Gleichung (2) berechnet.

$$R = \frac{U^2}{P_{\text{Ges}}} \quad (2)$$

Über diesen Widerstand entladen sich in der kombinierten Simulation die Energiequellen. Der Wert für den ermittelten Ersatzwiderstand wird dem Koppelsignal „sl_Widerstand“ zugewiesen und über den OPC UA-Client auf den Server geschrieben.

Um die Simulation durchführen zu können, ist die Programmierung der Steuerung notwendig. Dieses geschieht über das TIA-Portal.

5.2.3 Programmierung

5.2.3.1 Ablaufsteuerung

Wird im TIA-Portal ein neues Programm angelegt, muss zunächst die Steuerungsumgebung definiert werden. Außerdem werden die benötigten Variablentabellen angelegt und auf die virtuelle Steuerung übertragen. Diese sind in Bild 43 zu sehen.

Standard-Variablentabelle			
	Name	Datentyp	Wert
	Roboter_Pos_0	Real	0.0
	Roboter_Pos_1	Real	10.0
	Roboter_Pos_2	Real	25.0
	Roboter_Pos_3	Real	35.0
	Roboter_Pos_4	Real	50.0
	Roboter_Pos_5	Real	55.0
	Velocity 0	Real	0.0
	Velocity Start	Real	0.05
	Velocity Motor	Real	300.0
	Greifer_Pos_0	Real	0.0
	Greifer_100	Real	100.0
	Greifer_Pos_30	Real	30.0

Bild 43: Auflistung und Erstellung der Anwenderkonstanten im TIA-Portal

Im nächsten Schritt ist die Ablaufsteuerung mittels der Programmbau-
steine zu erstellen. Da es sich um eine einfache Steuerung handelt, soll an
dieser Stelle nicht detailliert darauf eingegangen werden, sondern es wer-
den nur einzelne Aspekte herausgegriffen, die zu beachten sind:

1. Die Schrittkette muss zyklisch durchlaufen werden.

2. Im Initialschritt werden alle Variablen auf den Ausgangszustand zurückgesetzt. Dies ist mittels einer Rest-Funktion zu erreichen.
3. Die Sensorwerte bilden die Eingangsgrößen für die Transitionen.
4. Ggf. werden zum Auslösen der Transitionen weitere Bedingungen definiert.
5. Am Ende eines Zyklus muss die Anlage nicht in den Initialzustand zurückgesetzt werden, da das Transportband durchgehend betrieben werden soll und der IR durch den letzten Schritt im Zyklus wieder in den Anfangszustand überführt wird.

Abschließend wird das Programm auf die virtuelle Steuerung übertragen. Dazu werden erstellten Schrittketten und Bausteine in die Sprache der Steuerung übersetzt, der Code auf das virtuelle Gerät geladen und die Steuerung gestartet. Dann kann die Anlage gestartet und bedient werden.

Zur Bedienung der Anlage soll im Sinne einer Mensch-Maschine-Schnittstelle als Touch-Panel genutzt werden. Dieses wird auch über das TIA-Portal gestaltet und programmiert.

5.2.3.2 Mensch-Maschinen-Schnittstelle

Für die virtuelle Umgebung stehen virtuelle Geräte zur Verfügung, welche mittels der Anwendung WIN CC als Teil von Siemens Automation simuliert werden.

Das Human-Machine-Interface (HMI) wird innerhalb des TIA-Portals angelegt und über die vorgegebenen Verbindungen mit der Steuerung verbunden, so dass eine Kommunikation und ein Datenaustausch möglich sind. Auf dem HMI können unterschiedliche Anwendungen ausgeführt werden. So wird beispielsweise mittels Buttons eine Variable gesetzt, während über Anzeigen die Werte einzelner Variablen ausgegeben werden. Für das HMI wird im Anwenderprojekt eine eigene Variablentabelle angelegt, welche mit den Variablen der Steuerung verknüpft ist. Auf diese Weise ist eine Kommunikation zwischen beiden Teilnehmern und die Interaktion des Bedieners mit der Steuerung sichergestellt.

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, wird das Anwenderprogramm über einen Start-Knopf gestartet. Dieser wird als HMI-Variable HMI_Start angelegt, in der Variablentabelle abgelegt und innerhalb des TIA-Portals mit der PLC-Variablen Start, welche in der ersten Transition abgefragt wird, verknüpft. Ebenso müssen Variablen, welche über das HMI angezeigt werden sollen, in dessen Variablentabelle angelegt werden. Dies betrifft alle Daten, die ausgelesen werden sollen. Im vorliegenden Fall

werden die Werte des Leistungsbedarfs der Apparaturen und der Ladezustand des Akkumulators abgefragt. Weiterhin ist es auch möglich, die momentane Leistung der PV-Anlage anzuzeigen. Die benötigten Daten sind auf dem UPC UA-Server gespeichert und werden wie die für den Prozessablauf relevanten Variablen von Plant Simulation ausgelesen und an die Steuerung übergeben, die es intern über die Variablenverknüpfung an das HMI weitergibt. Eine mögliche Version eines HMI ist in Bild 44 dargestellt. Selbstverständlich ist dieses um diverse Funktionalitäten erweiterbar.

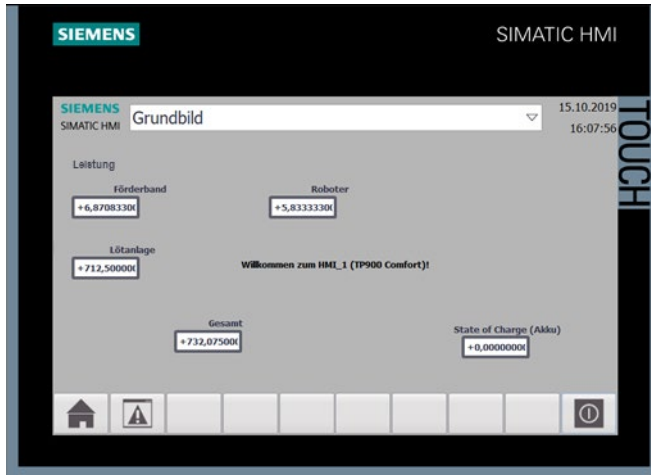


Bild 44: HMI zur Überwachung der APA

Mit dem HMI wird folglich nicht nur der Prozess gesteuert, sondern es werden auch Daten zum Leistungsbedarf der Anlagen und Zustandswerte der Energieversorger und -speicher ausgegeben. Diese wurden bisher in der Simulation noch nicht erzeugt.

Im folgenden Abschnitt wird aufgezeigt, wie das Gleichstromnetz mit den Energiespeichern und -erzeugern im ereignisdiskreten Simulationswerkzeug Plant Simulation und in der kontinuierlichen Simulation von Simulink modelliert werden.

5.3 Modellierung des Gleichstromnetzes

Wie in Abschnitt 3.3.7 gezeigt ist es möglich, in Plant Simulation Energieflüsse zu modellieren. Dazu gehört es ebenfalls, Energiequellen und -senken zu modellieren und zu simulieren. Auf Grundlage der Bewertung der verschiedenen Objekte wird im Folgenden mit Informationsbausteinen gearbeitet. Genutzt werden – wie auch für die Abbildung des Prozessnetz-

werks aus Abschnitt 5.2.2 – die Programmiersprache SimTalk und dazugehörige Methoden. Das Gleichstromnetz wird vollständig über Methoden, globale Variablen und Tabellen abgebildet. Die Methoden dienen zur Berechnung bestimmter Verhaltensweisen von Energiequellen und des Netzelements.

5.3.1 Modellierung der PV-Anlage als volatile Energiequelle

In Plant Simulation werden Bausteine für volatile Energiequellen erstellt. Die Basis dazu bildet ein bereits vordefinierter Quellenbaustein. Diese dienen dazu, Leistungsabgabewerte zu speichern und diese dann einer Leistungsabnahme (Verbraucher) oder einem Speicher zu übergeben. Dabei ist es grundsätzlich möglich, über eine Quelle einen Verbraucher zu versorgen, d.h. der Ertrag aus einer Quelle kann zu einem Zeitpunkt entweder für die Versorgung des Produktionsprozesses oder zum Laden eines Speichers genutzt werden. Innerhalb eines Simulationsablaufs kann das über ein Signal durch das Energiemanagement geändert werden. Als Leistungswerte werden dem Baustein in Plant Simulation die Werte der in Abschnitt 5.1.4 beschriebenen PV-Anlage hinterlegt. Den Zeilenindex bildet die Folge der Abtastzeitpunkte von 0:00 Uhr bis 23:55 Uhr im Intervall von fünf Minuten. Diesen Indizes ist in der zugehörigen Spalte die jeweilige Leistungsabgabe der PV-Anlage zugeordnet. Die zwischen den diskreten Zeitpunkten fehlenden Werte werden linear interpoliert.

Da die Leistungsabgabe der PV-Anlage und damit das Simulationsergebnis stark vom Tageszeitpunkt abhängig ist, wird eine Möglichkeit definiert, den Tageszeitpunkt für den Start der Simulation auszuwählen. Dazu wird eine Funktion „init_Tageszeitpunkt“ genutzt, die zu Beginn jedes Simulationsdurchlaufs durch die Initialisierungssteuerung des Ereignisverwalters aufgerufen wird. Im ersten Schritt wird die Simulation angehalten, indem der Echtzeitfaktor des Ereignisverwalters den Wert null hat. Im Anschluss daran wird durch die Funktion eine Liste erzeugt, die aus Zeitpunkten von 0:00 Uhr bis 24:00 Uhr im Abstand von jeweils einer Stunde besteht. Diese Liste wird der Methode „promptList1“ übergeben, welche das in Bild 45 dargestellte Dialogfenster erzeugt.

Die Entscheidung des Benutzers bildet den Rückgabewert der Methode. Das Dialogfenster eröffnet die Möglichkeit, die Wahl des Tageszeitpunktes abzurechnen. Dies führt zu einem Setzen des Rückgabewerts auf den Wert null und einem Zurücksetzen der Simulation. Bei einem Wert größer null wird auf Basis des Index der gewählte Tageszeitpunkt berechnet. Dieser

Zeitpunkt wird im Anschluss in den entsprechenden Datentypen konvertiert und dem Ereignisverwalter übergeben. Der Ereignisverwalter nimmt den Echtzeitfaktor eins an, worauf die Simulation fortgesetzt wird.

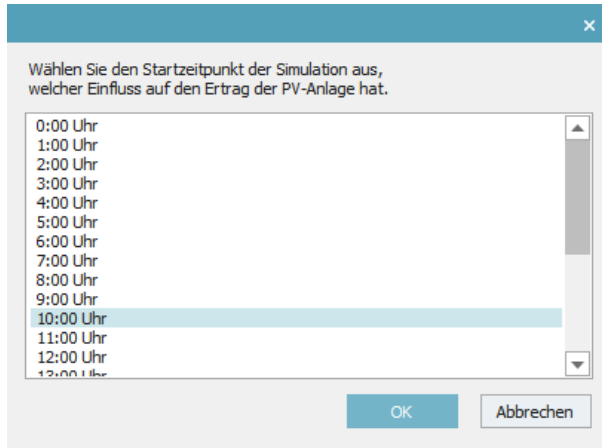


Bild 45: Dialogfenster zur Auswahl des Tageszeitpunktes

Diese Zeit wird auf das Abtastintervall gerundet und die zuvor angelegte Tabelle nach dem zugehörigen Zeilenindex durchsucht. Die Zeilennummer liefert den dazugehörigen Wert des PV-Ertrags. Dieser Wert wird dem Koppsignal „sl_PV_Leistung“ zugewiesen und auf den OPC UA-Server geschrieben.

Als letzter Baustein für die definierte Energieversorgungsinfrastruktur wird das Versorgungsnetz modelliert.

5.3.2 Modellierung des Netzbausteins

Die Modellierung des Netzbausteins unterscheidet sich kaum von der der PV-Anlage, denn auch hier liegt ein Quellenbaustein zugrunde. Die Quelle erzeugt unbegrenzt elektrische Energie, die zur Verfügung steht und bei Bedarf nach den Vorgaben des Energiemanagements genutzt werden kann. So ist es möglich, sowohl Speicher mit Energie zu versorgen als auch den Leistungsbedarf des Werks zu decken. Über den Netzbaustein wird die Leistung, welche aus dem Versorgungsnetz bezogen wird, aufgezeichnet und grafisch aufbereitet ausgegeben. Die bezogene Leistung ermittelt sich aus der Differenz zwischen der Leistungsaufnahme des Werkes und ggf. der Aufladung des Akkumulators und der durch die PV-Anlage und dem Speicher bereitgestellten Energie. Um das Verhalten des Netzes zu be-

obachten und Informationen zum Leistungsbedarf aus dem Netz zu erhalten, muss der Netzbaustein immer in das Netzwerk der Versorgungsinfrastruktur eingebracht werden.

Nachdem in Abschnitt 3.3.7 bereits gezeigt wurde, dass eine Modellierung von Energiespeichern in ereignisdiskreten Simulationswerkzeugen möglich ist, wird der Akkumulator im ersten Schritt in Plant Simulation modelliert.

5.3.3 Modellierung des Akkumulators als Energiespeicher

Der Energiespeicher basiert auf Standard-Bausteinen von Informationsflussobjekten. Für die Be- und Entladung des Speichers wird eine Steuerung benötigt. Diese ist noch unabhängig von der technischen Spezifikation. Die Steuerung wird mittels einer Methode in Sim Talk umgesetzt. Über den Standard-Baustein wird im definierten Zeitintervall von 20 ms der Ladezustand des Akkumulators berechnet.

Zu Beginn der Simulation werden Füllstand und Initialzustand (i.S.v. Laden oder Entladen) des Akkus festgelegt. Für den Fall, dass die Simulation des Produktionsprozesses bereits gestartet ist, startet die Simulation des Akkus mit einem Lade- oder Entladevorgang, je nachdem, wie der Initialzustand festgelegt ist. Ist nach einem Durchgang des Ladens oder Entladens des Akkus die Simulationsdauer nicht erreicht, wiederholt sich der Entlade- und Ladevorgang, wobei bei jedem Durchlauf geprüft wird, ob nun entladen oder geladen werden soll. Ändert sich das Signal zum Laden oder Entladen während eines laufenden Lade- bzw. Entladevorgangs, wird der momentane Füllstand als Initialzustand für das Unterprogramm übernommen und dieses ausgeführt. Dabei darf weder die festgelegte untere noch die obere Ladegrenze unter- bzw. überschritten werden. Bis zu diesem Zeitpunkt kann das Unterprogramm ausgeführt werden. Ist die jeweilige Ladegrenze erreicht, stoppt die Methode. Durch das Energiemanagement wird definiert, wie viel Leistung in den Speicher eingespeist werden soll. Dies ergibt sich aus der Steuerungsstrategie, dem Leistungsbedarf des Werkes und der Einspeiseleistung der PV-Anlage. Weil nicht immer ein Energiemanagement angeschlossen sein muss, wurden entsprechende Abfragen zusätzlich im Baustein für den Akku hinterlegt. Diese werden durch eine angebundene simulierte Steuerung überschrieben.

Für die Modellierung des Akkumulators in Plant Simulation wird vereinfacht angenommen, dass sich dieser entlang linearer Verläufe be- und entlädt. Die dazugehörige Leistung wird über den Be- und Entladestrom $I_{L,E}$

ermittelt, der sich aus den technischen Daten des Geräts ergibt. Der Energieinhalt eines Akkumulators ergibt sich aus der Kapazität C , die entladen bzw. geladen werden soll, und der Nennspannung des Netzes U_{Nenn} . Die Nennspannung des Netzes ist vorgegeben und in einem Gleichstromnetz konstant. Relevant sind weiterhin die Be- (B) und Entladezeit (E), welche sich aus Gleichung (3) ergeben.

$$t_{B,E} = \frac{C}{I_{B,E}} \quad (3)$$

Dabei steht C für die momentane Ladung des Akkumulators. Die maximale Kapazität eines Akkumulators ergibt sich aus den technischen Spezifikationen und wird mit C_{max} bezeichnet.

Der aktuelle Energieinhalt des Akkumulators (SoC_A) wird über den Energieinhalt und über die Kapazität berechnet. Dazu wird der aktuelle Energieinhalt bzw. die aktuelle Kapazität durch den maximalen Energieinhalt bzw. die maximale Kapazität geteilt und ist in Gleichung (4) dargestellt.

$$\text{SoC}_A = \frac{C}{C_{\text{max}}} \quad (4)$$

Wie in Abschnitt 3.3.4 beschrieben, ist die Einhaltung der Ladegrenzen für die Lebensdauer des Akkus wichtig. Unter Berücksichtigung des Wertes der oberen und unteren Ladegrenze ergibt sich der nutzbare Energieinhalt.

Parameter	Value
Ladestrom [A]	20
Entladestrom [A]	10
Nennspannung [V]	650
Energieinhalt [kWh]	32
Initial SoC [%]	100
Obere Ladegrenze [%]	80
Untere Ladegrenze [%]	20

Bild 46: Modellierung und Definition des Bausteins zum Akkumulator in Plant Simulation

Die Werte des Komponentenmodelles und die Werte für die Parametrisierung werden in globalen Variablen gespeichert. Auf diese Weise wird das

physikalische Verhalten des Akkumulators entlang von linearen Lade- und Entladekennlinien simuliert. Hinterlegt sind dazu die technischen Kennwerte des Akkus und die zur Berechnung notwendigen physikalischen Formeln. Der dazugehörige Baustein in Plant Simulation ist in Bild 46 dargestellt.

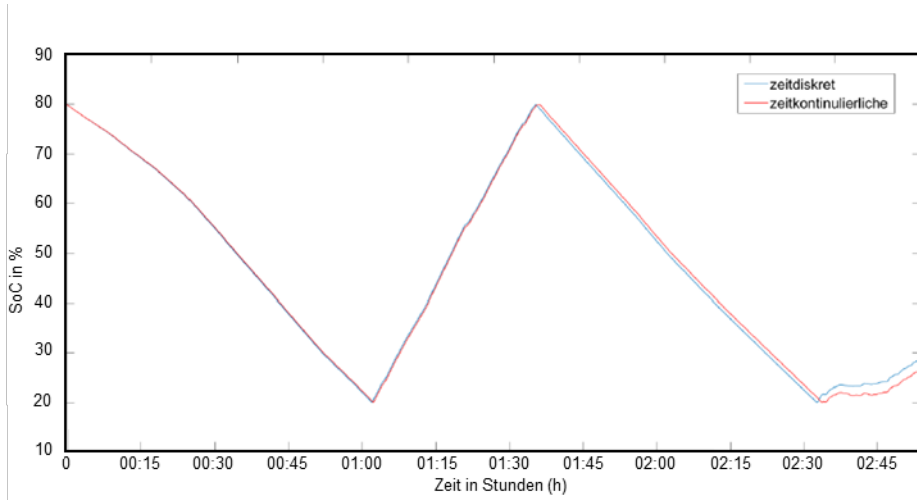


Bild 47: Ladezustand über den Entlade- und Ladevorgang des Akkumulators

Der Ladezustand, der sich für das Laden und Entladen über ein kontinuierliches Lastprofil ergibt, ist in Bild 47 zu sehen.

Aus den vorgestellten Modellierungen ergibt sich die in Bild 48 gezeigte Übersicht über das Gleichstromnetz zur Energieversorgung. Diese bildet in Plant Simulation neben der Werksebene und den Produktionsprozessen ein weiteres Netzwerk.

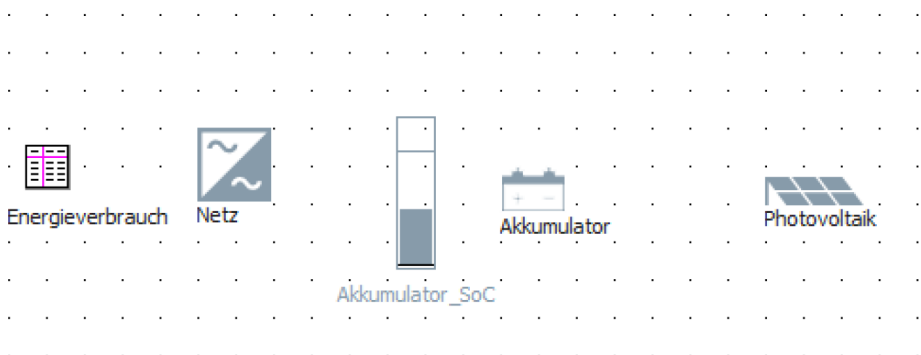


Bild 48: Modellierung der Energieversorgung in Plant Simulation

Es wurde bereits angedeutet, dass für die Modellierung des Akkumulators innerhalb von Plant Simulation einige Vereinfachungen vorgenommen wurden und so das Verhalten nur hinreichend abgebildet wurde. Dies betrifft das Be- und Entladeverhalten. Um exakte Ergebnisse zu erhalten, wird der Akku im kontinuierlichen Simulationswerkzeug MATLAB Simulink abgebildet und dieses in die verteilte Simulation eingebunden.

5.3.4 Modellierung und Simulation des Akkus mit MATLAB Simulink

Zur Simulation des Akkumulators wird das Programm Matlab Simulink mit den Erweiterungsbibliotheken Simscape und Simscape Electrical verwendet. Die Simulation teilt sich in zwei Simulationsmodelle auf. Einerseits wurde ein Modell erstellt, welches den Ladevorgang des Akkumulators beschreibt, andererseits ein Modell zur Beschreibung des Entladeverhaltens. Die Simulation des Ladevorgangs erfolgt kontinuierlich in von Simulink festgelegten Schritten (Einstellung Continuous autoStep). Die Simulation des Entladevorgangs findet in variablen und diskreten Schritten statt (Einstellung Variable-StepDiscret). Diese Einstellungen werden von den jeweils verwendeten Simulationsbestandteilen gefordert.

Die Simulation des Ladevorgangs basiert auf dem Constant Current-Constant Voltage-Prinzip (CC-CV-Prinzip), welches typischerweise für Lithium-Ionen-Akkumulatoren genutzt wird.

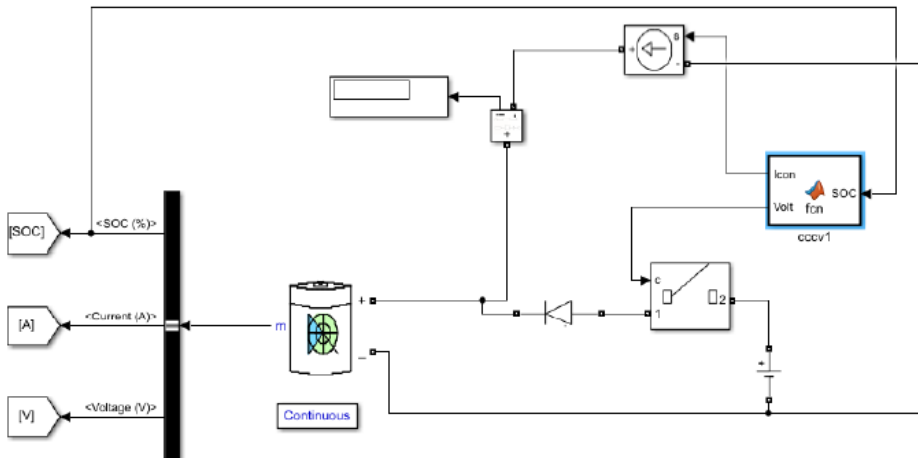


Bild 49: Darstellung der Ladesimulation in MATLAB Simulink

Das CC-CV-Verfahren unterteilt sich in zwei Phasen. Zunächst wird der Akkumulator mit einem konstanten Strom geladen bis bei Erreichen eines

definierten Ladezustands auf eine konstante Ladespannung gewechselt wird. Dadurch wird einer Schädigung des Akkumulators durch zu hohe Ströme oder Spannungen vorgebeugt. [125] Im Simulationsmodell wird das CC-CV-Verfahren durch die Verwendung einer gesteuerten Stromquelle und einer konstanten Spannungsquelle modelliert. Strom- und Spannungsquelle sind über einen Schalter an den Lithium-Ionen-Akkumulator angebunden. An der Batterie werden SoC, Stromstärke und Spannung gemessen und grafisch dargestellt. Eine Darstellung ist in Bild 49 gezeigt. Strom (I) und Spannung (U), die für den Ladevorgang jeweils angelegt werden, ergeben sich aus der Leistung (P), mit welcher der Akkumulator geladen wird, wie beispielsweise aus der momentanen Leistung der PV-Anlage. Der physikalische Zusammenhang ist in Gleichung (5) dargestellt.

$$I = \frac{P}{U} \quad (5)$$

Zur Simulation des Entladevorganges ist die Leistungsaufnahme der APA in MATLAB Simulink abzubilden. Um möglichst flexibel agieren zu können, wird ein variabler Widerstand angewandt. Wie schon für die Ladesimulation werden auch hier die Simulationsergebnisse visualisiert und aufgezeichnet.

Soll die APA nur mithilfe des Akkumulators mit Energie versorgt werden, muss durch den Entladevorgang des Akkumulators die gesamte Leistungsaufnahme abgedeckt werden.

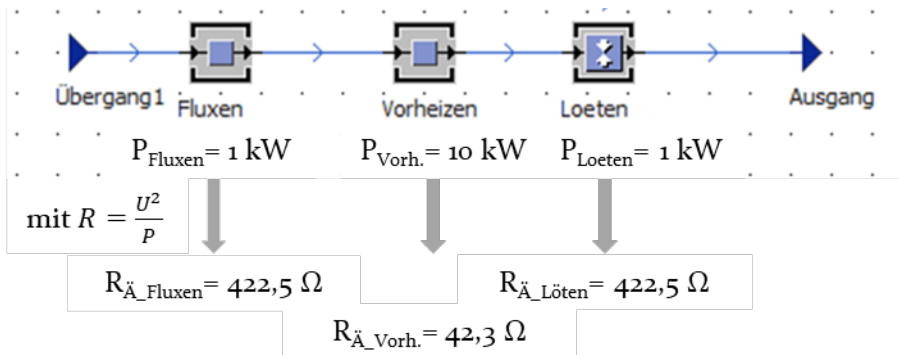


Bild 50: Ermittlung der äquivalenten Lastwiderstände für die Zustände der Lötanlage

Wie bereits in Abschnitt 5.2.2 beschrieben, wird die Leistungsaufnahme aus Plant Simulation übernommen. Je nach Lastbedarf für einen konkreten Zeitpunkt wird der Wert des Widerstandes entsprechend der benötigten Leistung parametrisiert. Der Zusammenhang zwischen der benötigten Leistung und dem Wert des Widerstandes ergibt sich aus Gleichung (2). Auf

diese Weise wird für jeden Zeitpunkt der Wert des Lastwiderstands aus der Gesamtleistung oder für einzelne Zellen bzw. Prozessschritte ermittelt.

Der Prozess in der Lötanlage besteht aus drei einzelnen Schritten, dem Fluten, dem Vorheizen und dem Löten. Aus dieser ergibt sich jeweils ein eigener zur Last äquivalenter Lastwiderstand R , über welchen sich der Akkumulator entlädt. Der Zusammenhang ist in Bild 50 dargestellt. Die jeweiligen Werte für den äquivalenten Widerstand werden an das Modell des Akkus übergeben. Eine Übersicht der beschriebenen Modellierung ist in Bild 51 gezeigt.

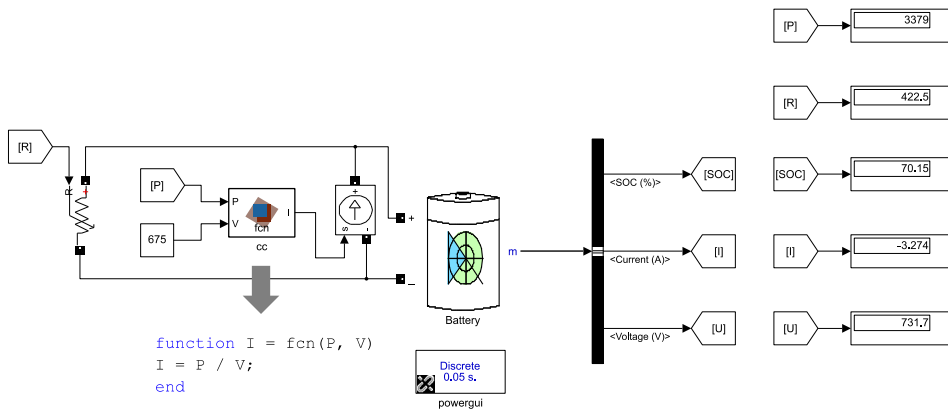


Bild 51: Darstellung des Modells des Akkumulators in MATLAB Simulink

Die Simulation wird mit diskreten Schritten mit einer Abtastzeit von 50 ms berechnet. Zu dem in Bild 51 dargestellten Zeitpunkt liegt die Leistung der simulierten PV-Anlage bei 3.379 W und der Wert des variablen Widerstandes bei 422,5 Ω . Aus Bild 50 ist zu erkennen, dass das einem Leistungsbedarf von 1 kW entspricht. Infolgedessen wird der Akkumulator mit einem Strom von 3,274 A bei einer Spannung von 731,7 V entladen. Der Akkumulator weist zu diesem Zeitpunkt einen SoC von 70,15 % auf. Die Strom-, Spannungs- und Ladeverläufe werden mit Hilfe eines virtuellen Oszilloskops entlang der Zeit abgebildet. „Display-Blöcke“ zeigen die Ist-Leistung der PV-Anlage, den Ist-Wert des Widerstandes, den Ladezustand des Akkumulators sowie die daraus resultierenden Ströme und Spannungen.

Während der Simulation wird auch hier die Anbindung an den OPC UA-Server sichergestellt und Werte übergeben. Die Simulation des Verhaltens des Akkus geschieht in einem Subsystem. Dem Subsystem wird auf Basis des Eingangswertes dem Ausgangssignal entweder ein unendlich hoher Wert oder das eigentliche Eingangssignal übergeben. Weist das Koppel-

signal „sl_Widerstand“ (als Äquivalent für die momentane Leistungsaufnahme) den Wert minus eins auf, so nimmt der Widerstand in Simulink den Wert „inf“ an, was der Darstellung eines Leerlaufs entspricht. Durch die Goto-Blöcke „[P]“ und „[R]“, welche in Bild 52 zu erkennen sind, werden der Simulation des Akkumulators, die in Bild 51 gezeigt ist, den From-Blöcken die Koppelsignale „sl_PV_Leistung“ und „sl_Widerstand“ übergeben.

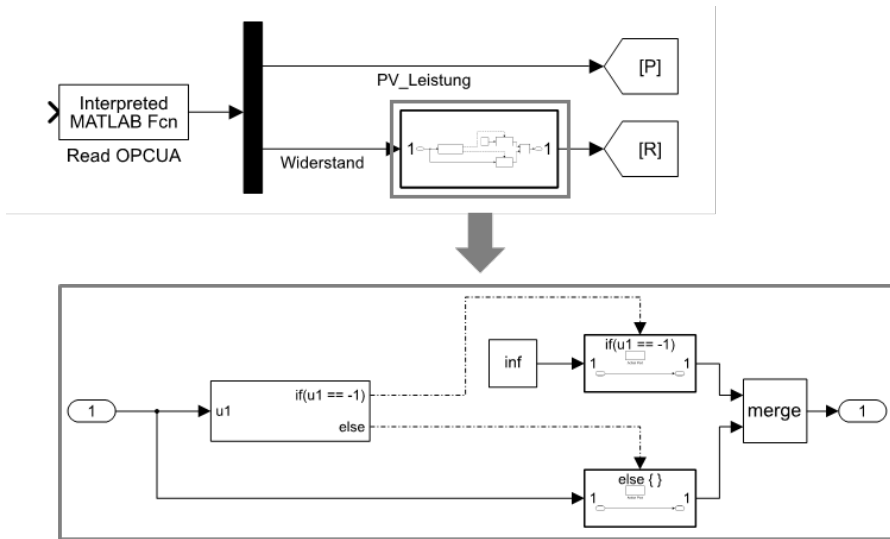


Bild 52: Subsystem zur Simulation des Verhaltens des Akkus

Mit dem Aufbau der Simulation des Akkus im kontinuierlichen Simulationswerkzeug sind alle benötigten Komponenten modelliert und können simuliert werden. Außerdem wurden bereits die Mechanismen zur Kombination vorgestellt, so dass sich daraus die vollständige Simulationsumgebung ergibt, die im folgenden Abschnitt 5.4 gezeigt wird.

5.4 Kombinierte Simulation

Alle bereits vorgestellten Werkzeuge sind Teilnehmer an der verteilten Simulation zur Kombination von Material- und Energieflusssimulation gleichstrombasierter, automatisierter Produktionsanlagen. Zusammenfassend wird hier die vollständige Umsetzung der Simulation gezeigt.

5.4.1 Starten der kombinierten Simulation

Zum Starten müssen die Simulationen in alle Simulationswerkzeugen gestartet sein. Da die eigentlichen Simulationsdurchläufe durch den Co-Si-

mulationsmaster angestoßen werden, ist weder die Produktion in der Anlage gestartet, noch wird Energie aus dem Speicher entnommen. Dieser wird auch nicht durch regenerative Energiequellen geladen, ehe der Co-Simulationsmaster gestartet wird. Angestoßen wird die kombinierte Simulation über Plant Simulation durch die Wahl des gewünschten Tageszeitpunktes, wie in Abschnitt 4.8.4 beschrieben. Damit wird die Leistung der PV-Anlage zum Zeitpunkt T_0 definiert.

Die Leistungsabgabe der PV-Anlage sowie die Leistungsaufnahme der Anlage werden mit Hilfe der Methode „zyklisch_Energiesimulation“, welche in Bild 53 dargestellt ist, aufgenommen und an den OPC UA-Server übergeben. Sie wird zu Beginn eines Simulationslaufes aufgerufen und zyklisch ausgeführt und sorgt damit für die wichtige Verbindung zwischen Prozess- und Energiemanagement.

```
1 if OPCUA.aktiv
2   repeat
3     --Variablendeklaration
4     var U := 675
5     var P_PS: real
6     var R_Ges: real
7
8     --Ladevorgang
9     --Zeilenindex auf Basis Simulationszeit ermitteln
10    var t := timeOfDay(Ereignisverwalter.AbsZeit)
11    var t5 := num_to_time(round(time_to_num(t)/300,0)*300)
12
13    --Zeilennummer auf Basis Zeilenindex suchen, Wert der Spalte 1 aus entsprechender Zeile P_PV zuweisen
14    var ZeilenNummer := PV_Leistung.holeZeilenNummer(t5)
15    var P_PV := PV_Leistung[1,ZeilenNummer]
16
17    --P_PV an Simulink übergeben
18    OPCUA.setzeItemWert("sl_PV_Leistung", P_PV)
19
20    --Entladevorgang
21    --Leistungsaufnahme Demonstrator
22    var P_Ges := (P_PS + P_FB + P_TR) * 1000
23
24    --Resultierender Widerstand
25    if P_Ges = 0 then
26      R_Ges := -1
27    else
28      R_Ges := pow(U,2) / P_Ges
29    end
30
31    --R_Ges an Simulink übergeben
32    OPCUA.setzeItemWert("sl_Widerstand", R_Ges)
33
34    --Methodenausführung pausieren
35    sleep(0.2, false)
36
37  until not Ereignisverwalter.SimulationGestartet
38 end
```

Bild 53: Methode zum Ausführen der Simulation der Energieversorgung

Über die Betriebszustände im MCD wird dann direkt die momentane Leistungsaufnahme der Verbraucher ermittelt. Die Gesamtleistung (P_{Ges}) gibt den gesamten Bedarf an elektrischer Energie zu diesem diskreten Zeitpunkt an. Der Wert ermittelt sich aus der Summe der Leistungsaufnahmen

der einzelnen Zellen im jeweiligen Betriebszustand und im jeweiligen Prozessschritt. Die Summe wird in einer separaten Methode mit je eigener Tabelle ermittelt. Sobald der Produktionsprozess (ausgelöst durch den Co-Simulationsmaster) beginnt, werden der IR, die Lötanlage und die Testanlage in den Betriebsmodus versetzt, um die Aufgaben abzuarbeiten. In welchem Betriebsmodus welche Zelle sich befindet, wird mittels der übertragenen Signalwerte im OPC UA-Server gespeichert. Die zugehörigen Bausteine in Plant Simulation lesen den jeweiligen Betriebszustand aus. So wird sichergestellt, dass die Leistungsaufnahme für den Betriebszustand „arbeitend“ nur in die Gesamtenergie aufgenommen wird, sobald dieser Zustand auch im MCD erreicht wird. Aus der Leistungsaufnahme wird nach Gleichung (2) der Widerstand der gesamten Anlage (R_{Ges}) berechnet. Über diesen Widerstand wird der in Simulink simulierte Akku entladen.

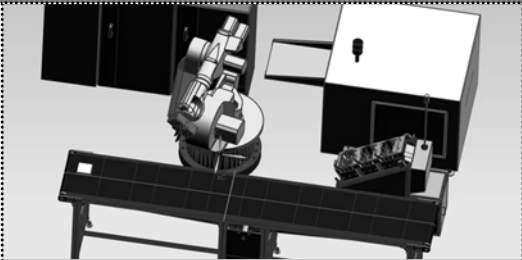
Liegt die Leistungsaufnahme der Anlage im ausgeschalteten Zustand bei dem Wert null, würde der Widerstand R_{Ges} einen unendlich hohen Wert annehmen. In diesem Fall wird der Wert des Widerstandes R_{Ges} auf den Wert -1 gesetzt, dem Koppelsignal „sl_Widerstand“ zugewiesen und so zur weiteren Verwendung auf den OPC UA-Server geschrieben. Eine Versorgung der Anlage mit Energie ist in diesem Fall nicht notwendig.

5.4.2 Gesamtmodell der verteilten Simulation

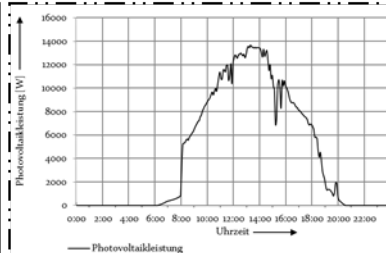
Aus allen Simulationswerkzeugen der kombinierten Simulation ergibt sich ein Gesamtmodell, das in Bild 54 dargestellt ist. Die einzelnen Simulationsarten werden dabei in den zugehörigen Werkzeugen durchgeführt und über den OPC UA-Server verbunden. Änderungen der Daten auf dem Server durch ein Simulationswerkzeug führen zu Änderungen in den anderen beteiligten Simulationsmodellen. Auf diese Weise werden Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den Simulationen berücksichtigt.

Informationen werden grundsätzlich über Variablen weitergegeben. Dabei werden aus dem MCD die Simulationszeit und die Zeitskalierung sowie die Zustände der Signale der Sensoren im Produktionsprozesse im MCD an den OPC UA-Server übergeben. Aus diesen Variablen werden die zugehörigen Zustände der Zellen in den Bausteinen in Plant Simulation implementiert. Daraus ergeben sich die zu den Zellen und deren Betriebszuständen gehörigen Lastbedarfe zu diskreten Zeitpunkten T . Diese werden mittels einer Methode zum Lastbedarf der gesamten Anlage und im vorliegenden Fall des Werks summiert. Die Leistungswerte der PV-Anlage sind zu diskreten Zeitpunkten in einer Tabelle aufgeführt. Die Werte zum Leistungsbedarf

und zur Leistung der PV-Anlage aus Plant Simulation werden auf dem OPC UA-Server gespeichert und von Simulink ausgelesen.

[illegible]

Simulation des Akkumulators in MATLAB Simulink



Simulation der PV-Anlage in Plant Simulation

Bild 54: Übersicht über die Werkzeuge in der kombinierten Simulation

Der Ladezustand, der Betriebsmodus und ggf. die momentane Leistung des Akkus werden in der Ausgangsvariable auf dem Server gespeichert.

Das Energiemanagement übernimmt die virtuelle Steuerung. Dazu wird über das angeschlossene HMI die Strategie ausgewählt. Über das HMI werden zur Überwachung des Prozesses und der Energieversorgung alle notwendigen Variablen angezeigt. Dies wird über die virtuelle Steuerung und somit über das TIA-Projekt projektiert und implementiert.

5.4.3 Anhalten der kombinierten Simulation

Der Produktionsprozess und das Energiemanagement werden durch die virtuelle Steuerung mittels der definierten Ein- und Ausgangssignale gesteuert. Diese wird in den Stopp-Zustand versetzt, sobald die Simulation im MCD angehalten ist, denn der Zustand der Simulation im MCD wird auf Basis der abgelaufenen Simulationszeit im Funktionsbaustein „mcd_SimTime“, welcher zyklisch im Organisationsbaustein des Anwenderprogramms aufgerufen wird, ermittelt und gespeichert. Einen Zeitschritt später wird erneut die aktuelle Simulationszeit des MCD ermittelt und die beiden Werte verglichen. Weisen diese einen identischen Wert auf, wird die virtuelle Steuerung durch die Anweisung „STP()“ in den Stopp-Zustand versetzt und die Programmbearbeitung beendet. Ebenso wird die Simulation im Co-Simulationsmaster beendet.

5.5 Diskussion

Der Entwicklung der Simulation wurde zugrunde gelegt, dass es vorteilhaft ist, nicht ein vollständig neues Simulationswerkzeug zu entwickeln, sondern die bereits bekannten und genutzten Werkzeuge zu verbinden. Dies wurde mit dem beschriebenen Konzept umgesetzt.

Im folgenden Abschnitt soll auf die Berücksichtigung weiterer definierter Anforderungen eingegangen werden.

5.5.1 Arbeit in bekannten Simulationswerkzeugen

Da für die einzelnen Disziplinen bereits Werkzeuge zur Verfügung stehen und in den Unternehmen genutzt werden, können diese für eine Zusammenführung weiterhin verwendet werden. Dadurch, dass die Kopplung über Signale und über einen OPC UA-Server etabliert wurde, ist die Auswahl der Simulationswerkzeuge nicht auf die jetzt genutzten beschränkt. Das Konzept ermöglicht es, alle Simulationswerkzeuge anzubinden, welche über eine OPC UA-Schnittstelle verfügen. Da es sich bei OPC UA um

eine Standardkommunikation für Industrieanalgen handelt, ist eine solche Schnittstelle in vielen marktüblichen Werkzeugen vorhanden [P7].

Im Verlauf der Produktentwicklung entstehen diverse (Simulations-)Modelle. Diese können für die kombinierte Simulation genutzt werden. Dabei sind die Signalwerte und die benötigten Variablen immer an den jeweiligen Anwendungsfall anzupassen. Lediglich das Auslesen oder das Setzen der Simulationszeit muss möglich sein, da anderweitig eine Synchronisierung nach dem hier gewählten Modell nicht sichergestellt werden kann. [P8]

Lade- und Entladesimulationen für gängige Arten von Akkus gibt es in vielen (herstellerspezifischen) Simulationsumgebungen. Darin sind die Modelle parametrisiert um die technischen Spezifikationen für das jeweilige Modell nachträglich einzugeben. Es muss seitens der Entwickler kaum Eigenleistung erbracht werden. Die Schwierigkeit hier bildet die Modellierung der Lade- und Entladestrategie, welche umgesetzt werden soll. Im Sinne der Vereinfachung kann auf eine Laderegulierung verzichtet werden, wenn die Ergebnisse der Simulation damit nutzbar sind.

Die PV-Anlage ist hier sehr einfach abgebildet und lediglich als Querschnittsmodell angenommen. Je genauer die Modellierung diesbezüglich werden soll, desto wichtiger ist es, eine möglichst exakte Abbildung zu nutzen. Hierfür können ggf. Faktoren eingeführt werden oder die Daten synthetisch erzeugt werden. Dabei sollte es sich aber um einen einmaligen Vorgang handeln, der bei Modellerstellung zum Tragen kommt. Die Lieferung eines Verhaltensmodells für eine PV-Anlage wird seitens der Hersteller durchaus auch als Zusatzleistung angeboten. Es bietet sich an, lokale Modelle auf Basis geeigneter Wettermodelle mit Hilfe künstlicher Intelligenz zu erstellen. Da es sich bei der PV-Anlage um eine elektrische Komponente handelt, können Modelle in Simulink oder ähnliche Werkzeuge importiert und dort simuliert werden. So würde auch die Modellerstellung für eine volatile, erneuerbare Energiequelle kaum zusätzlichen Aufwand bedeuten.

Diese Zusammenstellung zeigt, dass die Erstellung der kombinierten Simulation für den vorliegenden Anwendungsfall nur wenig zusätzlichen Modellierungsaufwand bedeutet.

5.5.2 Entkopplung von Prozess und Infrastruktur

Aus der Beschreibung der Simulation wurde deutlich, dass die kombinierte Simulation aus zwei grundsätzlichen Arten der Simulation zusammensetzt ist, nämlich der des Produktionsprozesses und der des Gleichstromnetzes.

Für das Prozess- und das Energiemanagement werden verschiedene Anwenderprogramme erzeugt, die auf einer SPS ablaufen. Realitätsnah wurde das in der kombinierten Simulation abgebildet.

Am deutlichsten wird die Trennung im Co-Simulationsmaster sichtbar: Das Netzwerk des Produktionsprozesses und das Netzwerk des Gleichstromnetzes sind über Leistungswerte (Energieverbrauch der Anlage) verbunden. Es entfällt für das Gleichstromnetz die Angabe, welche Zelle zu welchem Zeitpunkt mit welcher Energie versorgt wird. Bei den Verbrauchswerten kann es sich also um die Verbrauchswerte einer einzelnen Zelle, einer gesamten Anlage oder des gesamten Werks handeln. Die Informationen über den Energieverbrauch für die Betriebszustände und deren Verhalten für den Wechsel ist im Co-Simulationsmaster hinterlegt.

Die Entkopplung bedeutet aber auch, dass in die Simulation des Produktionsprozesses immer als letztes eingegriffen wird. Führendes Ziel ist es, das Werk mit Energie zu versorgen, notfalls durch Netzversorgung. In dem vorliegenden Konzept ist also abgebildet, dass der Energiefluss dem Materialfluss folgt – unabhängig von Anwendungsfall und einer spezifischen Infrastruktur.

Zur ersten Modellbildung einer gleichstrombasierten, kombinierten Material- und Energieflusssimulation wurden hinsichtlich der elektrotechnischen Komponenten Vereinfachungen angenommen.

5.5.3 Vereinfachung in den Komponenten der Elektrotechnik

Die exakte Abbildung des Gleichstromnetzwerks ist in der Realität wesentlich komplizierter und von vielen weiteren, elektrotechnischen Zusammenhängen geprägt. Neben dem Netzbaustein, der PV-Anlage und dem Akkumulator sind in der Realität noch verschiedene Spannungswandler wie DC-DC-Wandler und Sicherheitskomponenten in den Kreis zu integrieren. Hierfür ist die Vorlage eines Schutzkonzepts notwendig.

Ein AFE-Umrichter bzw. Frequenzumrichter mit geregelter Netzgleichrichter ist in Bild 55 zu sehen. Der Umrichter verfügt über steuerbare Leistungshalbleiter (IGBT), welche mit Schaltfrequenzen von 2 bis 16 kHz angesteuert werden. Durch diese schnelle Steuerbarkeit ist eine getrennte Wirk- und Blindleistungsregelung möglich. Die Ausgangsspannung des AFE kann auf einen konstanten Wert geregelt werden. Zur Reduzierung von Netzurückwirkungen kommen Netzdrosseln zum Einsatz, die zwischen dem Netz und dem Gleichrichter in jede Phase eingebracht werden. Ferner müssen Filtermaßnahmen ergriffen werden, um eine Parallelschaltung

mehrerer AFE zu ermöglichen, falls mehr Leistungseintrag in das Gleichstromnetz benötigt wird. Denn in jedem Fall bildet die Wahl der Leistungsstufe des AFE den Flaschenhals für die Versorgung des Gleichstromkreises durch das Netz.

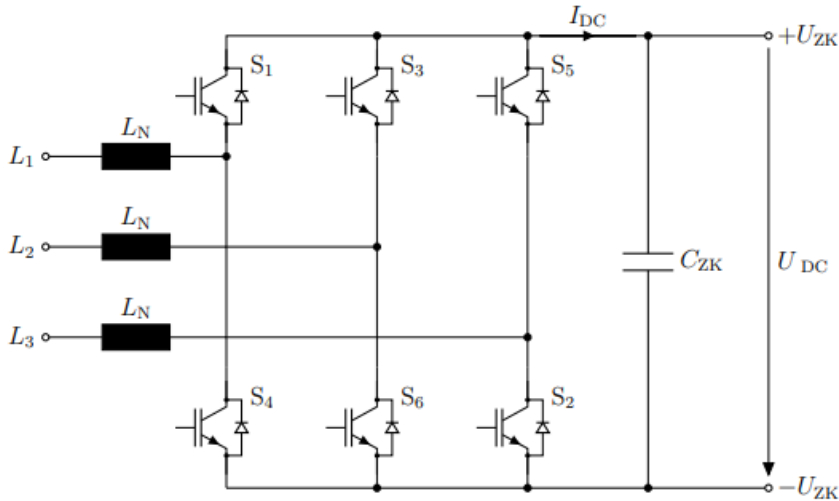


Bild 55: Darstellung eines AFE-Umrichters mit IGBT als Halbleiterbauelemente

Bereits durch dieses Beispiel wird deutlich, wie komplex der Aufbau eines Gleichstromkreises sein kann. Für die Simulation wurde in Abschnitt 5.4.1 vereinfacht angenommen, dass der Netzbaustein eine Quelle ist, welche zu jeder Zeit unbegrenzt Energie zur Verfügung stellt. Damit wurde auch ein Anlaufvorgang eines AFE nicht berücksichtigt. Anlauf- und Schaltvorgänge wurden auch für die DC-DC-Wandler nicht berücksichtigt. Lediglich Verluste durch den Wirkungsgrad wurden bei der Erstellung der Leistungsverbrauchswerte der einzelnen Apparaturen beachtet.

Auch für die Anbindung des Akkumulators in den Gleichstromzwischenkreis gibt es Bedingungen, welche berücksichtigt werden müssen. Grundsätzlich kann der Akkumulator direkt an die Gleichstromsammelschiene des Zwischenkreises angeschlossen werden. Eine weitere Lösung besteht auch hier im Zwischenschalten eines DC-DC-Stellers. Der zusätzliche Umrichter sorgt für eine Begrenzung der Kurzschluss- und Einschaltströme durch die Leistungselektronik und die Regelung. Zudem wird die Tiefentladung des Akkumulators verhindert [126]. Entsprechend werden sowohl der Akkumulator als auch das Gleichstromnetz entlastet. Andererseits kann ein direkt angeschlossener Akkumulator kurzzeitig hohe Ströme zum

Einschalten von Lasten liefern, was für die hier vorliegende APA theoretisch möglich wäre. Mit einem DC-DC-Wandler können kurzzeitige Stromspitzen nicht bedient werden, sie müssten mittels Kondensatoren oder Schwungmassenspeichern abgefangen werden.

Solche und weitere elektrotechnische Zusammenhänge lassen sich mit der aufgezeigten Simulation nicht darstellen, weil die Komponenten nicht modelliert wurden. Eine Simulation derer lässt sich aber durchaus einbinden, wenn erneut eine Verknüpfung über Koppelsignale etabliert wird. Dazu müssen die Modelle für Wandler und AFE aber vorliegen, bzw. im Vorfeld der kombinierten Simulation erstellt werden.

Durch die Vereinfachungen wird die Simulation ungenau und kann nur als Richtlinie für die Planung des Gleichstromnetzes genutzt werden. Damit ist aber auch Potenzial zur Weiterentwicklung aufgezeigt, welches durch Forschungsprojekte durchaus ausgeschöpft werden kann.

Weiteres Potenzial ist auch in der kombinierten Material- und Energieflusssimulation durch die Integration von Betriebsdaten gegeben. Erste Ansätze dazu zeigt der folgende Abschnitt.

5.5.4 Integration von Betriebsdaten zur Erstellung einer betriebsbegleitenden Simulation

Es gibt bereits eine Vielzahl an Anwendungen, welche Daten aus den Anlagen im Shopfloor einlesen und weiterverarbeiten. Hier spielt der Datenstandard OPC UA eine bedeutende Rolle. Viele Maschinen verfügen über eine entsprechende Schnittstelle, so dass Daten aus dem Betrieb auf dem Server gespeichert werden können. Die Daten können für die Simulation auch genutzt werden.

Läuft die Anlage bereits im Vorfeld der Etablierung eines eigenen Gleichstromnetzes im Shopfloor und erzeugt reale Daten zum Energieverbrauch, werden diese in den OPC UA-Server integriert und parallel die Simulation des Gleichstromnetzes und des Netzwerks zur Energieversorgung gestartet. Damit ist es möglich, zu evaluieren, ob das erstellte Gleichstromnetz den Leistungsbedarf abdecken kann, zu welcher Zeit Spannungsspitzen entstehen und wie das Verhalten der Anlage tatsächlich ist. So könnte sich auch zeigen, dass eine Änderung des Prozessablaufes zur Erhöhung der Effizienz führt. Unter Nutzung der betriebsbegleitenden Simulation lassen sich auch Aussagen darüber treffen, ob PV-Anlage und Akku bzw. im Allgemeinen die Komponenten der Energieversorgung ausreichend dimensioniert sind. Ist bereits eine PV-Anlage vorhanden, die zukünftig in einen

eigenen Gleichstromkreis Energie einspeisen soll, wäre es auch möglich, deren Leistungsdaten über ein Jahr hinweg aufzuzeichnen und in die Simulation einzupflegen. Aus den genannten realen Daten können unter der Nutzung maschineller Lernverfahren auch synthetische Daten erstellt werden, die wiederum die Simulation näher an die Realität führen.

Da für die verteilte, kombinierte Simulation auf OPC UA zurückgegriffen wurde, sind verschiedene Möglichkeiten der Einbindung realer Daten denkbar [P9].

Mittels der Simulationsumgebung wurde gezeigt, dass auch die dritte Teilfrage zur Forschungsfrage eindeutig mit Ja beantwortet werden kann, denn die Leistungs- bzw. Energiebedarfe der Anlagen können so modelliert werden, dass das Netzwerk der Energieversorgung darauf zugreifen und damit dessen Simulation durchgeführt werden kann. Damit ist die gestellte Forschungsfrage, ob es möglich ist, mit Hilfe der Simulation darzustellen, ob ein konkretes Energieversorgungsnetz für diesen Anwendungsfall effizient ist, nahezu beantwortet. Gezeigt wurde bisher, dass die kombinierte Simulation möglich ist.

6 Validierung der kombinierten Simulation anhand verschiedener Testszenarien

Für die Validierung werden Experimente und Analysen durchgeführt, so dass schließlich interpretierbare Simulationsergebnisse entstehen. Die Simulationsergebnisse werden durch verschiedene Anwendungsfälle erzeugt. Bereits in Abschnitt 4.1 wurde definiert, hinsichtlich welcher Aspekte die Planung des Gleichstromnetzes überprüft werden soll. Damit wird die Wahl der einzelnen Komponenten des DC Smart Grid validiert

Überprüft wird, ob es mit dem definierten Gleichstromnetz möglich ist,

1. die Spitzen aus dem Versorgungsnetz zu verringern,
2. den Zustand des Nothalts zu halten und
3. über eine kurze Zeitspanne die vollständige Produktion energieautark weiterzuführen.

Diese Anwendungsfälle werden im Folgenden überprüft.

6.1 Regelbetrieb der Anlage

Der erste Aspekt bezüglich der Spannungsspitzen betrifft den Regelbetrieb der Anlage.

6.1.1 Veränderung des Produktionsablaufs

Dazu wird der geplante Prozessablauf des Regelbetriebs in den Blick genommen. In Bild 56 ist der dazugehörige Leistungsbedarf über der Zeit aufgetragen. Zwei Zellen weisen für den jeweiligen Prozess einen sehr hohen Leistungsbedarf auf. Dies ist zum einen die Lötanlage mit dem Prozess des Vorheizens und zum anderen die Testanlage. Aus der Simulation ergibt sich inklusive des manuellen Prozesses der Entnahme der Leiterplatte aus der Testanlage eine Zykluszeit von 260 s. Für das Löten und die Prüfung der Leiterplatte wird verhältnismäßig viel Zeit benötigt. Für den gesamten Zyklus muss aufgrund der langen energieintensiven Prozesse eine hohe Grundlast zur Nutzung aus dem Stromnetz berücksichtigt werden. Damit bleibt in den Verhandlungen bezüglich eines günstigen Stromtarifmodells mit dem Stromversorger wenig Spielraum.



Bild 56: Leistungsbedarf der APA über der Zeit

In der Simulation wird in einem ersten Schritt überprüft, wie sich Veränderungen in der Prozessreihenfolge auf den Energiebedarf der Anlage und damit auf ein Tarifmodell auswirken. Beim Löten von Leiterplatten handelt es sich um eine definierte Prozessfolge. Die einzige Zelle, die vom Produktionsprozess losgelöst ist, ist die Testanlage. Sie kann – sobald eine Leiterplatte gelötet ist, für den Test genutzt werden. Weiterhin wäre es innerhalb des Produktionsprozesses möglich, einen weiteren WT mit Leiterplatte schon an den Anfang der Lötanlage zu transportieren, während eine andere in der Anlage gelötet wird. Allerdings gestaltet sich das als schwierig, weil werksseitig Ein- und Ausgang der Lötanlage verbunden sind und nur ein einziges Transportband darin verfügbar ist. Außerdem ist der Transport des WT vom großen Transportband zur Lötanlage mit dem IR schnell und wenig energieintensiv, so dass sich das kaum als effizienter darstellen wird.



Bild 57: Aufzeichnung der Gesamtlast über der Zeit als Summe der Verbraucher

Deshalb soll lediglich der Prozess des Prüfens parallelisiert an den Anfang des Produktionsprozesses gestellt werden. Dies führt dazu, dass die manuellen Prozesse (Entnahme aus der Prüfanlage und Einführen des nächsten Prüflings) nicht am Ende anfallen und dem Gesamtprozess angehängt werden, sondern bereits in der zweiten Hälfte des Vorgängerprozesses durchgeführt werden können. Dies ist nur möglich, weil die Leiterplatten nicht sofort nach dem Löten geprüft werden müssen und deshalb einige wenige fertige Platten auf Vorrat liegen können. Aus diesen Veränderungen im Produktionsprozess ergibt sich auch ein veränderter Lastbedarf für die Gesamtlast, der in Bild 57 dargestellt ist. Deutlich zu erkennen ist die wesentlich kürzere Zykluszeit von 180 s. Das Verhalten der einzelnen Produktionsprozesse für diesen Fall ist in Bild 58 aufgezeigt.

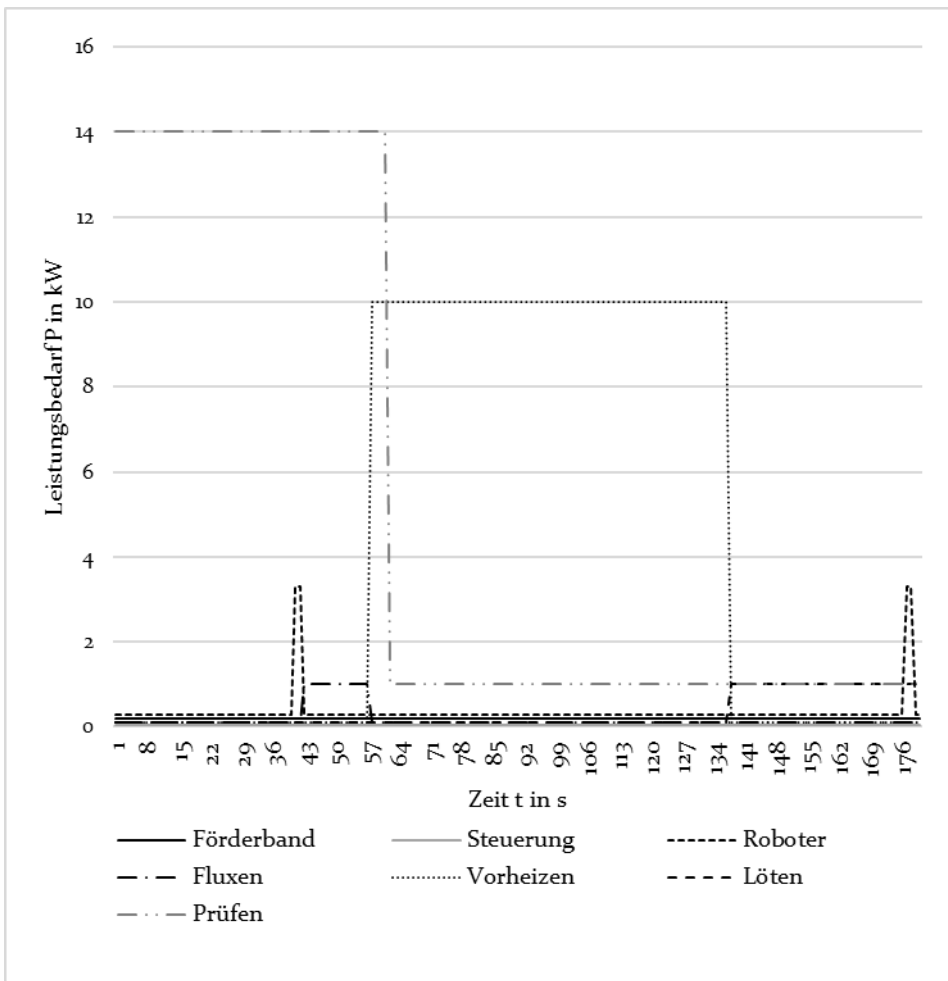


Bild 58: Darstellung der einzelnen Lastbedarfe über der Zeit

Weiterhin ist zu sehen, dass die Grundlast, die ggf. über den Energieversorger abzudecken ist, über die gesamte Zeit nicht wesentlich höher sein wird als vorher. Es sind nur zwei hohe, kurze Spannungsspitzen zu erkennen. Diese müssen in jedem Fall abgedeckt werden. Die Energie dafür darf nicht über das Netz bezogen werden, weil sonst kein Vertrag mit einem geringeren Lastbedarf abgeschlossen werden kann. Da die manuellen Vorgänge keinen gesonderten Energieeintrag mit sich bringen, aber der Standby-Betrieb bzw. das währenddessen laufende Förderband zusätzlichen Energiebedarf mit sich bringt, sinkt der Energiebedarf entsprechend Gleichung (7) von 0,59 kWh auf 0,55 kWh pro Zyklus (Zy).

Allerdings steigt parallel dazu der Leistungsbezug pro Stunde aus dem Netz. Die Leistungsdaten sind Tabelle 13 gegenübergestellt.

Tabelle 13: Gegenüberstellung des Energiebedarfs zur Produktion der Leiterplatten im ursprünglich geplanten und im veränderten Produktionsprozess in der Anlage

	ursprünglicher Abl.	neuer Ablauf
Energie pro Zyklus	$E_{Zy} = \frac{E_{ges,260s}}{Zy} =$ $= 2.124,1 \frac{kJ}{Zy}$	$E_{Zy} = \frac{E_{ges,180s}}{Zy} =$ $= 1.978,6 \frac{kJ}{Zy}$
Zyklen pro Stunde	$N = \frac{3.600 \frac{s}{h}}{260 s} = 13,85 \frac{Zy}{h}$	$N = \frac{3.600 \frac{s}{h}}{180 s} = 20,00 \frac{Zy}{h}$
Energiebedarf pro Stunde	$E_h =$ $= 2.124,1 \frac{kJ}{Zy} * 13,85 \frac{Zy}{h}$ $= 29.418,79 \frac{kJ}{h}$	$E_h =$ $= 1.978,6 \frac{kJ}{Zy} * 20,00 \frac{Zy}{h}$ $= 39.572,00 \frac{kJ}{h}$
Produzierte Leiterplatten pro Tag	$N_{Tag} =$ $= 24 \frac{h}{Tag} * 13,85 \frac{Zy}{h} =$ $= 332 \frac{Zy}{Tag}$	$N_{Tag} =$ $= 24 \frac{h}{Tag} * 20 \frac{Zy}{h} =$ $= 480 \frac{Zy}{Tag}$

Unter dem neuen Prozessablauf wird pro Stunde mehr Leistung bezogen, da mehr Teile produziert werden. Allerdings steigt auch die Ausbringungsmenge pro Tag um 45 %. Da sich die Personalkosten nicht erhöhen, weil keine zusätzliche Person zur Bedienung der APA benötigt wird, bleiben die

Gemeinkosten ungefähr konstant, so dass tatsächlich der Gewinn erhöht wird. Hierzu ist eine gesonderte wirtschaftlich Betrachtung notwendig.

Für die Betrachtung, ob das Konzept für die APA und die Energieversorgung effizient sind, ist es notwendig, ein Preismodell für die Energieversorgung einzubeziehen.

6.1.2 Preismodell

Wie bereits in Abschnitt 3.5 gezeigt, gibt es unterschiedliche Modelle, welche seitens der Energieversorger für die Kunden angeboten werden. Dabei unterscheiden sich häufig die Preise für Unternehmen bzw. Industriekunden von denjenigen für Privathaushalte. Grundsätzlich setzt sich der Strompreis – wie beschrieben – aus diversen Komponenten zusammen, so dass auch der Anbieter nur bedingt Einfluss auf den Preis hat.

Besonders für Industriekunden gibt es seitens der Stromanbieter häufig die Möglichkeit, spezielle Preismodelle zu nutzen. Dafür spielen Zeitabschnitte mit einer Länge von 15 Minuten eine wichtige Rolle. Innerhalb dieser Messperiode wird der Energiebedarf gemittelt. Lastspitzen, die in diesem Zeitraum einen hohen Energiebedarf aufweisen, sollen vermieden werden. Nach dem in Bild 59 dargestellten Leistungsbedarf der gesamten APA könnte beispielsweise verhandelt werden, dass die Grenze von einer Leistung von 15,00 kW aus dem Versorgungsnetz nicht überschritten wird, obwohl der Leistungsbedarf der Gesamtanlage Energiespitzen, die darüber hinaus gehen, aufweist. Die auftretenden Spitzen müssen dann anderweitig z. B. über die PV-Anlage oder über den Akkumulator mit Energie versorgt werden. Weitaus besser wäre es, den Mittelwert der Leistung als fiktive Grenze zu vereinbaren. Der Mittelwert der Leistung lässt sich mathematisch mit der in Gleichung (6) dargestellten Formel berechnen.

$$\bar{P} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n P_i \quad (6)$$

mit n =Anzahl der verschiedenen Leistungswerte; P_i = Leistungswerte der einzelnen Anwendungen. Daraus ergibt sich für die benötigte Energie von 1.978,6 kJ über 180 Zeitschritte eine mittlere Leistung von 11,00 kW und der gesamte Energiebedarf entsprechende der in Bild 59 dargestellten Fläche unter dem Graphen. Mit den vorherigen Darstellungen lässt sich weiterhin zeigen, dass in der angesprochenen Messperiode von 15 Minuten fünf Produktionszyklen mit der Dauer von 180 s durchlaufen werden.

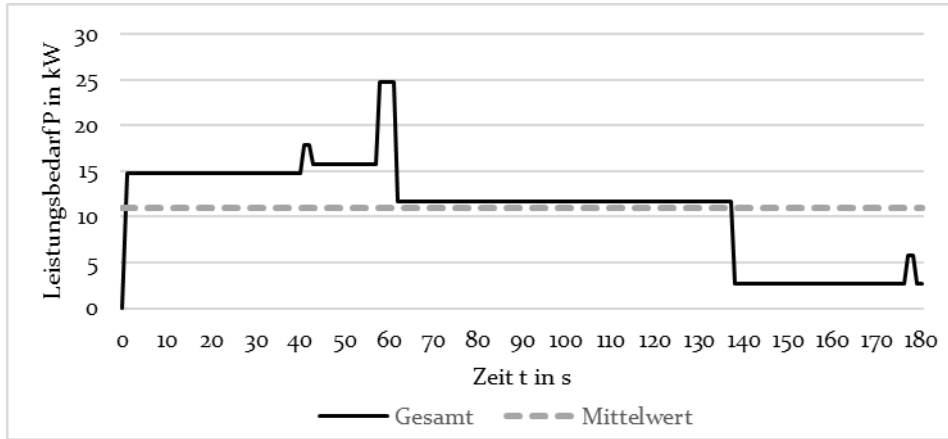


Bild 59: Darstellung der mittleren Leistung mit dem gesamten Leistungsbedarf der APA

Als Strompreis wird für das Mittel am Tag ein fiktiver Wert von 0,40 €/kWh angenommen. Das entspricht einem durchschnittlichen Strompreis für Industriekunden im Frühjahr 2023, ehe die Strompreisbremse der Regierung Gültigkeit erlangte.

$$\bar{E} = \bar{P} * t = 11,00 \text{ kW} * \frac{180 \text{ s}}{3.600 \text{ s}} \text{ h} = 0,55 \text{ kWh} \quad (7)$$

Aus der mittleren Leistung $\bar{P}$ von 11,00 kW ergibt sich für die Zykluszeit von 180 s der in Gleichung (7) ermittelte Wert von 0,55 kWh für den Energiebedarf in einem Zyklus. In Gleichung (8) wird der Energiewert für den kritischen Zeitraum von 15 Minuten ermittelt und ergibt sich zu einer mittleren Energie $\bar{E}_{15\text{Min}}$ von 2,75 kWh.

$$\bar{E}_{15\text{Min}} = 5 * \bar{E} = 5 * 0,55 \text{ kWh} = 2,75 \text{ kWh} \quad (8)$$

In Gleichung (9) wird der mittlere Energiebedarf für einen Tag über 24 Stunden (bei drei Schichten im Betrieb) angegeben.

$$\begin{aligned} \bar{E}_{24\text{h}} &= 4 * 24 * \bar{E}_{15\text{Min}} = 4 * 24 * 2,75 \text{ kWh} \\ &= 264,00 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (9)$$

Aus dem ermittelten mittleren Energiebedarf pro Tag ergeben sich aus Gleichung (10) tägliche Kosten $K_{24\text{h}}$ in Höhe von 105,60 €.

$$K = 0,40 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * 264,00 \text{ kWh} = 105,60 \text{ €} \quad (10)$$

Im Sinne des Kostenmodells sollte folglich mit dem Energieversorger vereinbart werden, dass der mittlere Energiebedarf in einem Intervall von 15 Minuten den Wert von 2,75 kWh nicht überschreiten darf und weiterführend Leistungsspitzen über 15,00 kW vermieden werden.

6.2 Bewertung der Simulation anhand von Testfällen

6.2.1 Vorbemerkung zum Verhalten des Akkumulators

In Abschnitt 5.5.3 wurde festgestellt, dass das Verhalten der elektrotechnischen Komponenten vereinfacht modelliert wurde. Weiterhin wurde aufgezeigt, dass ein Akkumulator, welcher mit einem DC-DC-Wandler als Gleichrichter an den Stromkreis angeschlossen ist, über eine gewisse Reaktionszeit verfügt. Diese Auswirkungen müssen berücksichtigt werden, wenn überprüft werden soll, ob die Leistungsspitze abgefangen werden kann. Die Lastspitzen, die in Bild 57 für die gesamte Anlage dargestellt sind, entstehen entweder durch das Anfahren des IR oder durch den Zustandswechsel in der Lötanlage. Beide Vorgänge sind mit Anlaufkurven verbunden, die so flach steigen, dass es der Akkumulator unter Beachtung des eigenen Verhaltens bewältigen kann. Folglich ist es möglich, das Preismodell mit dem Akkumulator einzuhalten. Anderenfalls müsste eine andere Art des Speichers integriert werden, der über eine schnellere Abgabe der Leistung nach dem Signal zur Entladung verfügt.

Als erster Anwendungsfall soll der alltägliche Betrieb der APA im Sinne des korrekten Prozessablaufs überprüft werden. Das Energiemanagement wird in diesem Testfall noch nicht betrachtet.

6.2.2 Anwendungsfall 1: Regelbetrieb der Anlage

6.2.2.1 Bezug der Energie aus dem Versorgungsnetz

Weiterhin muss überprüft werden, ob die Betriebszustände mit dem korrekten Leistungsbedarf simuliert werden. Dazu ist der korrekte Ablauf des Produktionsprozesses notwendig. Gestartet wird die Simulation über das simulierte HMI in der virtuellen Steuerung. Das Transportband startet, verbleibt im Nennbetrieb und wird bis zum vollständigen Stillstand der Anlage (z. B. Nothalt) nicht gestoppt. Das Anhalten des WT wird mechanisch durch die Stopper übernommen. Parallel dazu startet automatisiert der Prüfprozess in der Testanlage, die der Werker bereits mit einer Leiterplatte

bestückt hat. Der am Stopper anliegende WT löst den Sensor aus und daraufhin startet die Bewegung des IR zum ersten Übergabepplatz. Die Bewegung des Roboters ist nahezu stufenförmig ausgebildet. Die Simulation zeigt die Veränderung der Betriebszustände von „betriebsbereit“ zu „arbeitend“. Während der Bewegung des IR werden außerdem die Greiferzangen geöffnet, sie werden nach Auslösen des Sensors in den Zangen durch die Veränderung des pneumatischen Signals wieder geschlossen. Dies führt zu einer Klemmung des WT. Während des Greifvorgangs verbleibt der IR im Zustand „betriebsbereit“. Wenn der IR am zweiten Übergabepunkt angekommen ist und die Lichtschranke am Ein- bzw. Ausgang der Lötanlage ausgelöst ist, werden die Greiferzangen geöffnet und der WT auf dem Transportband der Lötanlage abgelegt. Jetzt ändert sich der Betriebszustand des IR von „arbeitend“ auf „betriebsbereit“. Im Inneren der Lötanlage werden nach zeitlichen Vorgaben die Betriebszustände für die Apparaturen des Fluxens, des Vorheizens und des Lötens verändert. Im multiphysikalischen Modell des MCD ist keine Änderung zu erkennen, in Plant Simulation ändert sich jedoch der Energiebedarf der einzelnen Prozessschritte in der Lötanlage. Die Umsetzung der Modellierung ist in Bild 60 dargestellt. Nach Abschluss aller Prozesse in der Lötanlage wird der WT an den Ausgang transportiert, an welchem der IR noch steht. Die Greiferzangen sind noch immer geöffnet. Wird wieder der Sensor im Inneren der Greiferzangen ausgelöst, startet der Prozess des Schließens.

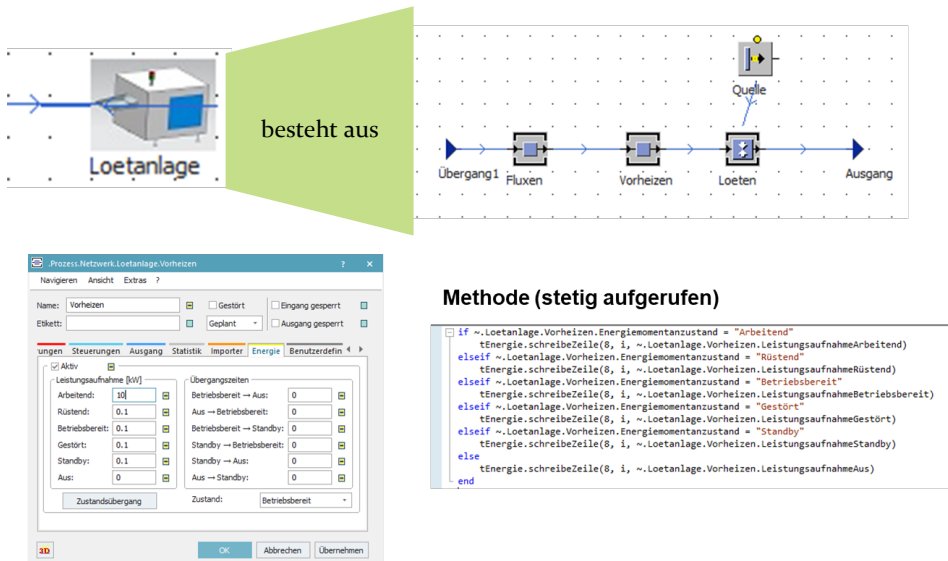


Bild 60: Modellierung des Verhaltens der Lötanlage in Plant Simulation

Für Bewegung des IR zum Übergabeplatz hinter den Stoppern ändert sich dessen Betriebszustand von „betriebsbereit“ auf „arbeitend“. Durch das Auslösen des am Übergabeplatz angebrachten Sensors wird der Vorgang des Öffnens gestartet. Nach dem Prozess des Öffnens der Greiferzangen wird der WT auf das Transportband gelegt und mitgenommen. Der IR bewegt sich in die Ausgangsposition zurück, wobei die Greiferzangen geschlossen werden. Am Ende des Transportbandes löst der WT das Signal für das Starten eines neuen Zyklus aus. Weiterhin wird dem Werker über das HMI ein Hinweis gegeben, dass die Produktion der Leiterplatte beendet ist. Da der Testprozess weniger Zeit benötigt als ein Produktionszyklus, ist die Testanlage zum Zeitpunkt des erneuten Startes bereits bestückt. Die Betriebszustände der Zellen können in Plant Simulation ausgelesen werden (Bild 61). Mehrere Simulationsläufe zeigen, dass der Prozessablauf korrekt modelliert ist und die Simulation vollständig abläuft.

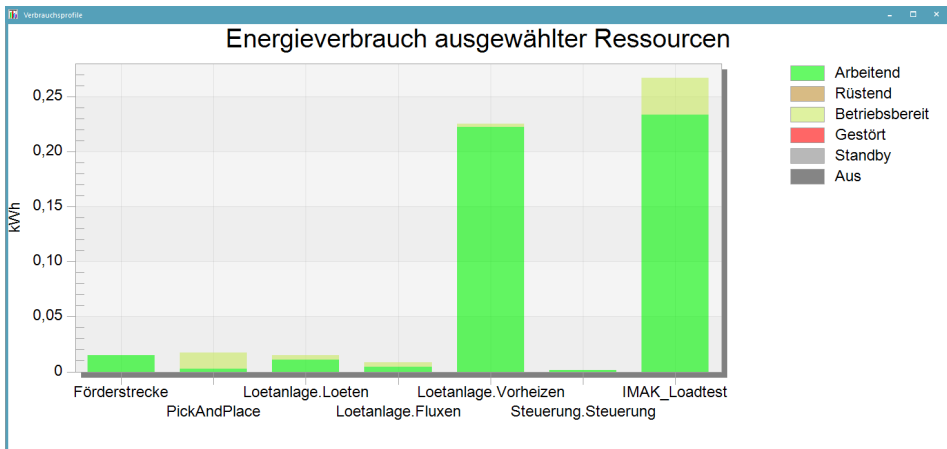


Bild 61: Energiebedarf der Ressourcen als Dialogfenster in Plant Simulation

Damit wird deutlich, dass die Verbindung der Simulationswerkzeuge und des Co-Simulationsmasters zur virtuellen Steuerung stabil ist. Der Prozessablauf wurde außerdem im Anwenderprogramm korrekt abgebildet.

Dass auch die Kopplung zu Plant Simulation über den OPC UA-Server und die Clients korrekt ist, lässt sich über die Aufnahme der Betriebszustände für die einzelnen Zellen und die Produktionsschritte in Plant Simulation zeigen. Der Leistungsbezug entlang der Zeit und der Prozessschritte ist in Bild 62 aufgenommen. Farblich gekennzeichnet sind die Energiebedarfe der einzelnen Zellen.

Weiterhin lässt sich in Plant Simulation auch der Energiebedarf E_{SIM} , der in der Simulation für jeden Zyklus ermittelt wird und in Gleichung (11) dargestellt ist, ermitteln.

$$E_{SIM} = 0,54908 \text{ kWh} \quad (11)$$

Er stimmt mit dem Wert, der in Abschnitt 6.1 rechnerisch bestimmt wurde, überein.

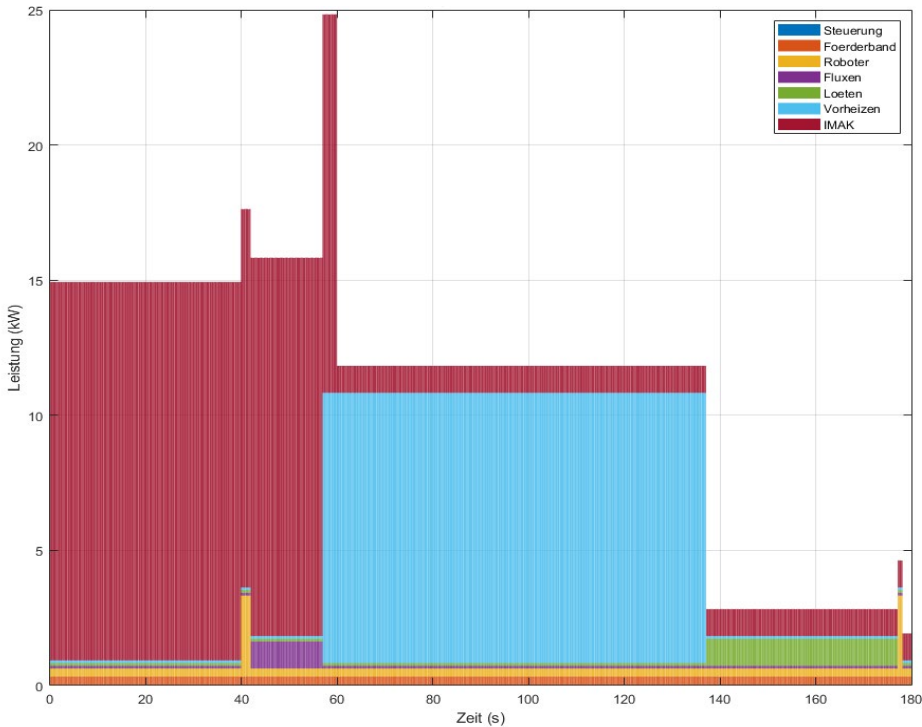


Bild 62: Leistungsbezug der Verbraucher aus Plant Simulation

6.2.2.2 Nutzung der aus der PV-Anlage eingebrachten Leistung

In den nächsten Simulationsdurchläufen soll die Energie nicht nur aus dem Versorgungsnetz stammen, sondern zusätzlich von der ausgewählten und in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen PV-Anlage eingebracht werden. Die Verbraucher und somit auch der Energiebedarf bleiben unverändert, so dass die Ergebnisse mit denjenigen der vorherigen Simulationsläufe vergleichbar sind. Die PV-Anlage ist auf einer Dachfläche von 140 m^2 installiert.

Aus den vorhandenen Daten wurde ein durchschnittlicher Tag ermittelt. Der Verlauf der Leistung, welche durch die PV-Anlage an diesem durchschnittlichen Tag erzeugt wird, ist in Bild 63 dargestellt. Zusätzlich ist es auch möglich, die eingebrachte Leistung für einen speziellen Sommer- oder Wintertag zu nutzen, wie sie in Abschnitt 3.3.3 beschrieben ist. Über die Wahl der Startuhrzeit legt der Nutzer fest, in welchem Zustand sich die PV-Anlage zu Beginn der Simulation befindet.

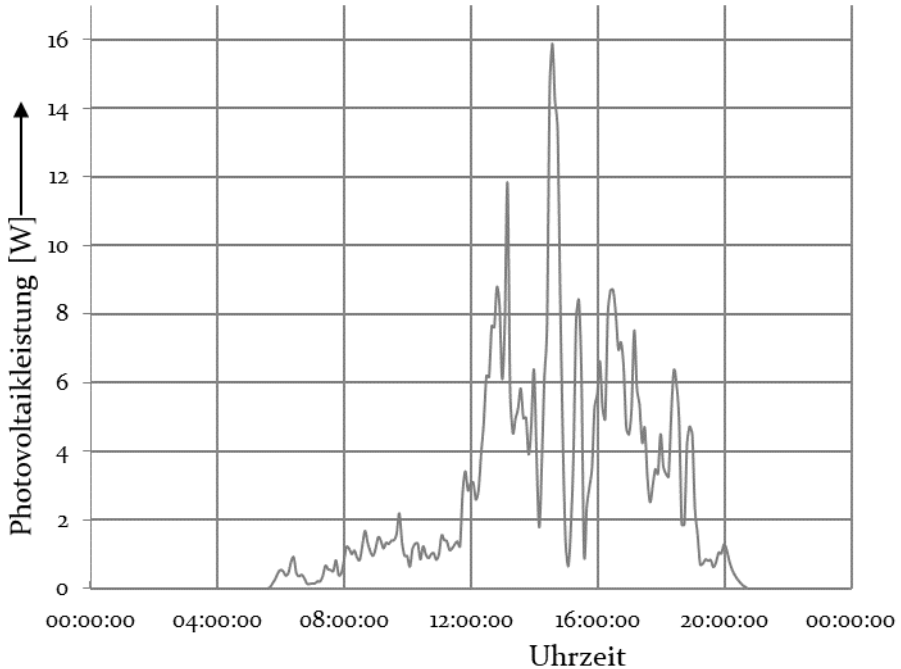


Bild 63: Leistung der PV-Anlage über einen durchschnittlichen Tag

Der theoretische Energieeintrag E_{PV} , den die Anlage über den gemittelten Tag erbringt, beträgt 46,71 kWh.

Die Energie E_{Netz} , welche zu Zeitpunkt t aus dem Netz bezogen wird, ermittelt sich nach Gleichung (12) aus der Differenz zwischen der benötigten Energie durch die APA und der eingebrachten Energie der PV-Anlage.

$$E_{Netz}(t) = E_{ges}(t) - E_{PV}(t) \quad (12)$$

Dieser Zusammenhang wurde mittels einer Methode in der Simulation umgesetzt. Damit ist bestimmbar, ob die PV-Anlage genug Energie liefert, um Spitzenleistungen, die einen Energiepeak auslösen, abzufedern. Mit dem

Energieversorger wurde vereinbart, dass die aus dem Netz bezogene Leistung nie den Wert von 15,00 kW überschreitet. Aus der in der Simulation ermittelten Leistungsaufnahme der APA ergibt sich, dass pro Zyklus Energie E_{zus} in Höhe von 0,010 kWh anderweitig aufgebracht werden muss. Dies entspricht dem Energieinhalt, der im Peak benötigt wird, und ermittelt sich aus der Fläche unter der Kurve zwischen dem Leistungsbedarf und der Grenze von 15 kWh. Er ist durch die gestrichelte Fläche in Bild 94 visualisiert.

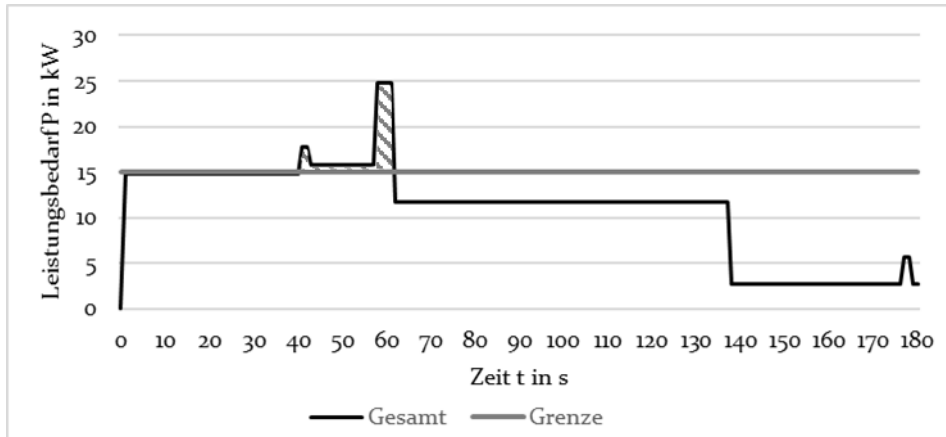


Bild 64: Darstellung des Energiebedarfs, der nicht durch das Netz gedeckt wird

Die Energie $E_{\text{zus},24\text{h}}$, die während des gesamten Tages eingebracht werden muss, wird in Gleichung (13) zu 4,8 kWh berechnet.

$$\begin{aligned} E_{\text{zus},24\text{h}} &= 20 * 24 * E_{\text{zus}} = 20 * 24 * 0,010 \text{ kWh} \\ &= 4,8 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (13)$$

Daraus ergibt sich mit dem Energieeintrag der PV-Anlage von 46,71 kWh pro Tag, dass mit der PV-Anlage theoretisch für 9,7 Tage die Spannungsspitzen abgefangen werden können.

Lässt man die Simulation ablaufen und führt neben der Bedingung, dass die PV-Anlage nur genutzt wird, wenn die Leistung mehr als 15 kW beträgt, über das Anwenderprogramm die Bedingung ein, dass der Netzbezug nach Gleichung (12) die Leistung von 15 kW nicht überschreiten darf, so stoppt die Simulation immer dann, wenn der Zeitpunkt in der Nacht, im Abend oder am frühen Morgen liegt, denn zu diesen Zeitpunkten ist der Energieeintrag gleich dem Wert 0. So ist gezeigt, dass ausschließlich unter Verwendung der PV-Anlage, ein günstiges Preismodell nicht benutzt werden kann und so die Anlage nicht effizienter arbeitet.

In weiteren Simulationsläufen wurden die Bedingungen zur Nutzung der PV-Anlage nicht eingeführt und jede Energie, die erzeugt wurde, direkt für die APA genutzt. Dann ist in der Simulation zu erkennen, dass der Bezug aus dem Netz parallel zum Ertrag aus der PV-Anlage sinkt. Damit sinkt der Energiebezug aus dem Netz nach Gleichung (12) von 264,00 kWh auf $P_{\text{mitPV}}=217,29$ kWh in einem Tag. Die Kosten K_{mitPV} ergeben sich nach Gleichung (10) zu

$$K_{\text{mitPV}} = 0,40 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * 217,29 \text{ kWh} = 86,92 \text{ €} \quad (14)$$

und sinken damit um 17,7 %.

Weiterhin kann der mittlere Leistungsbedarf mit der PV-Anlage neu berechnet werden. Für den hier ausgewählten Tag beträgt der mittlere Leistungsbedarf dann lediglich 9,05 kW. Das Kostenmodell, welches mit dem Energieversorger vereinbart wurde, kann jedoch grundsätzlich nicht eingehalten werden, da es viele Tage gibt, in welchen der benötigte Energieeintrag nicht erreicht werden würde.

Deshalb kann gezeigt werden, dass ausschließlich eine PV-Anlage für den effizienten Betrieb einer Anlage nicht ausreichend und zielführend ist. Konkret ist die Unterstützung durch eine PV-Anlage nur sinnvoll, wenn Energie zwischengespeichert werden kann. Im Folgenden wird deshalb zusätzlich der Akkumulator angeschlossen und in die Simulation einbezogen.

6.2.2.3 Nutzung des gesamten Gleichstromnetzes

Nutzt man zusätzlich zur PV-Anlage den Akku, so ist der Betrieb der Anlage ohne Überschreitung der Leistung von 15 kW auch in der Nacht und bei geringer Sonneneinstrahlung möglich. So kann die Anlage tatsächlich über einen definierten Zeitraum ohne Bezug von Energie aus dem Stromnetz betrieben werden.

Wie in Gleichung (13) gezeigt, beträgt der Energieinhalt, der durch die Spannungsspitzen verursacht wird, über einen Tag 4,8 kWh. Dieser Energiebedarf muss einerseits durch die PV-Anlage in einem Tag produziert werden und andererseits im Akkumulator gespeichert werden können. Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, kann die als Referenzanlage dienende PV-Anlage das leisten.

Der Akkumulator muss die notwendige Energie in Höhe von 4,8 kWh speichern können. Dabei sollen die beiden Ladegrenzen von 20 % bzw. 80 %

nicht unter- bzw. überschritten werden. Also muss der Akkumulator mindestens über eine Kapazität für einen Energieinhalt in Höhe von 8,0 kWh verfügen. Das Energiemanagement sieht für diesen, energieeffizienten Fall vor, dass zunächst die Leistung aus der PV-Anlage genutzt wird und dann der Akkumulator geladen wird, während man von einem vollgeladenen Akkumulator ausgeht.

Der ausgewählte Akku hat eine Kapazität von 22,1 kWh, die für einen Tag in jedem Fall ausreichend ist. Beim Ablauf der Simulation wird deutlich, dass die gespeicherte Energie ausreicht, um niemals einen Netzbezug über 15 kW zu verzeichnen. In der Simulation ist zu sehen, dass der Akkumulator stets über einen sehr hohen Ladestand verfügt. Das ist ein Zeichen dafür, dass der Akkumulator durchaus auch größer dimensioniert werden könnte, um die von der PV-Anlage eingebrachte Leistung vollständig zu speichern. Ohne Vergrößerung kann die mittlere Leistung auch tatsächlich auf 10 kW gesenkt werden. Außerdem sinken die Kosten ungefähr um die in Gleichung (14) berechneten 17 %.

Insofern ist mit diesen Simulationen gezeigt, dass die Anlage bzw. das Werk mit dem geplanten Gleichstromnetz energieeffizienter betrieben werden kann. Der Vollständigkeit wegen soll auch der Betrieb ohne PV-Anlage und nur mit dem Akkumulator betrachtet werden.

6.2.2.4 Nutzung des Akkumulators

Es ist grundsätzlich möglich, die Anlage mit dem Akku zumindest zeitweise autark vom Versorgungsnetz zu betreiben. Dazu sollte er in jedem Fall zunächst geladen sein. Der Ladezustand wird in der Simulation für jeden Simulationsschritt ausgelesen und auf dem genutzten OPC UA-Server gespeichert. Es ist zu bedenken, dass der Akku nur zwischen 20 % und 80 % betrieben werden soll. Deshalb beträgt die Energie, die genutzt werden kann, lediglich 13,26 kWh. Daraus werden über den Tag verteilt 4,8 kWh zur Deckung der Leistungsspitzen genutzt. Dieser Energieinhalt wird wieder aus dem Netz zur Ladung des Akkus bezogen, wenn der Leistungsbedarf der Anlage gering ist, wie z. B. nachdem 140 s (paralleler Betrieb der Testanlage) abgelaufen sind. Über Versuche und Annäherung ergibt sich in der Simulation, dass mit diesen Werten sogar ein maximaler Bezug von 11 kW aus dem Versorgungsnetz möglich wäre. Damit könnte ein günstigerer Strompreis für jede verbrauchte Kilowattstunde verhandelt werden. Dabei sinkt der Bezug aus dem Versorgungsnetz nicht, da keine zusätzliche Energiequelle vorhanden ist. Insofern trägt auch die alleinige Nutzung eines Akkumulators nicht zu einem energieeffizienteren Betrieb der APA

bei. Abschließend ist festzustellen, dass mit der Simulation gezeigt werden kann, dass die Anlage im alltäglichen Betrieb mit dem eigenen Gleichstromnetz (energieeffizienter) betrieben werden kann. Damit ist die Forschungsthese bewiesen. Dennoch sollen zwei die beiden weiteren Anwendungsfälle hinsichtlich des autarken Betriebs und des Nothalts simuliert werden.

6.2.3 Anwendungsfall 2: Ausfall des versorgenden Netzwerks

Es wird der Betrieb der Anlage über einen Zeitraum von 5 Minuten simuliert im Normalbetrieb alleine unter Energieversorgung durch den Akkumulator. Dafür muss die benötigte Energie durch die PV-Anlage als weitere Quelle und den Akkumulator als Speicher abgedeckt werden. Da die PV-Anlage ein unsicherer Faktor ist und bei einem ungünstigen Zeitpunkt in der Nacht keinen Energieeintrag leistet, soll diese hier nicht genutzt werden. So wird geprüft, wie lange die Anlage durch die Versorgung durch den Akku weiterproduzieren kann. Dabei soll die Testanlage stillstehen, da sie für den Produktionsprozess nicht zwingend notwendig ist und auch nicht für die Produktion von Fehlteilen verantwortlich ist. Außerdem soll sich der Akku in geladenem Zustand mit einem SoC von mehr als 20 % befinden. Er darf den minimalen Ladezustand von 20 % auch im Notfall nicht unterschreiten.

Um diesen Anwendungsfall zu simulieren, wurde die PV-Anlage von der Simulation getrennt und die Bestückung der Testanlage wurde gestoppt. Die Simulation über 5 Minuten wurde mehrmals, jeweils mit einem unterschiedlichen Ladestand des Akkumulators gestartet. Als Ergebnis wird die Vermutung bestätigt, dass eine Aussage, ob die Produktion über einen Zeitraum von 5 Minuten weiterbetrieben werden kann, vom Ladezustand des Akkumulators abhängig ist. Ist der Akkumulator vollgeladen (SoC = 80 %), so kann die Produktion über 5 Minuten bei Ausfall des Netzes aufrechterhalten werden. Dem Akku stehen nur 13,3 kWh zur Nutzung zur Verfügung. Unter Berücksichtigung des Energiebedarfs von 0,549 kWh pro Zyklus ergibt sich aus Gleichung (15), dass 24,2 Zyklen mit einem geladenen Akkumulator durchgeführt werden können. Folglich könnte die Anlage 72,6 Minuten energieautark betrieben werden.

$$t = \frac{E_{Akku}}{E_{Zy}} = \frac{13,3 \text{ kWh}}{0,55 \frac{\text{kW}}{\text{Zy}}} = 24,2 \text{ Zy} \quad (15)$$

Durch die Simulation lässt sich eine Laufzeit von 70,4 Minuten nachweisen. Die geringe Abweichung lässt sich durch Ungenauigkeiten in der Modellierung erklären. Aus der Simulation zeigt sich weiterhin durch sukzessive Anpassung der Parameter, dass bei Vorliegen eines Ladezustands von unter 25 % der autarke Betrieb über 5 Minuten hinweg nicht mehr möglich ist.

Rechnerisch kann dies bestätigt werden. Wie in Gleichung (16) ersichtlich ist, müssen in der Autarkiezeit von 5 Minuten 1,67 Zyklen durchlaufen werden.

$$N = \frac{300 \text{ s}}{180 \frac{\text{s}}{\text{Zy}}} = 1,67 \text{ Zy} \quad (16)$$

Daraus ergibt sich der in Gleichung (17) ermittelte Energiebedarf von 0,92 kWh.

$$E_{5Min} = 1,67 \text{ Zy} * 0,55 \frac{\text{kWh}}{\text{Zy}} = 0,92 \text{ kWh} \quad (17)$$

Unter Nutzung eines Akkumulators mit einer Kapazität von 22,1 kWh entspricht der Wert von 0,92 kWh 4,2 % der Gesamtkapazität.

Für das Energiemanagement muss berücksichtigt werden, dass der IR auch im Stillstand einen Leistungsbedarf in Höhe von 0,3 kW hat, um die Position halten zu können. Deshalb sollten 2 % des Akkumulators stets als Puffer vorgehalten werden. Als Ergebnis der Versuchsreihe wurde im Anwenderprogramm definiert, dass der Akkumulator im Normalbetrieb nur noch bis zu einem Ladezustand von 27 % entladen werden darf und eine Entladung bis zum definierten minimalen Ladezustand von 20 % nur ermöglicht wird, wenn keine Energie aus dem Netz bezogen werden kann. In diesem Szenario entlädt sich der Akkumulator entlang seiner Ladekurve, wie in Bild 65 dargestellt ist.

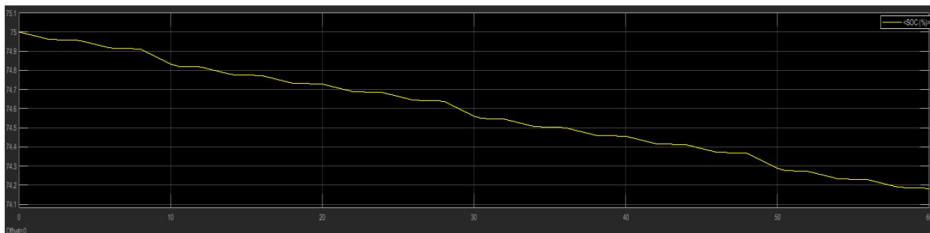


Bild 65: Entladung des Akkumulators (SoC) in Simulink

In Abschnitt 5.3.3 wurde der Akku mit linearer Entladung in Plant Simulation modelliert. Die Entladung über einen Zeitraum von 28 Minuten ist in Bild 66 dargestellt.

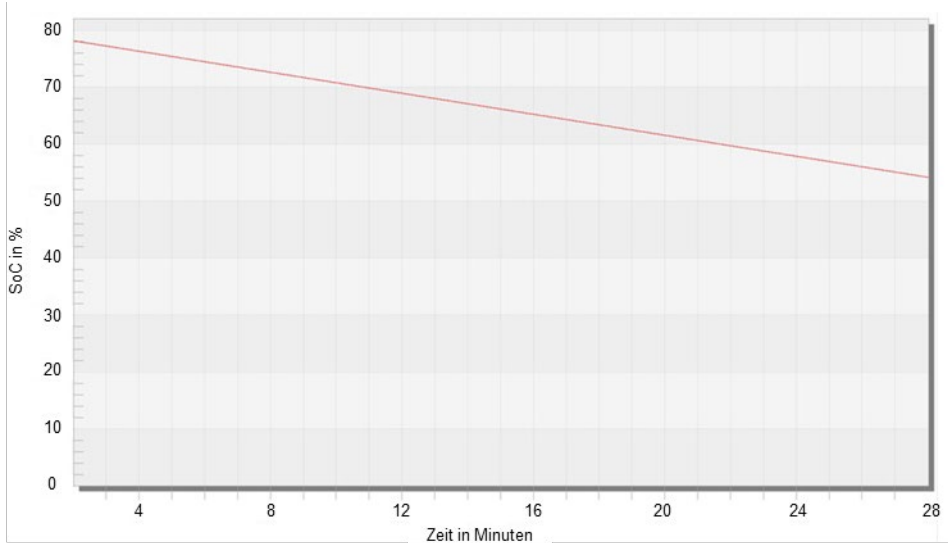


Bild 66: Entladung des Akkumulators anhand des Modells in Plant Simulation

Innerhalb von 28 Minuten (entspricht etwa 10 Zyklen) werden 26 % des Energieinhaltes des Akkumulators verbraucht. Dies entspricht 5,75 kWh. Bei einem Energiebedarf von 0,55 kWh pro Zyklus werden somit ungefähr 10 Zyklen möglich. Somit ist auch diese ausgegebene Kurve realistisch und zeugt von der richtigen Modellierung der Komponenten.

Zusätzlich soll weiterhin geprüft werden, wie lange die Anlage betrieben werden kann, wenn die PV-Anlage an einem durchschnittlichen Tag den Akkumulator lädt (über die Mittagszeit) und dieser sich über den Leistungsbedarf entlädt. Wie oben beschrieben, werden pro Tag 264,00 kWh Energie verbraucht. Der Eintrag der PV-Anlage beträgt an einem durchschnittlichen Tag 46,71 kWh. Aus dem Quotienten von Energiedarf und eingebrachter Energie ergibt sich in Gleichung (18), dass man die Anlage alleine aus der Energie der PV-Anlage 17,7 % des Tages (das entspricht 4,25 h) betreiben.

$$\frac{E_{24h}}{E_{PV}} = \frac{264,00 \text{ kWh}}{46,71 \text{ kWh}} = 0,177 = 17,7\% \quad (18)$$

Da der Akku als parametrisiertes Modell erstellt wurde und die PV-Anlage direkt von den hinterlegten Verhaltenskurven abhängig ist, ist es möglich,

die einzelnen Parameter im Sinne der Auslegung durch die Simulation zu bestimmen. Hierfür werden beliebig viele Simulationsdurchläufe genutzt. Weitergedacht wäre an dieser Stelle die Nutzung von maschinellen Lernverfahren zur Auslegung des effizientesten Netzwerks möglich.

6.2.4 Anwendungsfall 3: Reaktion der Anlage auf die Sicherheitsfunktion Nothalt

Als letzter Anwendungsfall soll die Sicherheitsfunktion des Nothalts geprüft werden. Da ein IR benutzt wird, darf im Notfall niemals durch Notaus die Stromzufuhr getrennt werden, sondern alle Zellen müssen stillgesetzt werden.

Anwendungsfall 3 wurde so definiert, dass die Anlage im Notfall mit einem Nothalt reagiert. Dieser wurde mittels eines Tasters an der Anlage und einer Schaltfläche auf dem HMI realisiert. Der Taster an der Anlage wird durch eine „herabfallende Hand“ als Kollisionskörper modelliert. Diese wird unvermittelt aktiviert. Die Schaltfläche am HMI wird über das simulierte HMI direkt ausgelöst.

Das Auslösen eines Nothalts führt dazu, dass alle Komponenten unmittelbar stillgesetzt werden. Der IR wird in den Fail-Safe-Modus gesetzt, in welchem die aktuelle Position gehalten wird. Weiterhin soll die Steuerung nicht abgeschaltet werden. Geprüft werden muss folglich, ob alle Komponenten stillstehen und auch der IR die Fahrt entlang der vorgegebenen Bahn zum Zielpunkt nicht mehr fortsetzt. Über das HMI oder über die Beobachtung des OPC UA-Servers muss deutlich werden, dass der Leistungsbedarf der Lötanlage, des Förderbandes und der Testanlage je 0 kW beträgt. Die Leerlaufspannung liegt noch am IR an. Dessen Leistungsbedarf beträgt in Folge der Modellierung 0,3 kW. Diese soll aus dem Netz entnommen werden, weil der Akku in diesem Anwendungsfall weder geladen noch entladen werden darf. Weiterhin beträgt der Eintrag der PV-Anlage 0 kW, da auch diese von dem Gleichstromkreis getrennt wird. In der Realität wird die PV-Anlage entweder in ein anderes Netz einspeisen oder über einen Sicherheitswiderstand entladen.

In einem Simulationsdurchlauf wurde der Nothalt über die Funktionsfläche auf dem HMI ausgelöst. Dies hatte unmittelbar zur Folge, dass sowohl die Variablen für den Entlade- als auch für den Ladevorgang des Akkumulators auf den Wert „false“ gesetzt wurden. Weiterhin wurde die Simulation der PV-Anlage gestoppt, in dem der Methode der Wert „false“ übergeben

wurde. Damit wurde die Energiezufuhr aus dem eigenen, der Anlage zugeordneten Gleichstromnetz unterbrochen. Der SoC des Akkumulators zeigte keine Veränderung. In NX wurde sofort das Förderband gestoppt, weil die Geschwindigkeit v_{FB} von 0,00 m/s übergeben wurde. Weiterhin wurde dem IR der Wert „false“ übergeben, die Greiferzangen erhielten keine neue Anweisung. Diese Werte wurden im Vorfeld im Anwenderprogramm der Steuerung für den Not-Halt definiert. In der Simulation traten die gewünschten Auswirkungen ein, die Werte wurden richtig übergeben und konnten auch nachvollzogen werden. Problematischer ist die Umsetzung für die Lötanlage. Dem zugehörigen Band wurde seitens des Anwenderprogramms ebenfalls der Wert 0,00 m/s für die Geschwindigkeit v_{Band} übergeben. Das konnte nachvollzogen werden. Zusätzlich mussten aber die Variablen, die den Zustand der Lötanlage an Plant Simulation übergeben, durch ein Signal auf „aus“ gestellt werden. Als Leistungsbedarf wurde direkt nach Auslösen des Nothalts lediglich der Bedarf des IR im Leerlauf und der der Steuerung gemessen. Diese beiden Bedarfe wurden mittels der bereits beschriebenen Methode addiert und aus dem Versorgungsnetz gedeckt. So ist zusammenfassend festzuhalten, dass auch der Nothalt durch die virtuelle Steuerung richtig abgebildet ist und korrekt simuliert wird. Damit ist auch der letzte Anwendungsfall durch die vorliegende, kombinierte Simulation abbildbar.

Mit dessen Abschluss liegen alle Simulationsergebnisse vor. Im letzten Schritt wird die kombinierte Simulation beurteilt.

6.3 Bewertung der Plattform der verteilten Simulation

Für eine taktgenaue Reproduzierbarkeit von Simulationsläufen in mehreren, verteilt angeordneten Werkzeugen ist eine Synchronisation dieser zwingend erforderlich. Um das zu realisieren ist es möglich, für die einzelnen, eigens getakteten Simulatoren eine Synchronisation auf die reale Zeit zu etablieren. [4] Für die vorliegende Plattform wurden die Taktungen aller Simulatoren an die Zeitskalierung des MCD angeglichen, da dieser keine Synchronisation der Zeit über die OPC UA-Schnittstelle ermöglicht. Ein Auslesen der Simulationszeit hingegen ist vorgesehen. Dennoch sind Simulationsläufe somit nicht taktgenau reproduzierbar. Der hier entstandene Mechanismus erlaubt es, die Simulatoren mittels deren Programmierschnittstellen zu takten und somit einander anzugleichen. Mit dem benutzten Rechner waren Simulationen bis zu einer Skalierung in zehnfacher Echtzeit durchführbar. Die Einschränkungen entstehen aufgrund der ho-

hen Modellgenauigkeit im MCD und des Vorhandenseins diverser Kollisionskörper als exakte Netze, die eine hohe Rechenleistung fordern. Die Einschränkung ist für die Beobachtung und Optimierung des Anwenderprogramms für den Prozessablauf unproblematisch. Auf diese Weise ist es möglich, das physikalische Verhalten der APA genau zu untersuchen und Ungenauigkeiten und Fehler im Prozess zu verbessern. Kollisionen werden aufgedeckt und angezeigt und durch eine Veränderung der Handhabung bzw. der Bahnkurven vermieden.

Ungünstige Auswirkungen hat die reduzierte Simulationszeit auf die Simulation des Energiemanagements. Untersuchungen, die mehrere Monate bis hin zu mehreren Jahren andauern sollen, sind nicht durchführbar bzw. würden eine sehr lange Zeitdauer einnehmen. Dieses Problem lässt sich auf zwei verschiedene Weisen lösen. Zum einen wäre es möglich, die multiphysikalische Simulation wegzulassen und zeitbasiert den Prozessablauf in Plant Simulation nachzubilden. Dies ist ohne weiteres möglich, da sich dort Materialfluss einfach abbilden lässt und der Energiebedarf schon in Plant Simulation addiert und abgebildet wird. Auch die Pick-and-Place-Bewegung eines Roboters kann in Plant Simulation abgebildet werden. Die Lötanlage ist bereits jetzt schon bestehend aus mehreren Bearbeitungsstationen abgebildet. Dies kann beibehalten werden. Eine Betrachtung des Greifvorgangs wäre in diesem Fall nicht mehr möglich, wurde ja aber bereits durch das multiphysikalische Modell evaluiert. Zum anderen wurde die Kommunikation zwischen den verschiedenen Simulatoren und dem Orchestrator über Koppelsignale und OPC UA etabliert. Diese Struktur lässt die Kommunikation über ein über mehrere Rechner verteiltes Computernetzwerk zu. Es wäre folglich möglich, die Simulation des multiphysikalischen Modells auf einem und die Simulation des Energiebedarfs und des Orchestrators auf einem weiteren Rechner ablaufen zu lassen. Auf einem dritten Computer würden das Modell in MATLAB Simulink, die Instanz der virtuellen Steuerung und der OPC UA-Server laufen. Über das verbindende, gemeinsame Computernetzwerk werden die Koppelsignale ausgetauscht. Damit ist die benötigte Rechenleistung auf mehrere Computer verteilt und vervielfacht. Nutzt man zusätzlich die gesamte vorhandene Datenbasis über ein Jahr für die PV-Anlage, werden Untersuchungen für das Energiemanagement und das -netz über mehrere Monate bis zu einem Jahr hin möglich.

Im letzten Schritt der Validierung soll überprüft werden, inwiefern sich die entstandene Simulationsumgebung das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0), welches in Abschnitt 2.1.2 vorgestellt wurde, einordnet.

6.4 Einordnung in RAMI 4.0

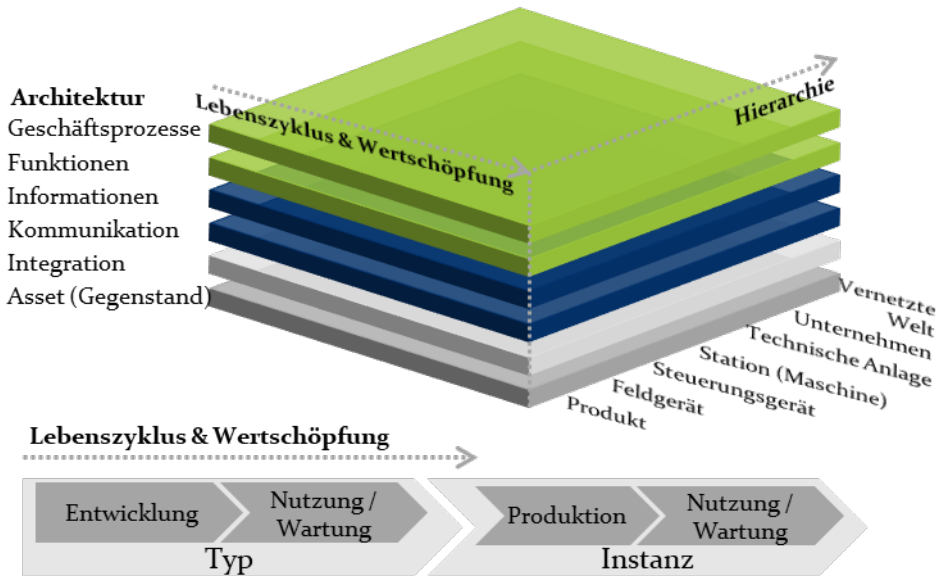


Bild 67: Abbildung des RAMI 4.0 nach Plattform Industrie 4.0 und ZVEI

In Bild 67 wird noch einmal das RAMI 4.0 dargestellt. Abschließend soll gezeigt werden, dass sich das Modell der kombinierten Simulation einordnen lässt und somit den Anforderungen der Industrie 4.0 gerecht wird. Im Rahmen der Einordnung der Plattform kommt der Layer- oder Architektur-Achse eine wichtige Bedeutung zu, da sie das Asset, also den Gegenstand, funktional aufgliedert. Über diese Achse lassen sich grundsätzlich alle cyberphysischen Systeme beschreiben [P10].

Dabei verbindet die entstandene Plattform über den Co-Simulationsmaster die Ebene des Gegenstands (Asset) mit der Ebene der Kommunikation. Eingeschlossen wird selbstverständlich die Ebene der Integration, welche zwischen den beiden genannten Ebenen angesiedelt ist. Grundsätzlich wird die Ebene der Geschäftsprozesse nicht betrachtet, weshalb sich an dieser Stelle kein Gegenüber finden lässt.

Das Asset bzw. den Gegenstand bilden einerseits das geometrische, physikalische Modell der Anlage, andererseits die funktionalen Komponentenmodelle der Komponenten des Infrastrukturnetzwerks. Auf dieser Ebene werden mit den jeweiligen Komponenten – in der Anlage wurden diese zur Abgrenzung als Zellen bezeichnet – und der gesamten APA verschiedene Hierarchieebenen innerhalb von RAMI 4.0 berührt. Die entstehende Leiterplatte ist das Produkt, während HMI und die virtuelle Steuerung die im

Bild 67 genannte Steuerungseinheit bilden. Jede einzelne Apparatur, die benutzt wird, ist eine einzelne Station oder eine Maschine, während die gesamte Anlage die technische Anlage bildet. Betrachtet man den Gleichstromkreis, so kann dieser einerseits nur die eine APA, also die technische Anlage überspannen und mit Energie versorgen, andererseits ist es theoretisch möglich, das gesamte Unternehmen zu berücksichtigen.

Entlang der Architekturachse folgt nach dem Asset die Ebene der Integration. Die Integration wird mittels Python als Programmiersprache umgesetzt. Damit wird der OPC UA-Server erstellt und die Kommunikation mit den -Clients sichergestellt. Damit wird bereits deutlich, dass die folgende Ebene der Kommunikation mittels OPC UA umgesetzt wird. OPC UA wird jedoch nicht nur in der Ebene der Kommunikation auf der Architektur-Achse, sondern ebenso auf allen Ebenen der Hierarchie-Achse eingeordnet, denn OPC UA wird ausgehend von den einzelnen Sensoren bis zur fabrikübergreifenden Kommunikation angewendet. Außerdem wird OPC UA sowohl für die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten als auch für deren Anbindung an übergeordnete Ebenen verwendet, was eine Verortung in der Ebene der Integration rechtfertigt. [127] Die Kommunikations-Ebene leitet die Ereignisse, welche beispielsweise durch Sensoren ausgelöst werden, weiter. Hierzu sind einheitliche Datenformate und Protokolle definiert. Alle diese gestellten Anforderungen werden durch die Nutzung von Variablen und Signalen erfüllt. In der Ebene der Information werden die Operationen und ggf. Regeln für die Steuerung definiert. Im erstellten Simulationsmodell wird das im MCD implementiert und dann mittels Anwenderprogramm in die virtuelle Steuerung übertragen. Sämtliche Daten werden konsistent entlang der vorher definierten Kriterien gespeichert. Folglich werden alle notwendigen Daten der Assets mittels der Informations-Ebene repräsentiert. Im vorliegenden Simulationsmodell sind das alle Variablen, die für den Prozess und das Energiemanagement notwendig sind. Weiterhin sind hier die Daten der integrierten Sensoren, sowohl seitens des Prozesses wie beispielsweise an den Übergabeplätzen oder in den Greiferzangen, als auch seitens des Netzwerks mit der Peripherie, wie z. B. der Ladezustand des Akkumulators abgelegt. Aus diesen Daten werden anschließend innerhalb der Funktions-Ebene Prozessfunktionen gebildet. Die Funktionen werden entweder über das Anwenderprogramm in der Instanz der virtuellen Steuerung gebildet oder noch im MDC über die Laufzeitvariablen angelegt. Mittels des Anwenderprogramms werden Werte auf die Variablen geschrieben und diese somit geändert. Das geschieht in der verteilten Simulation über die virtuelle Steuerung, Methoden in Plant Simulation und Operationen, insbesondere für die Pfade des IR,

im MCD. Die Funktions-Ebene ist auch diejenige, an welcher der Zugriff zur Überwachung realisiert wird. Überwacht werden die Variablen und Zustände der verteilten Simulation über das HMI oder über den Inspector im MCD oder durch die online-Verbindung im TIA-Portal.

Die letzte Achse, die betrachtet werden soll, ist die Achse des Lebenszyklus und der Wertschöpfung. Auf dieser Achse liegen Typ und Instanz. Als Typ werden die Schritte Entwicklung und Nutzung bzw. Wartung eingeordnet. In den Typ lässt sich das vorliegende Simulationsmodell einordnen, denn das Simulationsmodell entsteht während der Entwicklung der APA sowohl für die Abbildung des Peripherienetzwerks als auch für das Modell des Prozesses und dessen Ablaufs. Die verteilte Simulationsplattform und das darin entstandene Modell kann durch das Einbringen realer Anlagendaten über die Entwicklung hinaus betriebsbegleitend oder für die Wartung der APA eingesetzt werden. Auf diese Weise ist auch die Einordnung in die Achse des Lebenszyklus möglich.

Insgesamt ist so gezeigt, dass sich das Simulationsmodell und damit die entwickelte Simulationsplattform in das RAMI 4.0 einordnen lässt. Somit begegnet die Entwicklung den Herausforderungen von Industrie 4.0 und erfüllt die gestellten Anforderungen.

Mit diesem Abschnitt der Validierung ist die Erstellung des Simulationsmodells endgültig abgeschlossen. Dabei wurden neben der in der Simulationsthematik vorgesehenen Verifikation und Validierung weitere Aspekte evaluiert, so dass eine ganzheitliche Beurteilung vorgenommen werden konnte. Es konnte gezeigt werden, dass eine Überprüfung zur Feststellung der Effizienz des vorliegenden Energienetzes, valide möglich ist. Ferner ist damit die gestellte Forschungsfrage, ob es möglich ist, mit Hilfe der Simulation darzustellen, ob ein konkretes Energieversorgungsnetz für diesen Anwendungsfall effizient ist, positiv zu beantworten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Als Motivation zur vorliegenden Arbeit wurde die These formuliert, dass zukünftig immer mehr produzierende Betriebe eine weitgehend autarke Energieversorgung für einzelne Anlagen oder auch gesamte Fabrikhallen etablieren werden, da Energieversorgung durch Netzbetreiber teuer ist. Außerdem gibt es die Strategie der Bundesregierung, in Deutschland mehr erneuerbare Energiequellen zu nutzen. Dies gilt einerseits für Privathaushalte und andererseits für Großverbraucher wie die Industrie. Aus diesem Grund soll Energie dort erzeugt werden, wo sie verbraucht wird und möglichst effizient genutzt werden. In diesem Zug spielt die Umstellung der Fabrik auf Gleichstrom eine wesentliche Rolle, da viele Verbraucher mit Gleichstrom funktionieren und Verluste durch Wandlung vermieden werden. Weiterhin ist die Einbindung von Energiequellen und -speichern in ein Gleichstromnetz einfacher und effizienter. Selbstverständlich sollen Produktionssysteme zukünftig der vierten industriellen Revolution gerecht werden und vernetzt agieren sowie teilweise automatisiert Entscheidungen treffen oder sogar autonom produzieren. Eine Absicherung der Anlagen geschieht bereits im Stand der Technik durch vorherige Simulation und virtuelle Inbetriebnahme des Anwenderprogramms und des Managements in den Anlagen. Dies betrifft nach momentanem Stand die Prozessebene. Die ablaufenden Prozesse und die zugehörige Steuerung sind durch Simulation und die virtuelle Inbetriebnahme am Ende der Produktentwicklung vollständig getestet, so dass eine Inbetriebnahme beim Kunden einfach möglich ist. Die technischen Anlagen werden jedoch mit den steigenden Anforderungen immer komplexer. Damit wird es erforderlich, automatisierte Produktionsanlagen nicht nur in den einzelnen Entwicklungsdisziplinen, wie sie im V-Modell zu erkennen sind, virtuell abzusichern, sondern das Verhalten aller Elemente eines Gesamtsystems und die untereinander und im Zusammenspiel auftretenden Wechselwirkungen ganzheitlich zu betrachten. Im Stand der Technik wird weiterhin gezeigt, dass für die Simulation in der Produktion auf Prozess-, Zellen-, Anlagen- und Werksebene verschiedene Verfahren bestehen, die jeweils für einen anderen Detaillierungsgrad eingesetzt werden. In der vorliegenden Arbeit wird das gesamte Verhalten einer automatisierten Produktionsanlage ganzheitlich über die unterschiedlichen Ebenen hinweg untersucht. Aus diesem Grund müssen die Teilmodelle, welche in verschiedenen Simulatoren abgebildet werden, in einer Gesamtsimulation gekoppelt werden.

Ein probates Mittel, um dieser Problemstellung zu begegnen, stellt die gekoppelte, verteilte Simulation dar. Dabei existieren verschiedene Ansätze für die verteilte Simulation. Am aussichtsreichen zur Bearbeitung der vorliegenden Aufgabe schien eine Co-Simulation mit einer Werkzeugkopplung. In diesem Fall werden die verschiedenen Teilsysteme in unterschiedlichen, für die Aufgabe passenden Werkzeugen modelliert, simuliert und über eine Anwendung gekoppelt. Für eine solche Kopplung gibt es verschiedene Kommunikationsmöglichkeiten, die auf neutralen Standards aufbauen. Das standardisierte Kommunikationsprotokoll OPC UA bietet insbesondere den Vorteil, dass es Anwendung bei einer Vielzahl von Herstellern für Automatisierungs- und Simulationslösungen findet. Ein solches Vorgehen wird zur Beantwortung der Forschungsfrage benötigt, da es sich bei der Simulation eines Produktionsprozesses um eine andere Art handelt als bei der Simulation von Energienetzen üblich ist. Um eine ganzheitliche Material- und Energieflusssimulation zu erstellen, müssen beide Arten miteinander gekoppelt werden. Ziel dieser Arbeit ist es, mittels Simulation zu beurteilen, ob ein erstelltes Gleichstromnetz zur Versorgung einer APA effizient ist. Letztendlich soll ein vollständiges, digitales Abbild der Anlage geschaffen werden. Dabei soll keine vollständig neue und andere Simulationsumgebung entwickelt werden, sondern gängige Simulations- und Entwicklungswerkzeuge kombiniert werden, um die gesamte Simulation mit möglichst wenig Aufwand zu erstellen und zu nutzen. Dazu wurde im Abschnitt 2 dieser Arbeit zunächst der Stand der Technik zu Produktionsanlagen, der Simulation und der virtuellen Inbetriebnahme behandelt, da hier die Grundlagen für eine ganzheitliche Simulation gelegt werden. Außerdem ist es von Bedeutung, zu definieren, um welche Art von Produktionssystem es sich in der beispielhaft betrachteten APA handelt. In diesem Zuge wurde auch das verwendete Vorgehensmodell aufgezeigt und erläutert, und es wurden verschiedene, bereits existierende Arten der verteilten Simulation aufgezeigt. Daraus wurde die Art, welche am besten zur zu bearbeitenden Aufgabe passt, ausgewählt. Der folgende Abschnitt 3 beschäftigt sich mit den Grundlagen der Energieversorgung durch erneuerbare Energiequellen und der Nutzung von Gleichstrom in der Industrie. Dabei wurde aus diversen Ansätzen eine eigene Definition für ein Smart Grid entwickelt, die dem erstellten Gleichstromkreis zugrunde liegt. Daraus entstand der Aufbau der Peripherie zur Stromversorgung mit PV-Anlage, einem Akkumulator und dem Versorgungsnetz. Weiterhin wurden im selben Abschnitt Preismodelle für Industriekunden mit den Energieversorgern definiert, welche als Basis für Kosteneffizienz in das Energiemanagement aufgenommen wurden. Nach diesem Abschnitt erfolgte die Erstellung der verteilten,

ganzheitlichen Simulationsumgebung nach der vorgeschlagenen Entwicklungsmethodik. Zu Beginn wurde definiert, welche Ziele mit der Simulation verfolgt werden, so dass diese schließlich mittels Test- und Validierungsaufgaben geprüft werden können. So wurde der Untersuchungsgegenstand im Rahmen der Systemanalyse näher betrachtet. Auf Grundlage der Systemanalyse wurden die zu nutzenden Simulationswerkzeuge definiert und gegen andere abgegrenzt. Für die Definition des Energieflusses und des Netzwerks der Peripherie zur Energieversorgung wurden verschiedene Möglichkeiten verfolgt und beispielhaft in der Simulation genutzt. Im Abschnitt 5 wurde letztendlich die aus den Vorüberlegungen entstandene Plattform der verteilten Simulation für beschriebene Aufgabe genutzt, und gezeigt, dass die definierte Energieversorgung für die ausgewählte APA effizient ist. Für die Kommunikation über die Koppelsignale wurde – wie bereits erwähnt – der Kommunikationsstandard OPC UA genutzt, für die virtuelle Inbetriebnahme des gesamten Anwenderprogramms die vorgesehene Schnittstelle zwischen Plant Simulation bzw. dem MCD und der virtuellen Steuerung. Es handelt sich dabei um die Abbildung der realen Kommunikation über einen Feldbus. Als zentraler Aspekt wurde für den Co-Simulationsmaster, den Taktgeber für die einzelnen Simulationswerkzeuge, ein Mechanismus zur Synchronisation entworfen und im dafür ausgewählten Werkzeug, Plant Simulation, als eine Methode umgesetzt. Damit war es möglich, eine Umgebung für eine taktsynchrone, parallel ablaufende Simulation zu schaffen. Zur Umsetzung wurden die Modelle in den jeweiligen Werkzeugen erstellt und eine multiphysikalische, eine kontinuierliche und eine ereignisdiskrete Simulation aufgebaut. Weiterhin wurden eine Instanz einer virtuellen Steuerung zur Simulation des Anwenderprogramms und ein OPC UA-Server etabliert. Mittels der Plattform wurde die Simulation für die APA gestartet und hinsichtlich der Anwendungsfälle und der zu beantwortenden Fragen validiert; anschließend wurde die entstandene Plattform kritisch evaluiert. Dabei wurde deutlich, dass Vereinfachungen vorgenommen wurden, welche die Ergebnisse in geringem Umfang verfälschen. Solche sind aber notwendig, um die Simulation lauffähig zu halten und die Machbarkeit zu zeigen. Es wurden Vorschläge genannt, die in den Blick genommen werden können, um noch realitätsgetreuere Ergebnisse zu erzielen. Darin lässt sich auch weiterer Forschungsbedarf begründen. Denn für eine noch bessere und aussagekräftigere Simulation, welche auch als Auslegungswerkzeug für Gleisstromkreise zur autarken Energieversorgung von Produktionsstätten und -anlagen angewandt werden kann, müssen die Komponenten für das Energiemanagement in ihrem Verhalten exakter modelliert werden. Hierfür sind tiefes elektrotechni-

sches Verständnis und das Wissen um den Einbau der Komponenten erforderlich. Weiterhin ist es notwendig, Grenzen und Restriktionen für den Einbau und der Kombination dieser Komponenten abzubilden und ein Verstoß dagegen anzuzeigen. Weiterhin sind die Daten für die PV-Anlage nicht aussagekräftig für einen längeren Simulationszeitraum. Um das zu verbessern, könnte eine synthetisch generierte Datenbasis herangezogen oder das Zufallsprinzip für die Auswahl vordefinierter Tage genutzt werden. Vermutlich werden auch performantere Hardwarekomponenten auf den Markt kommen und flächendeckend genutzt werden. Dies stellt neben der Verteilung der Simulatoren auf unterschiedliche Computer einen vielversprechenden Ansatz zur Erhöhung der Performanz dar. Damit kann das Simulationsmodell um diverse Aspekte erweitert werden. Dies wird im Rahmen der fortschreitenden Digitalisierung und der zunehmenden Bedeutung von virtueller Validierung während der Produktentstehungsprozesses und der betriebsbegleitenden Simulation eine immer größere Relevanz erhalten.

8 Summary and outlook

The motivation for this research was the thesis that in the future more and more manufacturing companies will establish their own self-sufficient energy supply for individual plants or even entire factories, as energy supply by grid operators is expensive. In addition, there is a strategy of the federal government in Germany to use more renewable energy sources. On the one hand, this applies to the energy supply for the general public, but on the other hand, it also applies to private households and large consumers such as industry. For this reason, energy should be generated where it is consumed and used as efficiently as possible. In this context, the conversion of the factory to direct current plays an essential role since many consumers operate with direct current and losses due to conversion are avoided. Furthermore, it is easier and more efficient to integrate energy sources and storage into a direct current network. Of course, production systems will have to meet the requirements of the fourth industrial revolution in the future and act in a networked manner, as well as make partially automated decisions or even produce autonomously. The systems are already secured in the state of the art through prior simulation and virtual commissioning of the user code and the management in the systems. According to the current state of the art, this applies to the process level. The running processes and the associated control are fully tested by simulation and VIBN at the end of product development, so that commissioning at the customer's site is possible without any challenges. However, the technical systems are becoming more and more complex as the challenges and requirements increase. This makes it necessary to not only virtually validate APA in the individual development disciplines, as can be seen in the V-model, but to holistically consider the behavior of all elements of an overall system and the interactions that occur with each other and in interaction. The state of the art also shows that there are different methods for simulating production at the process, cell, plant, and factory level, each of which is used for a different level of detail. In the present work, the overall behavior of an automated production plant is to be investigated holistically across the different levels. For this reason, the partial models, which are represented in different simulators, must be coupled in an overall simulation. An effective means of addressing this problem is the coupled, distributed simulation. There are various approaches for distributed simulation. A co-simulation with a tool coupling seemed to be the most promising one for dealing with the task at hand. In this case, the different subsystems are modelled and

simulated in different tools suitable for the task and coupled via an application. There are various communication options for such a coupling, which are based on neutral standards. The standardized communication protocol OPC UA offers the advantage that it is used by many manufacturers for automation and simulation solutions. Such an approach is needed to answer the research question, since the simulation of a production process is of a different nature than the simulation of energy networks usually is. To create a holistic material and energy flow simulation, both types must be coupled. The aim of this work is to use simulation to assess whether a created DC network is efficient for supplying an APA. Ultimately, a complete digital image of the system is to be created. The aim is not to develop a completely new and different simulation environment, but to combine common simulation and development tools to create and use the entire simulation with as little effort as possible. To this end, section 2 of this thesis first dealt with the state of the art of production plants, simulation, and virtual commissioning, as this is where the foundations for a holistic simulation are laid. It is also important to define what type of production system is involved in the APA considered as an example. In the course of this, the procedure model used was also shown and explained, and various existing types of distributed simulation were pointed out. From these, the type best suited to the task at hand was selected.

The following section 3 deals with the basics of energy supply through renewable energy sources and the use of direct current in industry. In the process, a separate definition for a smart grid was developed from various approaches, which forms the basis of the DC circuit created. This resulted in the construction of the periphery for power supply with a PV system, an accumulator and, logically, the supply network. Furthermore, in the same section, price models for industrial customers were defined with the energy suppliers, which were included in the energy management as a basis for cost efficiency. After this section, the distributed, holistic simulation environment was created according to the proposed development methodology. At the beginning, it was defined which goals were to be pursued with the simulation, so that these could finally be checked by means of testing and validation tasks. Thus, the object of investigation was examined more closely within the framework of the system analysis. Based on the system analysis, the simulation tools to be used were defined and differentiated from others. For the definition of the energy flow and the network of the periphery for the energy supply, different possibilities were pursued and used as examples in the simulation. In section 5, the platform of distributed simulation resulting from the preliminary considerations was finally used

for the described task and it was shown that the defined energy supply is efficient for the selected APA. As already mentioned, the OPC UA communication standard is used for communication via the coupling signals. For the virtual commissioning of the entire code, the interface provided between Plant Simulation or the MCD and the virtual controller is used. This is a representation of the real communication via a field bus. As a central aspect, a mechanism for synchronization was developed for the orchestrator, the clock generator for the individual simulation tools, and implemented as a method in the selected tool, Plant Simulation. This made it possible to create an environment for a synchronous, parallel simulation. For the implementation, the models were created in the respective tools and a multi-physical, a continuous and a discrete-event simulation was set up. Furthermore, an instance of a virtual controller for the simulation of the code and an OPC UA server were established. The simulation for the APA was started using the platform and validated regarding the use cases and the questions to be answered; the resulting platform was then critically evaluated. It became clear that simplifications were made which falsify the results. However, such simplifications are necessary to keep the simulation executable and to demonstrate its feasibility. Suggestions were made that could be considered to achieve even more realistic results. This is also the basis for the need for further research. For an even better and more meaningful simulation, which can also be used as a design tool for track circuits for the self-sufficient energy supply of production facilities and plants, the components for energy management must be modelled more precisely in their behavior. This requires in-depth electrotechnical understanding and knowledge of the installation of the components. Furthermore, it is necessary to map limits and restrictions for the installation and combination of these components and to indicate any violation of these limits. Furthermore, the data for the PV system is not meaningful for a longer simulation period. To improve this, a synthetically generated database could be used, or the random principle could be used to select predefined days. Presumably, higher-performance hardware components will also come onto the market and be used across the board. In addition to the distribution of simulators on different computers, this represents a promising approach to increasing performance. In this way, the simulation model can be extended to include inverse aspects. This will become increasingly relevant in the context of advancing digitalization and the growing importance of virtual validation during the product development process and the simulation accompanying the production process.

Literaturverzeichnis

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE. *Digitale Transformation in der Industrie* [online]. 2023 [Zugriff am: 15. März 2023]. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/industrie-40.html>
- [2] EIGNER, M. Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung auf einer Plattform für System Lifecycle Management. In: U. SENDLER, Hg. *Industrie 4.0*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 91-110. ISBN 978-3-642-36916-2
- [3] LUDMANN, F., K. HOFFMANN und T. SCHREIBER. *MHP-Studie: Industrie 4.0* [online]. *Barometer* 2023, 2023 [Zugriff am: 15. März 2023]. Verfügbar unter: https://www.mhp.com/fileadmin/www.mhp.com/downloads/studien/MHPStudie_Industrie_4.0_Barometer_2023_DE.pdf
- [4] SCHEIFELE, C. *Plattform zur Echtzeit-Co-Simulation für die virtuelle Inbetriebnahme*. Diss., 2019. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2019. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. Band 95. ISBN 978-3-8396-1534-8
- [5] HÄNEL, A., T. SCHNELHARDT, E. WENKLER, A. NESTLER, A. BROSIUS, C. CORINTH, A. FAY und S. IHLENFELDT. The development of a digital twin for machining processes for the application in aerospace industry [online]. *Procedia CIRP*, 2020, **93**, S. 1399-1404. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.procir.2020.04.017](https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.017)
- [6] EUROPÄISCHE KOMMISSION. *Klima- und energiepolitischer Rahmen bis 2030* [online], 2023 [Zugriff am: 15. März 2023]. Verfügbar unter: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_de#ref-2030-climate-and-energy-framework---existing-ambition
- [7] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE. *Die Energie der Zukunft* [online]. 8. *Monitoring-Bericht zur Energiewende*. Berichtsjahre 2018 und 2019, 2021 [Zugriff am: 15. März 2023]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/achter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft.pdf?__blob=publicationFile&v=32

- [8] WECKMANN, S. *Dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung der Produktion*. Diss., 2023. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2023. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. 116. ISBN 978-3-8396-1660-4
- [9] UNTERBERGER, E. *Methodik zur Gestaltung energieflexibler Produktionssysteme*. München: utzverlag GmbH, 2021. Forschungsberichte IWB. 364. ISBN 978-3-8316-4920-4
- [10] STAWOWY, G. *Gleichstrom: Die Revolution beginnt*. München: publish industry verlag. Die Macher der Elektronikwelt. 16
- [11] SAUER, O., M. SCHLEIPEN und C. AMMERMAN. Digitaler Fabrikbetrieb. In: G. ZÜLCH und P. STOCK, Hg. *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*. Karlsruhe, 7. und 8. Oktober 2010 = *Integration aspects of simulation: equipment, organization and personnel*. Karlsruhe: KIT Scientific Publ, 2010, S. 559-566. ISBN 978-3-86644-558-1
- [12] Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2206: 2021-11: 2021-11, *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [13] LANGE, J., T.J. BURKE und F. IWANITZ. *OPC. Von Data Access bis Unified Architecture*. 5., durchges. Aufl. Berlin: VDE Verlag, 2014. ISBN 978-3800735068
- [14] MAHNKE, W., S.-H. LEITNER und M. DAMM. *OPC unified architecture*: Springer Science & Business Media, 2009
- [15] OPC FOUNDATION. *OPC Factory Server* [online]. 2. Dezember 2021 [Zugriff am: 2. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <https://opcfoundation.org/members>
- [16] DIN, *SPEC 91345:2016-04, Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [17] HEIDEL, R. und F. ELMAS. *Industrie4.0 Basiswissen RAMI4.0. Referenzarchitekturmodell mit Industrie4.0-Komponente*. Berlin: Beuth Verlag GmbH; VDE Verlag GmbH, 2017. ISBN 3410264825
- [18] GERBER, S. und D. AHMAD. Algorithmische Produktion: Framework für den Shopfloor der Zukunft [online]. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2021, 116(6), S. 410-412. ISSN 0947-0085. Verfügbar unter: doi:10.1515/zwf-2021-0087

- [19] SIEPERMANN, C., Hg. *Logistik - gestern, heute, morgen. Festschrift für Richard Vahrenkamp zur Vollendung des 65. Lebensjahres*. Berlin: GITO, 2011. ISBN 9783942183444
- [20] Verein Deutscher Ingenieure e.V. 3633:2018-05: 2018-05, *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [21] BRACHT, U., D. GECKLER und S. WENZEL, Hg. *Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2018. VDI-Buch. ISBN 978-3-662-55782-2
- [22] WENZEL, S., M. WEIß, S. COLLISI-BÖHMER, H. PITSCH und O. ROSE. *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-35272-3
- [23] GUTENSCHWAGER, K., M. RABE, S. SPIECKERMANN und S. WENZEL. *Simulation in Produktion und Logistik. Grundlagen und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017. ISBN 978-3-662-55744-0
- [24] HESSE, S. *Taschenbuch Robotik, 2. Auflage*. 2. Auflage. München: CARL HANSER Verlag GMBH & Co., 2016. ISBN 9783446443655
- [25] RUDOLF, S. und SCHREY ELISABETH. Product Lifecycle Management. Herausforderungen einer ganzheitlichen It-Unterstützung der Geschäftsprozesse. In: SCHUH & CO. GMBH, Hg. *Complexity Management Journal*, 2015, S. 8-12
- [26] LAW, A.M. *Simulation Modelling and Analysis*. 2nd: McGraw. ISBN 0-07-100803-9
- [27] MÄRZ, L., W. KRUG, O. ROSE und G. WEIGERT. *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-14535-3
- [28] BUCHHOLZ, P. *Modellgestützte Analyse und Optimierung*, 2006
- [29] WESTKÄMPER, E. *Einführung in die Organisation der Produktion*. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. Springer-Lehrbuch. ISBN 3-540-30764-8
- [30] HEDTSTÜCK, U. *Simulation diskreter Prozesse. Methoden und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-34871-6

- [31] TEMPELMEIER, H. *Modellierung logistischer Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN 978-3-662-57770-7
- [32] DONHAUSER, T. *Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation*. Diss., 2020. Erlangen: FAU University Press, 2020. Studien aus dem Maschinenbau. 346. ISBN 978-3-96147-317-5
- [33] BRÖKELMANN, J. *Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen*. Münster: Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG, 2015. Verlagsschriftenreihe des Heinz-Nixdorf-Instituts. 344
- [34] PRISKER, A.A.B. *Introduction to simulation and slamII*. 4^a ed. New York: John Wiley & Sons Limited, 1994. ISBN 978-0470234570
- [35] REGGELIN, T., S. LANG, C. SCHAUF und D. WEIGERT. Meso-skopische Simulationsmodelle in der Produktions- und Logistikplanung. In: S. WENZEL und T. PETER, Hg. *Simulation in Produktion und Logistik 2017*. Kassel: Kassel University Press GmbH, 2017, S. 199-208. ISBN 978-3-7376-0192-4
- [36] BURR, H. *Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau*. Saarbrücken: LFT, Univ, 2007. Schriftenreihe Produktionstechnik. Bd. 43. ISBN 9783930429721
- [37] DRONKA, S. *Die Simulation gekoppelter Mehrkörper- und Hydraulik-Modelle mit Erweiterung für Echtzeitsimulation*. Diss., 2004. Aachen: Shaker Verlag, 2004. Berichte aus der Fahrzeugtechnik. ISBN 3832229809
- [38] GEIMER, M., T. KRÜGER und LINSEL. P. Co-Simulation, gekoppelte Simulation oder Simulatorkopplung? Ein Versuch der Begriffsvereinheitlichung [online], 2006. Verfügbar unter: doi:10.5445/IR/1000011318
- [39] GÜNTHER, F.C. *Beitrag zur Co-Simulation in der Gesamtsystementwicklung des Kraftfahrzeugs*. Diss., 2017. München, 2017
- [40] VÖLKER, L. *Untersuchung des Kommunikationsintervalls bei der gekoppelten Simulation*: KIT Scientific Publishing, 2011. ISBN 9783866446113

- [41] DOBMANN, M., Hg. *Kostenoptimale Auslegung von thermischen Eigenschaften in Elektrofahrzeugen*. Wiesbaden: Springer, 2018. AutoUni – Schriftenreihe. 131. ISBN 978-3-658-23848-3
- [42] VAN NGUYEN, Y. BESANGER, Q. TRAN und T. NGUYEN. On Conceptual Structuration and Coupling Methods of Co-Simulation Frameworks in Cyber-Physical Energy System Validation [online]. *Energies*, 2017, **10**(12), S. 1977. Verfügbar unter: doi:10.3390/en10121977
- [43] MILAN, H. *Coordinated Execution of Multiple Process and Automation Simulators*. Master's thesis. Aalto, 2020
- [44] *Functional Mock-up Interface* [online]. 12 September 2021 [Zugriff am: 19. Oktober 2021]. Verfügbar unter: <https://fmi-standard.org/>
- [45] JUNG, T., N. JAZDI und M. WEYRICH. Dynamische Co-Simulation von Automatisierungssystemen und ihren Komponenten im Internet der Dinge. In: *Automation 2018*: VDI Verlag, 2018, S. 745-758. ISBN 9783181023303
- [46] BLOCKWITZ, T., M. OTTER, J. AKESSON, M. ARNOLD, C. CLAUß, H. ELMQVIST, M. FRIEDRICH, A. JUNGHANN, J. MAUSS, D. NEUMERKEL, H. OLSSON und A. VIEL. Functional Mockup Interface 2.0: The Standard for Tool independent Exchange of Simulation Models. In: *Proceedings*, 2012
- [47] OPPELT, M., G. WOLF und L. URBAS. Capability-analysis of co-simulation approaches for process industries. In: *2014 IEEE [International Conference on] Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2014)*. Barcelona, Spain, 16 - 19 September 2014. Piscataway, NJ: IEEE, 2014, S. 1-4. ISBN 978-1-4799-4845-1
- [48] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS und IEEE-SA STANDARDS BOARD. *IEEE standard for modeling and simulation (M & S) high level architecture (HLA). Framework and rules*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. ISBN 978-0-7381-6251-5
- [49] SCHMERTOSCH, T. und M. KRABBES. Modulare Automatisierung in der Praxis. In: T. SCHMERTOSCH und M. KRABBES, Hg. *Automatisierung 4.0*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2018, S. 151-236. ISBN 978-3-446-45220-6
- [50] JASPERNEITE, J. und V. LOHWEG, Hg. *Kommunikation und Bildverarbeitung in der Automation*. Berlin, Heidelberg: Springer

- Berlin Heidelberg, 2020. Technologien für die intelligente Automation. 12. ISBN 978-3-662-59894-8
- [51] HENSEL, S., M. GRAUBE, L. URBAS, T. HEINZERLING und M. OPPELT. Co-simulation with OPC UA. In: *2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*: IEEE, 19. Juli 2016 - 21. Juli 2016, S. 20-25. ISBN 978-1-5090-2870-2
- [52] BLESL, M. und A. KESSLER. *Energieeffizienz in der Industrie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer Vieweg, 2013. ISBN 978-3-642-36514-0
- [53] MARENBACH, R., J. JÄGER und D. NELLES. *Elektrische Energietechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. ISBN 978-3-658-29491-5
- [54] BLESL, M. und A. KESSLER. *Energieeffizienz in der Industrie*. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2017. ISBN 9783662559987
- [55] AUSTERMANN, J. und H. STAMMBERGER. *Systemkonzept DC-Industrie 2* [online]. 12 Juni 2023 [Zugriff am: 6. November 2023]. Verfügbar unter: <https://dc-industrie.zvei.org/publikationen/systemkonzept-fuer-dc-industrie2>
- [56] SIEBERT, A., A. TROEDSON und S. EBNER. AC to DC power conversion now and in the future [online]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, **38**(4), S. 934-940. ISSN 0093-9994. Verfügbar unter: doi:10.1109/TIA.2002.800570
- [57] BERNSTEIN, H. und B. KAINKA. *Grundwissen Elektronik: Die Grundlagen für Hobby, Ausbildung und Beruf*: Franzis Verlag, 2013. ISBN 9783645650724
- [58] SCHÖNITZER, M.F. *Physikalische Grundlagen der Energieübertragung mit Gleich- und Wechselstrom hoher Spannung*, 2012
- [59] KÜCHLER, A. *Hochspannungstechnik. Grundlagen - Technologie - Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. ISBN 978-3-540-78412-8
- [60] MENZ, B. *Methode zur digitalen Vernetzung von Produktionsmaschinen zur Lastgangglättung im Betrieb*. Aachen: Shaker Verlag, 2017. Schriftenreihe des PTW: „Innovation Fertigungstechnik“. ISBN 978-3-8440-5277-0

- [61] SCHWAB, A.J. *Elektroenergiesysteme. Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*. 5. Auflage. Berlin, Germany: Springer Vieweg, 2017. ISBN 9783662553152
- [62] HEUMANN, K. *Grundlagen der Leistungselektronik. Mit 32 Tabellen*. 6., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Teubner, 1996. Teubner-Studienbücher: Elektrotechnik. ISBN 9783519061106
- [63] FLOSDORFF, R. und G. HILGARTH. *Elektrische Energieverteilung*. 7., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2000. ISBN 9783663099062
- [64] SIEMENS AG. *Planung der elektrischen Energieverteilung. Technische Grundlagen*. Berlin, 2018. ISBN EMMS-T10007-00
- [65] BUSCH, R. *Elektrotechnik und Elektronik. Für Maschinenbauer und Verfahrenstechniker*. 7., überarb. Aufl. 2015. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. Springer eBook Collection. ISBN 9783658096755
- [66] PELLICCIARI, M., A. AVOTINS, K. BENGTSSON, G. BERSELLI, N. BEY, B. LENNARTSON und D. MEIKE. AREUS — Innovative hardware and software for sustainable industrial robotics. In: *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2015, S. 1325-1332
- [67] BARAN, M.E. und N.R. MAHAJAN. DC distribution for industrial systems: opportunities and challenges [online]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, **39**(6), S. 1596-1601. ISSN 0093-9994. Verfügbar unter: doi:10.1109/TIA.2003.818969
- [68] SIMON, K.-P. *Forschungsprojekt DC-INDUSTRIE: Gleichspannungsnetze in der industriellen Produktion* [online]. September 2017 [Zugriff am: 9. Juli 2024]. Verfügbar unter: https://dc-industrie.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2017/September/DC_Industrie_Gleichspannungsnetze_in_der_industriellen_Produktion/DC_Industrie_Gleichspannungsnetze_in_der_industriellen_Produktion_Download_14.09.17.pdf
- [69] SAUER, A., Hg. *Die Gleichstromfabrik. Energieeffizient. Robust. Zukunftsweisend*. München: Hanser, Carl, 2020. ISBN 978-3-446-46581-7

- [70] WEISS, R., L. OTT und U. BOEKE. Energy efficient low-voltage DC-grids for commercial buildings. In: *2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*: IEEE, 2015, S. 154-158. ISBN 978-1-4799-9880-7
- [71] KUHLMANN, T., D.A. SCHAAAB und A. SAUER. Wie die Gleichstromfabrik real wird [online]. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2022, **117**(1-2), S. 35-40. ISSN 0947-0085. Verfügbar unter: doi:10.1515/zwf-2022-1003
- [72] MOBARREZ, M., D. FREGOSI, S. BHATTACHARYA und M.A. BAHMANI. Grounding architectures for enabling ground fault ride-through capability in DC microgrids. In: *2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, 2017, S. 81-87
- [73] SCHMOLKE, H. *Auswahl und Bemessung von Kabeln und Leitungen*. 7., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Hüthig, 2018. Reihe de-Kompakt. ISBN 978-3-8101-0474-8
- [74] KUHLMANN, T., D.A. SCHAAAB und A. SAUER. Unterwegs zur Gleichstromfabrik: der Transformationsprozess im industriellen Stromnetz [online]. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2020, **115**(11), S. 769-773. ISSN 0947-0085. Verfügbar unter: doi:10.3139/104.112456
- [75] EHLICH, M., J. AUSTERMANN, F. BLANK, H. BORCHERDING und B. WEIS. Systemkonzept eines fabrikinternen DC-Netzes. In: A. SAUER, Hg. *Die Gleichstromfabrik. Energieeffizient. Robust. Zukunftsweisend*. München: Hanser, Carl, 2020, S. 71-114. ISBN 978-3-446-46581-7
- [76] MEYER, C., S. SCHRODER und R.W. de DONCKER. Solid-state circuit breakers and current limiters for medium-voltage systems having distributed power systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, **19**(5), S. 1333-1340
- [77] HAUCAP, J. und J. MEINHOF. Die Strompreise der Zukunft [online]. *Wirtschaftsdienst*, 2022, **102**(S1), S. 53-60. Verfügbar unter: doi:10.1007/s10273-022-3175-7
- [78] GEILHAUSEN, M., J. BRÄNZEL, D. ENGELMANN und O. SCHULZE. *Energiemanagement. Für Fachkräfte, Beauftragte und Manager*. Aufl. 2015. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN 978-3-658-02834-3

- [79] MAIN-DONAU NETZGESELLSCHAFT. *Netznutzungsentgelte für Kunden mit registrierender Lastgangmessung*. Nürnberg, 2018
- [80] HANENKAMP, N., P. GESSNER und R. HENKEL. Realisierung eines digitalen Energieausweises für industrielle Erzeugnisse [online]. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2017, **112**(10), S. 695-698. ISSN 0947-0085. Verfügbar unter: doi:10.3139/104.111792
- [81] BODE, S. und H.-M. GROSCURTH. *Zur Wirkung des EEG auf den „Strompreis*. HWWA Discussion Paper. Hamburg: Hamburg Institute of International Economics (HWWA), 2006
- [82] PETERMANN, J.P.E. *Erfolgreiches Energiemanagement im Betrieb. Lehrbuch für Energiemanager und Energiefachwirte*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. ISBN 978-3-658-22479-0
- [83] APPELRATH, H.-J., Hg. *Future Energy Grid. Migrationspfade ins Internet der Energie*. Berlin: Springer, 2012. Acatech-Studie. ISBN 9783642278631
- [84] INTERESSENGEMEINSCHAFT ENERGIE UMWELT FEUERUNGEN GMBH, Hg. *Effiziente Systeme und erneuerbare Energien*. Köln: Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie e. V. (BDH), 2019
- [85] SERVATIUS, H.-G., U. SCHNEIDEWIND und D. ROHLFING, Hg. *Smart Energy. Wandel zu einem nachhaltigen Energiesystem*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 9783642218200
- [86] AICHELE, C., Hg. *Smart Market. Vom Smart Grid zum intelligenten Energiemarkt*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN 3658027770
- [87] HEROLD, G. *Elektrische Energieversorgung. Eine kleine Einführung*. Wilburgstetten: Schlembach, 2013. ISBN 9783935340762
- [88] SCHLABBACH, J. *Elektroenergieversorgung. Betriebsmittel, Netze, Kennzahlen und Auswirkungen der elektrischen Energieversorgung; mit CD-ROM*. 3. aktualisierte und erw. Aufl. Berlin: VDE-Verl., 2009. ISBN 9783800731084
- [89] BOLAY, S., J. FLECHTNER und C. OTTO. *Faktenpapier: Eigenerzeugung von Strom. Rahmenbedingungen | Trends | Beispiele*. Berlin, Hannover, 2014

- [90] ARBEITSGRUPPE ERNEUERBARE ENERGIEN-STATISTIK. *Erneuerbare Energien in Deutschland*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, März 2018. Hintergrund. März 2018
- [91] WEIßFLOCH, U., S. MÜLLER und A. JÄGER. *Wie grün ist Deutschlands Industrie wirklich? Verbreitung von Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energieträger im Verarbeitenden Gewerbe*. Mitteilungen aus der ISI-Erhebung - Modernisierung der Produktion. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2013
- [92] ARBEITSGRUPPE ERNEUERBARE ENERGIEN-STATISTIK. *Erneuerbare Energien in Deutschland* [online]. *Daten zur Entwicklung im Jahr 2022*, Februar 2023 [Zugriff am: 7. November 2023]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023-03-16_uba_hg_erneuerbareenergien_dt_bf.pdf
- [93] WATTER, H. *Regenerative Energiesysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022. ISBN 978-3-658-35867-9
- [94] SYNWOLDT, C. *Dezentrale Energieversorgung mit regenerativen Energien*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. ISBN 978-3-658-33732-2
- [95] QUASCHNING, V. *Erneuerbare Energien und Klimaschutz : Hintergründe - Techniken und Planung - Ökonomie und Ökologie - Energiewende*. 6. aktualisierte Auflage. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2021. ISBN 978-3-446-46867-2
- [96] MERTENS, K. *Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*. 6., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Hanser, 2022. ISBN 9783446474291
- [97] WATTER, H. *Nachhaltige Energiesysteme: Grundlagen, Systemtechnik und Anwendungsbeispiele aus der Praxis*: Springer-Verlag, 2009
- [98] KURZWEIL, P. *Angewandte Elektrochemie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. ISBN 978-3-658-32420-9
- [99] BORGEEST, K. *Elektronik in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. ISBN 978-3-658-23663-2

- [100] GLENNEBERG, J. *Untersuchungen zur Morphologie und Zusammensetzung von 0-3 Kompositdielektrika neuartiger Kondensatoren zur Energiespeicherung*, 2019
- [101] GRIJALVA, S. und M.U. TARIQ. Prosumer-based smart grid architecture enables a flat, sustainable electricity industry. In: *ISGT 2011*. IEEE, 2011, S. 1-6. ISBN 978-1-61284-218-9
- [102] MOMOH, J. *Smart Grid. Fundamentals of Design and Analysis*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2012. ISBN 978-0-470-88939-8
- [103] LUI, C.-C., S. MCARTHUR und S.-J. LEE, Hg. *Smart grid handbook*. Chichester: Wiley, 2016. ISBN 9781118755488
- [104] SERVATIUS, H.-G., U. SCHNEIDEWIND und D. ROHLFING, Hg. *Smart Energy. Wandel zu einem nachhaltigen Energiesystem*. Berlin: Springer, 2012. ISBN 9783642218194
- [105] GELLINGS, C.W. *The smart grid. Enabling energy efficiency and demand response*. Lilburn, GA: Fairmont Press; Taylor & Francis distribution, 2009. ISBN 0-88173-623-6
- [106] GHARAVI, H. und R. GHAFURIAN. Smart Grid: The Electric Energy System of the Future [Scanning the Issue] [online]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, **99**(6), S. 917-921. ISSN 0018-9219. Verfügbar unter: doi:10.1109/JPROC.2011.2124210
- [107] BEIER, J., S. THIEDE und C. HERRMANN. Increasing Energy Flexibility of Manufacturing Systems through Flexible Compressed Air Generation [online]. *Procedia CIRP*, 2015, **37**, S. 18-23. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2015.08.063
- [108] BEIER, J., B. NEEF, S. THIEDE und C. HERRMANN. Integrating on-site Renewable Electricity Generation into a Manufacturing System with Intermittent Battery Storage from Electric Vehicles [online]. *Procedia CIRP*, 2016, **48**, S. 483-488. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2016.04.057
- [109] STAHL, B., M. TAISCH, A. CANNATA, F. MÜLLER, S. THIEDE, C. HERRMANN, A. CATALDO und F.C. ANTONIO. Combined Energy, Material and Building Simulation for Green Factory Planning. In: A.Y.C. NEE, B. SONG und S.-K. ONG, Hg. *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*. Singapore: Springer Singapore, 2013, S. 493-498. ISBN 978-981-4451-47-5

- [110] STOLDT, J., A. SCHLEGEL, E. FRANZ, T. LANGER und M. PUTZ. Generic Energy-Enhancement Module for Consumption Analysis of Manufacturing Processes in Discrete Event Simulation. In: A.Y.C. NEE, B. SONG und S.-K. ONG, Hg. *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*. Singapore: Springer Singapore, 2013, S. 165-170. ISBN 978-981-4451-47-5
- [111] SCHLEGEL, A., J. STOLDT und M. PUTZ. Erweiterte Integration energetischer Betrachtungen in der Materialflusssimulation. Advanced integration of energetic consideration in discrete event simulation. In: W. DANGELMAIER, C. LAROQUE und A. KLAAS, Hg. *Simulation in Produktion und Logistik. Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung*. 15. ASIM Fachtagung; Paderborn, 09. - 11. Oktober 2013. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst. Univ. Paderborn, 2013, S. 187-196. ISBN 9783942647359
- [112] STOLDT, J., B. PRELL, A. SCHLEGEL und M. PUTZ. Modellierung von volatilen erneuerbaren Energieerzeugern und Energiespeichern in Siemens Plant Simulation. In: S. WENZEL und T. PETER, Hg. *Simulation in Produktion und Logistik 2017*. Kassel: kassel university press, 2017, S. 49-58. ISBN 978-3-7376-0192-4
- [113] PETERMANN, T., H. BRADKE, A. LÜLLMANN, M. PAETZSCH und U. RIEHM. *Was bei einem Blackout geschieht. Folgen eines langandauernden und großflächigen Stromausfalls*. Berlin: edition sigma, 2011. ISBN 978-3-8360-8133-7
- [114] WREDE, V. Sind die Rohstoffvorräte endlich oder begrenzt? In: V. WREDE, Hg. *Bergbau gleich Raubbau?* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, S. 125-130. ISBN 978-3-662-61940-7
- [115] PARYANTO, P. *Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems*, 2017
- [116] SOLDING, P., D. PETKU und N. MARDAN. Using simulation for more sustainable production systems – methodologies and case studies [online]. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2009, 2(2), S. 111-122. ISSN 1939-7038. Verfügbar unter: doi:10.1080/19397030902960994
- [117] THIEDE, S. *Energy efficiency in manufacturing systems*. Berlin: Springer, 2012. Sustainable production, life cycle engineering and management. ISBN 9783642259142

- [118] LACOUR, F.-F. *Modellbildung für die physikbasierte virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen*. München: Utz, 2012. Forschungsberichte IWB. Band 257. ISBN 978-3-8316-4162-8
- [119] PLENK, V., Hg. *Angewandte Netzwerktechnik kompakt*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. IT kompakt. ISBN 978-3-658-24522-1
- [120] MAUBACH, K.-D. *Energiewende. Wege zu einer bezahlbaren Energieversorgung*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer VS, 2014. ISBN 9783658054731
- [121] PUTZ, M., A. SCHLEGEL, S. LORENZ, E. FRANZ und S. SCHULZ. Gekoppelte Simulation von Material- und Energieflüssen in der Automobilfertigung. *Proceedings of the 14. Tage des Betriebs- und Systemingenieurs*, 2011, S. 135-144
- [122] BRAGARD, M., N. SOLTAU, S. THOMAS und R.W. de DONCKER. The Balance of Renewable Sources and User Demands in Grids: Power Electronics for Modular Battery Energy Storage Systems [online]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, 25(12), S. 3049-3056. ISSN 0885-8993. Verfügbar unter: doi:10.1109/TPEL.2010.2085455
- [123] ROTHACHER, T., H. SCHWARZBURGER und T. TIMKE. *Stromspeicher für Gewerbe und Industrie. Technik, Auswahl und Auslegung*. mit Anmerkungen für Heimspeicher. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH, 2018. Beuth Wissen. ISBN 9783410257554
- [124] BRIX, J. *Entwicklung eines verteilten Energiemanagementsystems*: Universität Stuttgart, 2015
- [125] KORTHAUER, R. *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-30652-5
- [126] WUNDER, B., L. OTT, J. KAISER, K. GOSSES, M. SCHULZ, F. FERSTERRA, M. MÄRZ, M. LAVERY und Y. HAN. Droop controlled cognitive power electronics for DC microgrids. In: *IEEE Industrial Electronics Society (Hg.) 2017 – Driving innovation in ICT energy*, S. 335-342
- [127] MEGOW, J. *Referenzarchitekturmodelle für Industrie 4.0, smart Manufacturing und IoT. Eine Einführung*. Berlin, 2020

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] RUSSWURM, E., F. FALTUS und J. FRANKE. Systems Engineering als Basis für konstruktionsbegleitende Zusammenarbeit. In: LIU-HENKE, XIAOBO und DURAK, UNMUT, Hg. *Tagungsband Virtueller ASIM Workshop 2021 Simulation Technischer Systeme. Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation & Edukation und Simulation: ARGESIM*, 2021. ISBN 9783960018698
- [P2] RUSSWURM, E. und F. FALTUS. Methodik zur frühzeitigen Integration prozessspezifischer Einflussfaktoren aus der automatisierten Montage in die Auslegung funktionskritischer Komponenten. In: *DS III: Proceedings of the 32nd Symposium Design for X: The Design Society*, 2021
- [P3] SCHMIDL, E., E. FISCHER, J. STEINDL, M. WENK und J. FRANKE. Reinforcement learning for energy reduction of conveying and handling systems [online]. *Procedia CIRP*, 2021, **97**, S. 290-295. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2020.05.240
- [P4] TUR, B., E. FISCHER, J. FRANKE, C. BERGS und C. SCHULZE. Modelling of Energy Storage Devices and Converters for Energy Flow Simulation in Plant Simulation. In: M. PUTZ und A. SCHLEGEL, Hg. *ASIM 2019. Simulation in Produktion und Logistik*. Auerbach /Vogtl.: Wissenschaftliche Scripten, 2019, S. 97-110. ISBN 978-3-95735-113-5
- [P5] MAYR, A., T. LECHLER, T. DONHAUSER, M. METZNER, E. SCHÄFFER, E. FISCHER und J. FRANKE. Advances in energy-related plant simulation by considering load and temperature profiles in discrete event simulation [online]. *Procedia CIRP*, 2019, **81**, S. 1325-1330. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2019.04.021
- [P6] LECHLER, T., E. FISCHER, M. METZNER, A. MAYR und J. FRANKE. Virtual Commissioning - Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems. In: *52nd CIRP Manufacturing Systems Conference 2019*, 2019, S. 1125-1130
- [P7] SCHMIDL, E., M. WENK, E. RUSSWURM und J. FRANKE. Interoperabilität realer und simulierter Produktionssysteme mittels OPC UA. In: J. FRANKE und P. SCHUDERER, Hg. *Simulation in Produktion und Logistik 2021*. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2021, S. 495-504. ISBN 9783736974791

- [P8] BARTH, M., B. GUTWALD, E. RUSSWURM, J. FRANKE, M. LAVERY, R. SCHWANNINGER und M. MÄRZ. Simulation-based planning and design of hybrid AC/DC energy grids for production systems: a holistic approach [online]. 20. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik 2023, p. 31, 2023. Verfügbar unter: doi:10.22032/dbt.57898
- [P9] SCHMIDL, E., E. FISCHER, M. WENK und J. FRANKE. Knowledge-based generation of a plant-specific reinforcement learning framework for energy reduction of production plants. In: 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA): IEEE, 2020, S. 1439-1442. ISBN 978-1-7281-8956-7
- [P10] SJAROV, M., T. LECHLER, E. RUSSWURM, J. FUCHS, F. FALTUS, E. SCHÄFFER, M. BROSSOG und J. FRANKE. Life Cycle of a Digital Resource Twin: Meta-Modeling and Application Example [online]. *Procedia CIRP*, 2021, **104**, S. 1644-1649. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2021.11.277

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] ANDERS, S. Entwicklung eines digitalen Anlagenmodells in Hinblick auf eine Co-Simulation unter Berücksichtigung des Energiebedarfs. Projektarbeit. Erlangen, 30. Juni 2021
- [S2] BENKER, A. Potentialanalyse, Entwicklung und Anwendung eines smarten Lastmanagements für den Betrieb in E-Mobility Ladeparks. Masterarbeit. Erlangen, 31. Dezember 2019
- [S3] EDMEIER, M. Steuerungsprogramm für eine Fertigungszelle mit Gleichstrom (DC Smart-Grid). Masterarbeit. Erlangen, 3. September 2018
- [S4] FANG, J. Entwicklung eines Ansatzes für ein integrierendes Datenmodell für toolübergreifende Simulationen. Masterarbeit. Erlangen, 30. September 2021
- [S5] GEßNER, J. Virtuelle Inbetriebnahme einer Entgratungszelle. Projektarbeit. Erlangen, 3. November 2019
- [S6] GÜTLEIN, A. Entwicklung der Hardware-Umgebung für einen DC-Demonstrator unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf das deutsche Versorgungsnetz. Masterarbeit. Erlangen, 26. Mai 2020
- [S7] KANA NOUMEDDEM, J.C. Durchgängiges Engineering anhand einer Gleichstromzelle unter Berücksichtigung der Sicherheitsaspekte. Bachelorarbeit. Erlangen, 3. Juni 2019
- [S8] KAST, D. Einsatzmöglichkeiten von Engery as a Service im Bereich Automatisierter Produktionsanlagen. Masterarbeit. Erlangen, 14. Juli 2022
- [S9] KAST, D. Ganzheitliche Auslegung der SPS-Steuerung einer automatisierten Produktionsanlage. Projektarbeit. Erlangen, 30. Mai 2021
- [S10] LYU, Y. Ganzheitliche Simulation von Fertigungszellen hinsichtlich des Prozess- und Energieverhaltens. Masterarbeit. Erlangen, 20. Mai 2019
- [S11] MARINIS, L.G. DE. Erarbeitung eines Demonstrators für Gleichstromanwendungen. Projektarbeit. Erlangen, 3. September 2018

- [S12] NITSCH, C. Steuerungsprogramm für eine Fertigungszelle anhand eines Beispiels. Bachelorarbeit. Erlangen, 27. September 2018
- [S13] OGUZ, B. Auswahl geeigneter Methoden der künstlichen Intelligenz für die Überwachung einer automatisierten Produktionsanlage. Bachelorarbeit. Erlangen, 31. August 2021
- [S14] OßMANN, P. Erarbeitung einer gültigen Definition für ein Smart Grid. Bachelorarbeit. Erlangen, 3. September 2018
- [S15] PRANGE, S. Konzeption eines Vorgehensmodells zur Optimierung der Effizienz einer Anlage unter Betrachtung zukunftsfähiger Technologien. Masterarbeit. Erlangen, 15. Oktober 2018
- [S16] ROTHENBUCHER, F. Energiespeicher für eine dezentrale Energiewende: Analyse bestehender und potentieller Energiespeicher für private Haushalte. Masterarbeit. Erlangen, 19. Oktober 2020
- [S17] SANKTJOHANSER, S. Entwicklung und Konstruktion einer Roboterzelle mit Einbindung erneuerbarer Energien. Masterarbeit. Erlangen, 2. Mai 2019
- [S18] SCHLEGL, C. Entwicklung der Steuerungstechnik zur Verwendung in einer Gleichstromanlage. Masterarbeit. Erlangen, 14. Januar 2020
- [S19] SCHWEIGER, A. Investitionsaufwand, Einsparpotenziale und Konzeptbewertung der Energieversorgung eines Industrieroboters in einem DC-Netz. Projektarbeit. Erlangen, 7. Juli 2020
- [S20] STEGER, C. Virtuelle Inbetriebnahme als Unterstützung im Produktentwicklungsprozess. Masterarbeit. Erlangen, 3. Februar 2020
- [S21] TUR, B. Identifikation, Simulation und Prädiktion energetischer Bedarfsprofile für die Produktion und Produktionsinfrastruktur. Masterarbeit. Erlangen, 3. Dezember 2018
- [S22] ZHANG, Y. Konzeptionierung und Umsetzung eines Demonstrators für den ressourcen- und kosteneffizienten Betrieb von Industriekomponenten. Masterarbeit. Erlangen, 1. August 2019
- [S23] ZHANG, Y. Entwicklung und Aufbau einer virtuellen Fertigungszelle. Projektarbeit. Erlangen, 30. September 2018

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2024):
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308
FAU Studien aus dem Maschinenbau
ISSN 2625-9974
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmflk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LGT	Lehrstuhl für Gießereitechnik
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektiertung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätsteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende

Untersuchungen zum Biegeumformung mit elastischer Matrizierung
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer

Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller

CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann

Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmman

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn

Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen

LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab.

1996. ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik

LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.

1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr

Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern

FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab.

1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer

Berührungslose Formgebung mit-Laserstrahlung

LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.

1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz

Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen

LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab.

1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs

Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell

FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab.

1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm

Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion

FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.

1997. ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand

Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)

FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.

ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf

Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparsparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage

LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.

1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser

Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung

FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.

ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl

Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion

FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab.

1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto

Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen

LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab.

1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl

Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung

FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.

ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf

Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenswickeln

FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.

ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes

Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung

LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab.

1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus

Laserstrahlumformen von Profilen

LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab.

1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer

Adaptive Strahlführungen für CO₂-Lasieranlagen

LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab.

1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber

Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage

FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab.

1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf

Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik

LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab.

1997. ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke

Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung

LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.

ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller

Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen

FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17

Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner

Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung

LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.

1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen

LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab.

1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind

Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren

LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab.

1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard

Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen

FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab.

1998. ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh

Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe

FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab.

1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn

Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab.
1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schuberth

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab.
1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn

Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab.
1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab.
1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher

Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab.
1999. ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.
1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P.

Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab.
1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler

Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker

Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab.
1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein

Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger

Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab.
1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab.
1999. ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach

Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk

Simulationsbasierte Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab.
2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl

Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel

Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab.
2000. ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer

Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder, 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige

Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder, 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel

Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel

Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter

Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli

Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller

Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer

Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein

Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger

Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber

Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi

Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein

Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi

Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch

Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt

Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler

Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche

Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel

Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel

Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer

Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein

Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann

Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich

Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab.
2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab.
2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab.
2002. ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab.
2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab.
2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab.
2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab.
2002. ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab.
2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab.
2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab.
2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2003. ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl

System- und Prozesstechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab.
2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab.
2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren - Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab.
2004. ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab.
2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab.
2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab.
2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab.
2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab.
2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab.
2005. ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Triologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab.
2005. ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab.
2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab.
2005. ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab.
2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab.
2005. ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab.
2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtl
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab.
2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab.
2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab.
2006. ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab.
2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für blei-freie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schalungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
LFT, 135 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahl-schweißen von Kunststoffen
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetze
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter

Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen

FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.

ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth

Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen

LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreißschweißen metallischer Werkstoffe

LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler

Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl

Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen

LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller

Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte

FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion

FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.

ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahl-tiefschweißen

LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.

2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf

Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld

FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009.

ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile

LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab.

2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen

LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab.

2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks

LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab.

2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen

LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab.

2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung

LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.

2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche

LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab.

2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe

LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab.

2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten

LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab.

2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation

LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab.

2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil

FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab.

2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen

FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab.

2010. ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innenhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren

LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab.

2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren

LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab.

2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahl-sintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan
Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner
Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuer
Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth
Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler
Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert
Automatisiertes Laserstrahl-löten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr
Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger
Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel
Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse
Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz- und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab.
2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktesgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentín
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühn
Flexible Automatisierung der Statormontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder.
2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke

Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz

Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aus-härtbarer Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärteprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland

Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner

Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum

Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider

Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof

Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller

Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl
Methods-Energy Measurement -
Eine Methode zur Energieplanung
für Fügeverfahren im Karosserie-
bau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unterneh-
menscontrollings um die Dimen-
sion Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen
zur Herstellung zyklisch-symmet-
rischer Bauteile mit Nebenform-
elementen durch Blechmassivum-
formung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

**Band 288: Hans Ulrich
Vierzigmann**
Beitrag zur Untersuchung der tri-
bologischen Bedingungen in der
Blechmassivumformung - Bereit-
stellung von tribologischen Mod-
ellversuchen und Realisierung
von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absiche-
rung der formgebenden Operation
des Nasspressprozesses von Ge-
lege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische
Mindestenergiebedarf als Refe-
renzwert zur Bewertung der Ener-
gieeffizienz in der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen ver-
zinkter Stahlbleche in Kehlnahtge-
ometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

**Band 292: Alexander
Kahrimanidis**
Thermisch unterstützte Umfor-
mung von Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent
Magnet Assembly and Magnetic
Rotor Measurement / Flexible Sys-
teme zur Montage von Permanent-
magneten und zur Messung mag-
netischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensver-
halten hochfester Leichtbauwerk-
stoffe unter Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen
zum Prozessverhalten von Silizium
als Werkzeugwerkstoff für das
Mikroscherschneiden metallischer
Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

**Band 296: Sasia Mareike
Hertweck**
Zeitliche Pulsformung in der La-
sermikromaterialbearbeitung -
Grundlegende Untersuchungen
und Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach
for the Process Planning of En-
ergy-Efficient Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickel-
technik für verteilte Wicklungen
im Anwendungsfall der E-Trakti-
onsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20
Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstel-
lung montageführender Werkerin-
formationssysteme simultan zum
Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung
und Regelung robotergeführter
Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen
Werkstoffverbunden mittels si-
multanem, intensitätsselektivem
Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch un-
terstützten Fertigungskette zur
Herstellung umgeformter Bauteile
aus der härtesten Aluminiumle-
gierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes
for the Cold Bulk Forming of Small
Metal Components from Metal
Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Mode-
ling, Simulation and Optimization
of Molded Interconnect Devices
(MID) Based on Laser Direct
Structuring (LDS) / Experimentelle
Untersuchung, Modellierung, Si-
mulation und Optimierung von
Molded Interconnect Devices
(MID) basierend auf Laser Direkt-
strukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26
Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsver-
fahren für flachleiterbasierte Pkw-
Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung des spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vivapc
Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner
Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja
Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel
Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand
Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad
Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserie-rohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel
Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann
Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann
Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner
Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller
Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner

Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher

FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm

Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge

LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer

Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip

LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp

Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transients optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung

LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz

Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten

FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner

Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung

FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger

Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion

KTMfK, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn

Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)

FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019.

ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann

Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme

FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019.

ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski

Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung

LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019.

ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier

Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion

FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020.

ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr

Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen

LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020.

ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener

Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern

LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng

Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißschweißprozesses

FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik**Schwingenschlögl**

Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten

LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti

Evaluation of failure behaviour of sheet metals

LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner

Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess

LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner

Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen

FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter

Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente

FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser

Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation

FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend

Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander

Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz

Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometrie-Modelle KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014 LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläsel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobilen Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari

Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merk

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter

Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäffer

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein

Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axialschub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen – KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl

Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies

LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements

LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten

FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022.

ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur

LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-515-5.

Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht

LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völkl

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme

KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen

FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten

FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J. Schwarzer

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung

LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehsticks auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen

LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen

LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-583-4.

Band 407: Alexander Wolf
Modellierung und Vorhersage menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-Produkt Interaktion
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-585-8.

Band 408: Tim Weikert
Modifikationen amorpher Kohlenstoffschichten zur Anpassung der Reibungsbedingungen und zur Erhöhung des Verschleißschutzes
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder, 9 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-589-6.

Band 409: Stefan Götz
Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement
KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder, 13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-593-3.

Band 410: Markus Hubert
Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder, 7 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-603-9.

Band 411: Manfred Vogel
Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses
LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder, 11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-605-3.

Band 412: Michael Weigelt
Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität
FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder, 38 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-607-7.

Band 413: Frank Bodendorf
Machine Learning im Cost Engineering des Supply Managements
FAPS, xiii u. 165 Seiten, 75 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-609-1.

Band 414: Maximilian Metzner
Planung und Simulation taktiler, intelligenter und kollaborativer Roboterfähigkeiten in der Montage
FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder, 3 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-611-4.

Band 415: Tina Buker
Ein Ansatz zur Reduktion produktinduzierter Nutzerstigmatisierung durch Förderung einer gleichermaßen gebrauchstauglichen wie emotionalen Produktgestalt
KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder, 44 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-613-8.

Band 416: Marlene Kuhn
Model-based Traceability System Development for Complex Manufacturing Applying Blockchain and Graphs
FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-615-2.

Band 417: Benjamin Lengenfelder
Remote photoacoustic sensing using speckle-analysis for biomedical imaging
LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder, 10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-617-6.

Band 418: Benjamin Pohrer
Analyse des Zusammenhangs zwischen dem tribochemischen Aufbau von Grenzschichten und der Ausbildung von White Etching Crack-Schäden
KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder, 10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-621-3.

Band 419: Matthias Friedlein
Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte
FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder, 7 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-625-1.

Band 420: Thomas Stoll
Laser Powder Bed Fusion von Kupfer auf Aluminiumoxid-Keramiken
FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bilder, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-631-2.

Band 421: Eric Eschner
Relation of Particle Motion and Process Zone Formation as a Basis for Sensing Approaches within PBF-LB/M
LPT, xiv u. 143 Seiten, 87 Bilder, 0 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-633-6.

Band 422: Fanuel Mehari
Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) as a diagnostics tool for biological tissue analysis.
LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-641-1.

Band 423: Uwe Leicht
Ultraschallüberlagertes Umformen und Verstemmen von Stahlwerkstoffen
LFT, xi u. 165 Seiten, 65 Bilder, 6 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-643-5.

Band 424: Thomas Braun
Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau
FAPS, xvii u. 152 Seiten, 72 Bilder, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-653-4.

Band 425: Reinhardt Seidel
Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses
FAPS, xxii u. 167 Seiten, 73 Bilder, 23 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-651-0.

Band 426: Matthias Lenzen
Maßgeschneiderte Werkstoffcharakterisierung für die numerische Auslegung von Blechumformprozessen
LFT, xi u. 187 Seiten, 77 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-663-3.

Band 427: Matthias Graser
Analyse lokaler Kurzzeitwärmebehandlungsmethoden zur Verbesserung des Umformverhaltens und der Bauteileigenschaften von Aluminiumstrangpresshohlprofilen
LFT, xi u. 169 Seiten, 81 Bilder, 1 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-666-4.

Band 428: Markus Lieret

Sicheres autonomes Flugroboter-system für den Einsatz im Produktions- und Logistikumfeld
FAPS, xix u. 198 Seiten, 54 Bilder, 7 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-668-8.

Band 429: Petar Vukovic

Simulation komplexer Kommunikationssysteme in der Fertigungs-automatisierung
FAPS, xiv u. 163 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-673-2.

Band 430: Fabian Knieps

Finite Elemente Simulation dünns-ter Verpackungsstähle: Entwick- lung einer geeigneten Charakteri- sierungs- und Validierungsstrate- gie
LFT, xix, 189 Seiten, 122 Bilder, 17 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-689-3

Band 431: Julian Seßner

Multimodale Bildsegmentierung gering strukturierter Umgebungen für die Navigation am Beispiel eines Assistenzsystems für sehbe- einträchtigte Personen
FAPS, xxv, 203 Seiten, 57 Bilder, 25 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-697-8

Band 432: Benjamin Samuel Lutz

Smart Manufacturing System for Process Optimization Regarding Deviations among Material Batches
FAPS, xix, 208 Seiten, 77 Bilder, 14 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-703-6

Band 433: Michael Jüttner

Bewertung von Kantenpressungen auf Basis von Simulationen mehr- fach überrollter elasto-plastischer Kontakte
KTmflk, xii, 162 Seiten, 59 Bilder, 7 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-713-5.

Band 434: Sebastian Wiesenmayer

Untersuchungen zur Stofffluss- steuerung beim Fügen durch Um- formen von hochfesten Alumini- umlegierungen mittels lokaler Kurzzeitwärmebehandlung
LFT, xii u. 197 Seiten, 81 Bilder, 19 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-715-9.

Band 435: Clara-Maria Kuball

Grundlegende Untersuchungen zur umformtechnischen Herstel- lung von Halbhohlstanzen aus hochverfestigenden Werkstoffen
LFT, viii u. 180 Seiten, 64 Bilder, 13 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-717-3.

Band 436: Martin Roth

Sampling-based Tolerance-Cost Optimization: The Key to Optimal Tolerance Allocation
KTmflk, xxxvii u. 337 Seiten, 97 Bilder, 56 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-719-7.

Band 437: Stephan Schirdewahn

Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens im Presshärte- prozess durch Verwendung maß- geschneiderter laserimplantierter Werkzeuge
LFT, viii u. 177 Seiten, 63 Bilder, 7 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-721-0.

Band 438: Andreas Rohrmoser

Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses zum Fließpressen betriebsangepasster Verzahnungen für den Einsatz in der Materialpaa- rung Metall-Kunststoff
LFT, x u. 166 Seiten, 94 Bilder, 6 Tab. 2024.

ISBN: 978-3-96147-723-4.

Band 439: Andreas Selmaier

DMAICS-Zyklus zur Digitalisie- rung in produzierenden Unternehmen
FAPS, xv u. 185 Seiten, 73 Bilder, 19 Tab. 2024.

ISBN: 978-3-96147-733-3.

Band 440: Thomas Kistner

Entwicklung von Modellen der Oberflächenform für die Messunsicherheitsbestimmung von taktilen Koordinatenmessungen durch Si- mulation
FMT, xiii u. 134 Seiten, 64 Bilder, 9 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-735-7.

Band 441: Fabian Dworschak

Selbstverstärkendes Lernen als Beitrag zur Automatisierung der Anpassungskonstruktion
KTmflk, x, 205 Seiten, 87 Bilder, 16 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-739-5.

Band 442: Martin Killmann

Vorspannung und Ermüdung von Kaltmassivumformwerkzeugen für unrunde Bauteilgeometrien
LFT, ix u. 160 Seiten, 85 Bilder, 6 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-741-8.

Band 443: Ann-Kathrin Wiemann

Beitrag zur Messunsicherheitser- mittlung für die Messung großer Zahnräder zur Erweiterung des vir- tuellen Koordinatenmessgerätes der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
FMT, xxiv u. 133 Seiten, 41 Bilder, 22 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-747-0.

Band 444: Andreas Jobst

Eigenspannungen beim Voll-Vor- wärts-Fließpressen – Entstehung, Einstellung und Stabilität
LFT, ix u. 162 Seiten, 89 Bilder, 5 Tab. 2024.

ISBN: 978-3-96147-749-4.

Band 445: Martin Anton Kraus

Grundlagenwissenschaftliche Un- tersuchungen zum Kaltfließpres- sen kleinster metallischer Pin- Strukturen aus der Blechebene
LFT, x u. 191 Seiten, 64 Bilder, 10 Tab. 2024.

ISBN: 978-3-96147-757-9.

Band 446: Moritz Späth

Assessment of microcirculation
by shifted position-diffuse
reflectance imaging (SP-DRI)
LPT, xi u. 109 Seiten, 37 Bilder, 8
Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-759-3.

Band 447: Benedikt Göddeke

Methode zur Auswahl eines alternativen Blechwerkstoffes für flexibel gewalzte und direkt warmumgeformte Karosseriestrukturbau-
teile

LFT, xvi u. 222 Seiten, 66 Bilder, 27
Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-762-3.

Band 448: Jan Hafenecker

Systematische Untersuchung zur
Blechumformung von Hybridbau-
teilen

LFT, xxi u. 173 Seiten, 78 Bilder, 6
Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-764-7.

Band 449: Sven Wirsching

Numerische Optimierung von
sekundären, geschmierten Punkt-
und Ellipsenkontakten zur geziel-
ten Auslegung von Rollenlagern
KTmfk, xxv u. 206 Seiten,
70 Bilder, 16 Tab. 2024.

ISBN: 978-3-96147-766-1.

Band 450: Tobias Lechler

Der Digitale Zwilling im Ramp-
down automatisierter Produkti-
onssysteme

FAPS, xvii u. 152 Seiten, 83 Bilder,
4 Tab. 2024

ISBN: 978-3-96147-691-6.

Band 451: Eva Russwurm

Kombinierte Material- und
Energieflusssimulation gleich-
strombasierter, automatisierter
Produktionsanlagen

FAPS, xvi u. 165 Seiten, 67 Bilder,
13 Tab. 2024

ISBN: 978-3-96147-770-8.

Abstract

The consideration of energy supply is playing an increasingly important role in production planning. The starting point for this is the energy transition in Germany and Europe. Companies are increasingly focussing on using their own energy sources and storage systems in their own direct current network rather than being dependent on the electricity supplier. These provide power not only to separate production cells, but also to entire production halls, as this also increases flexibility. Simulation is often used to plan manufacturing and production facilities. This is currently used to configure the architecture of the systems, the material flow and to analyse energy consumption. The energy supply is not taken into account.

The overarching research topic of this dissertation is therefore the development of a simulation environment that combines material and energy flow. It is necessary to combine the modelling of production with all plants and cells as well as all components of the energy grid (sources, storage, consumption from the power grid) in one platform.

The work deals with the basics of direct current in industry and simulation. Based on this, a platform for a combined simulation is being developed that can be used at any time in the planning process. In addition, all developers should be able to continue working in the familiar tool without having to import or export results. The developed platform was tested using a selected production plant and the results were theoretically validated.

Die Betrachtung der Energieversorgung spielt in der Planung der Produktion eine immer größere Rolle. Ausgangspunkt hierfür ist die Energiewende in Deutschland und Europa. Unternehmen setzen zunehmend darauf, nicht nur vom Stromversorger abhängig zu sein, sondern eigene Energiequellen und Speicher in einem eigenen Gleichstromnetz zu nutzen. Diese versorgen dabei nicht nur einzelne Produktionszellen, sondern ganze Fertigungshallen, denn damit vergrößert sich auch die Flexibilität. Für die Planung der Fertigung und der Produktionsanlagen kommt häufig die Simulation zum Einsatz. Diese wird zurzeit für die Konfiguration der Architektur der Anlagen, des Materialflusses und die Betrachtung des Energiebedarfs genutzt. Nicht berücksichtigt wird dabei die Versorgung mit Energie.

Das übergeordnete Forschungsthema dieser Dissertation hat daher die Entwicklung einer Simulationsumgebung, die Material- und Energiefluss kombiniert einbezieht, zum Ziel. Dabei ist es notwendig, sowohl die Produktion mit allen Anlagen und Zellen, als auch sämtliche Komponenten des Energienetzes (Quellen, Speicher, Entnahme aus dem Stromnetz) zu modellieren und in einer Plattform zusammenzuführen.

So befasst sich die Arbeit mit den Grundlagen des Gleichstroms in der Industrie und der Simulation. Darauf aufbauend wird eine Plattform für eine kombinierte Simulation entwickelt, die darauf abzielt, zu jeder Zeit in der Planung genutzt werden zu können. Außerdem sollen alle Entwickler weiterhin in bereits bekannten Tools arbeiten können, ohne Ergebnisse im- bzw. exportieren zu müssen. Die entwickelte Plattform wurde anhand einer ausgewählten Produktionsanlage getestet und die Ergebnisse theoretisch validiert.

