Die approbierte Originalversion dieser Dissertation ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

D I S S E R T A T I O N

Eine anwendungsorientierte simulationsbasierte Methode, unter Berücksichtigung von Energieeffizienz, in der optimierenden Planung von Produktion und Logistik

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Wilfried Sihn
TU Wien, Institut für Managementwissenschaften,
Bereich Betriebstechnik und Systemplanung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Gerhard
TU Wien, Institut für Konstruktionswissenschaften,
Forschungsbereich Maschinenbauinformatik

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Egon Müller
TU Chemnitz, Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme,
Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Thomas Sobottka,
Matrikelnummer: 1604984
Rembrandtstraße 7/11, 1020 Wien, Österreich

Wien, am 21. November 2017

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Thomas Sobottka

Kurzfassung der Dissertation

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung einer Planungsmethode, die gleichzeitig die Energieeffizienz und die ökonomische Leistung von Produktionssystemen optimiert – dafür wird eine multikriterielle Optimierung, basierend auf einer hybriden – kontinuierlich/diskretes Verhalten zeigenden – Simulation eingesetzt.

Energieeffizienz ist aufgrund steigenden gesellschaftlich-politischen Drucks zu nachhaltigem Wirtschaften und langfristig steigender Energiepreise zu einem wichtigen Ziel produzierender Unternehmen geworden. Erhebliches Potential liegt dabei in der Optimierung der Produktionsplanung und Steuerung sowie dem darauf abgestimmten Betrieb von Anlagen in der Peripherie und einem Zielsystem, das sowohl die klassischen ökonomischen Ziele wie auch Energieeffizienz in einer Zielfunktion der integrierten Planung vereint. Doch trotz des erkannten Bedarfs, fehlen den Unternehmen entsprechende Planungsmethoden – das Potential bleibt somit ungenutzt. Auch die schon veröffentlichten Ansätze in der Forschung haben erheblichen Entwicklungsbedarf: Vor allem das diskrete Materialfluss- und Auftragsbearbeitungs-Verhalten, zusammen mit dem thermisch-physikalischen Verhalten der Anlagen – z.B. Industrieöfen oder Kälteanlagen –, werden bislang nur ungenügend bezüglich ihrer Wirkbeziehungen integriert betrachtet und geplant. In der Folge bleibt Potential und damit ein Wettbewerbsvorteil ungenutzt.

Diese Arbeit hat das Ziel, eine entsprechende Planungsmethode mit der Integration der Energieeffizienz in das Zielsystem der Produktionsplanungsoptimierung zu entwickeln. Dafür wird zu Beginn ein Modellierungskonzept entwickelt, das die integrierte Betrachtung des Produktionssystems ermöglicht. Korrespondierend dazu wird eine neuartige hybride, objektorientierte Simulation entwickelt, die sowohl das diskrete Verhalten des Systems, wie auch das kontinuierliche detailliert und gleichzeitig abbilden kann. Im Anschluss wird ein Optimierungsmodul entwickelt, das die Simulation als Bewertungsfunktion nutzt und die eingangs beschriebene Optimierung des Produktionsplans, sowie die Ansteuerung aller relevanten Aggregate in der Produktion und ihrer Peripherie, leisten kann. Die daraus resultierende Gesamtmethode wird anhand einer Industrie-Fallstudie in der Lebensmittelproduktion evaluiert und kann dabei erhebliches Optimierungspotential von bis zu 50% Gesamtoptimierung und 30% Energieeinsatz-Reduktion ausweisen.

Schlagworte zur Arbeit: *Hybride Simulation, Energieeffizienz, Multikriterielle Optimierung, Produktionsplanung und –steuerung*

Abstract

This thesis documents the development of a planning method that simultaneously increases the energy efficiency as well as the economic performance of complex production systems. The method utilizes a multi-criteria optimization based on a hybrid simulation that is able to exhibit both continuous and discrete behaviour.

Energy efficiency has become an important goal for manufacturing enterprises, largely due to a combination of rising societal and political pressure towards a more sustainable way of conducting business and growing energy prices in the long-term. There is considerable potential in this area to be found in the optimized production planning and control (PPC), as well as the synchronized control of equipment in the periphery, together with a goal system that features both classical economic goals and energy efficiency in the objective function of an integrated planning approach. However, despite the recognized demand, the necessary planning methods are missing for manufacturing companies, resulting in wasted potential. Even the scientific approaches publicized thus far are lacking crucial elements: Especially the integrated planning of the discrete material flow and order processing together with the thermal-physical behaviour of equipment – e.g. industrial ovens or chillers – and its interdependencies is not sufficiently provided by available approaches. As a result, the associated optimization potential is left unutilized.

This research aims at developing a planning method that integrates energy efficiency into the goal system of production planning optimization. To achieve this, a modelling concept supporting the integrated consideration of production systems is being developed. Next, a corresponding novel hybrid simulation method that supports both the discrete and continuous behaviour of production and energy systems is evolved. Following that, an optimization module utilizing the simulation as an evaluation function and enabling the simultaneous optimization of the short-term production plan and optimized control of relevant equipment in the periphery is engineered. The resulting overall method is then evaluated in a case study featuring a food production facility, revealing an overall optimization potential of up to 50%, amid energy savings of up to 30%.

Keywords: *Hybrid Simulation, Energy Efficiency, Multi-Criteria Optimization, Production Planning and Control*

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Arbeit am Institut für Managementwissenschaften der Technischen Universität Wien (IMW) und für die Fraunhofer Austria Research GmbH (FhA) entstanden.

Herrn Prof. Dr. Wilfried Sihn, Geschäftsführer FhA sowie Leiter des Bereichs Betriebstechnik und Systemplanung am IMW, danke ich für seine ausdauernde Betreuung dieser Arbeit – ohne seine Hinweise und Vertrauen, wäre die Arbeit nicht möglich gewesen.

Bei Herrn Prof. Dr. Detlef Gerhard und Herrn Prof. Dr. Egon Müller möchte ich mich ebenfalls für die Mitbetreuung der Arbeit und ihre zahlreichen wertvollen Hinweise zur Verbesserung dieser Arbeit danken.

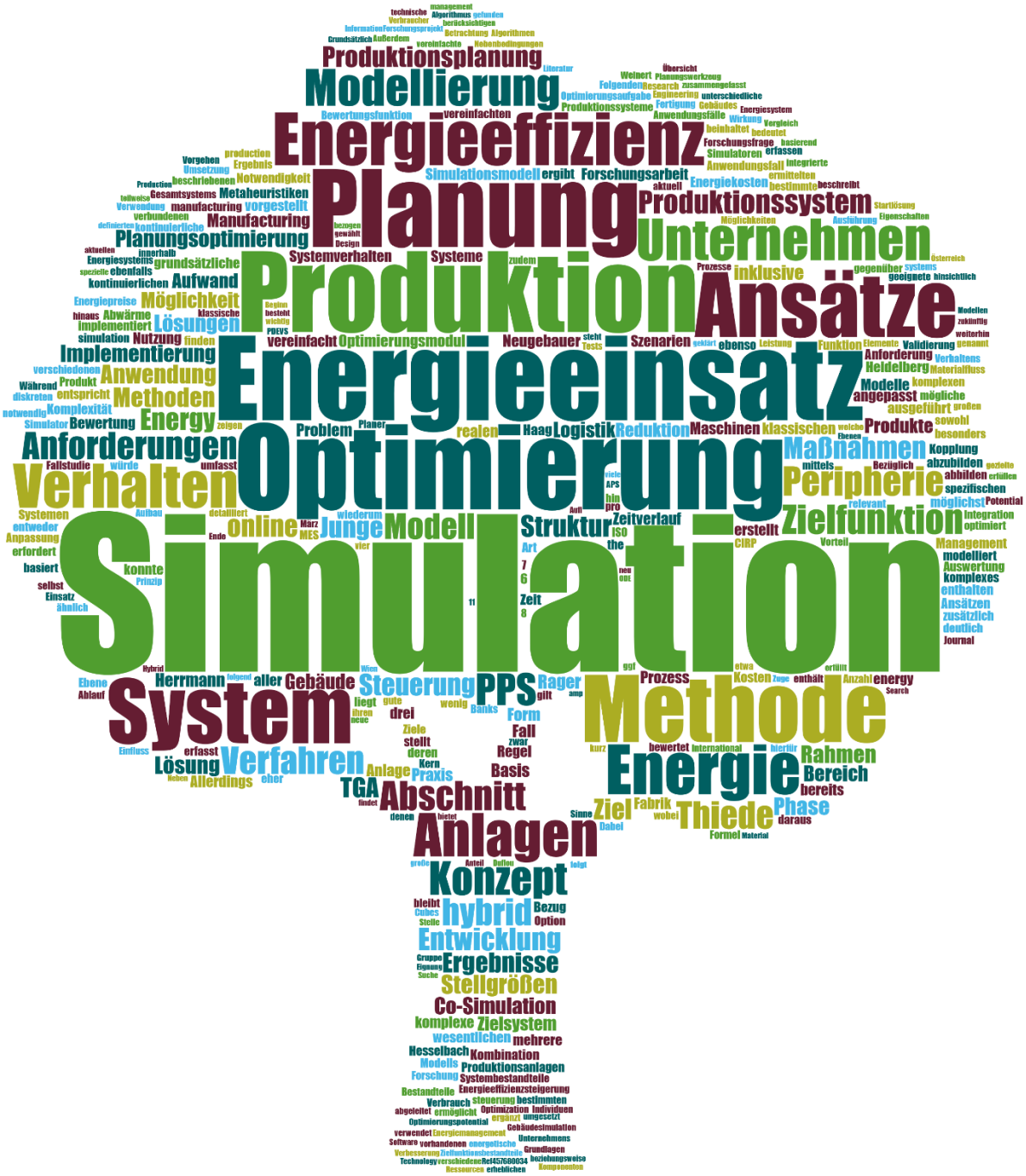
Zudem danke ich allen Kollegen im Forschungsprojekt Balanced Manufacturing (BaMa), in dessen Rahmen die Arbeit entstanden ist. Besonderer Dank geht an Felix und Markus für die tolle Zusammenarbeit, besonders in der Optimierungsentwicklung – ohne unsere „Nerding“-Runden der letzten drei Jahre, wäre die Zeit auch nur halb so produktiv und vor allem unterhaltsam gewesen. Auch beim BaMa-Kernteam um Ines, Bernhard, Martin, Ben, Matthias, Peter und vielen anderen möchte ich mich herzlich bedanken – das war eine tolle, intensive, interdisziplinäre Zusammenarbeit in den dreieinhalb Jahren, die ich sehr schätzen gelernt habe. Ohne diese Kooperation wäre ein so ambitioniertes Forschungsvorhaben, nicht möglich – keine Aussage und Ergebnis wären sonst entstanden; diese Arbeit zeigt somit nur einen Blick auf die Entwicklung der Methode.

Nicht weniger möchte ich mich bei allen Kollegen, bei FhA und dem IMW, für die Zusammenarbeit, spannende Projekte und eine stets unterhaltsame Zeit bedanken – mit diesem Umfeld konnten die letzten sechs Jahre diese angenehme Zeit werden.

Spezieller Dank geht an meine Eltern, für ihre Unterstützung über all die Jahre und für das Verständnis, mich in den letzten Jahren nur zwei-komma-drei mal im Jahr in Rostock zu sehen.

Und jetzt noch ein Riesen-Dankeschön an meine Freundin Suzana für ihre Rundum-Unterstützung, guten Tipps und tapferes Ertragen des Endspurts der Arbeit; jetzt bist Du dann dran, mit Optimierungsforschung.

Wien, im Oktober 2017


Simulation
Optimierung
Energieeinsatz
Ansätze
Produktion
Planung
Energieeffizienz
Modellierung
Produktionsplanung
Unternehmen
Produktionssystem
Verhalten
Anforderungen
Methode
System
Energie
Anlagen
Konzept
Entwicklung
Ergebnisse
Stellgrößen
Co-Simulation
komplexe Zielsystem
hybrid
Thiede
Abschnitt
Verfahren
Lösung
TGA
Zielfunktion
Peripherie
Maßnahmen
Methoden
Implementierung
Anwendung
Lösungen
Möglichkeit
Planungsoptimierung
Manufacturing
Energy
Modell
Junge
Online
Struktur
Steuerung
PPS
Gebäude
Herrmann
Logistik
Reduktion
Maschinen
klassischen
Produkte
Prozess
Kosten
Rahmen
Bereich
Phase
Ziel
Fabrik
Regel
Basis
Form
Fall
Zeitverlauf
Zeit
Neugebauer
Szenarien
Optimierungsmodul
vereinfacht
Systemverhalten
Systeme
inklusive
Aufwand
grundsätzliche
Anforderung
Validierung
Heidelberg
Modelle
angepasst
ausgeführt
Management
modelliert
Auswertung
komplexes
enthalten
Ansätzen
zusätzlich
deutlich
Journal
Hesselbach
Kombination
Produktionsanlagen
Systembestandteile
Energieeffizienzsteigerung
Bestandteile
Forschung
Modells
Verbrauch
steuerung
bestimmten
Optimization
Individuen
Optimierungspotential
Gebäudesimulation
Energiemanagement
Unternehmens
Grundlagen
Software
vorhandenen
energetische
Verbesserung
Zielfunktionsbestandteile
Technology
verschiedenen
Ref457660034
beziehungsweise
Ressourcen
erheblichen
Komponenten

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG 1

1.1 MOTIVATION, ZIELSTELLUNG UND ABGRENZUNG DER ARBEIT 1
1.2 ÜBERGEORDNETE FORSCHUNGSFRAGE 4
1.3 FORSCHUNGSMETHODE UND AUFBAU DER ARBEIT 5

2 GRUNDLAGEN DER PLANUNGSMETHODE 10

2.1 ENERGIEEFFIZIENZ ALS NOTWENDIGKEIT MODERNER PRODUKTION 10
2.1.1 Energieeffizienz 10
2.1.1.1 Was ist Energie? 10
2.1.1.2 Energiesparen als Notwendigkeit 11
2.1.1.3 Was ist Energieeffizienz? 15
2.1.1.4 Energieeffizienzgrößen 16
2.1.2 Möglichkeiten der Energieeffizienzsteigerung in produzierenden Unternehmen 18
2.1.2.1 Wo kann der Energieeinsatz gesenkt werden? 18
2.1.2.2 Wie kann der Energieeinsatz gesenkt werden? 21
2.1.3 Energiepreise und -kosten in der Produktion 25
2.1.4 Gesetzliche Vorschriften und Normen zur Energieeffizienz 33
2.2 GRUNDLAGEN ZUR PLANUNG VON PRODUKTION UND LOGISTIK 34
2.2.1 Produktion und Produktionsunternehmen 34
2.2.2 Planung der Produktion und Produktionslogistik 37
2.2.3 Planung und Steuerung der Produktions-Peripherie 44
2.3 SIMULATION 46
2.3.1 Simulation – Begriffsklärung 46
2.3.2 Materialflusssimulation 49
2.3.3 Thermisch-Physikalische Simulation 51
2.3.4 Verifikation und Validierung von Simulation 53
2.4 SIMULATIONSGESTÜTZTE OPTIMIERUNG 54
2.4.1 Optimierung 54
2.4.2 Optimierungsmethoden 56
2.4.3 Metaheuristiken 58
2.4.4 Künstliche Intelligenz 60
2.4.5 Zielfunktion 60

3 ANFORDERUNGEN AN EIN PLANUNGSWERKZEUG FÜR ENERGIEEFFIZIENZ 63

4 BESTEHENDE ANSÄTZE UND METHODEN UND IHRE EIGNUNG FÜR DIE PLANUNGSPRAXIS 66

4.1 „KLASSISCHE“ ENERGIEEFFIZIENZMAßNAHMEN IN DER PRODUKTION 66

4.1.1 Energiemanagementsysteme 66

4.1.2 Energiewertstrom 68

4.2 SIMULATIONSBASIERTE ANSÄTZE 69

4.2.1 Thiede – eine simulationsbasierte Methode zur Vergrößerung der Energieeffizienz in produzierenden Unternehmen 70

4.2.2 Junge – Simulation und Optimierung der Produktion unter Berücksichtigung des Energieaspekts für den Anwendungsfall der Spritzgussfertigung 74

4.2.3 Martin - Energieeffizienz durch Abstimmung zwischen Produktion und TGA 77

4.2.4 Leobner – Szenario basierte, energetische Produktionsoptimierung auf Basis von Co-Simulation 77

4.2.5 Rager – Energieorientierte Produktionsplanung 79

4.2.6 Wohlgemuth – DES und Materialflussanalyse für industriellen Umweltschutz 81

4.2.7 Solding – Simulation für nachhaltige Produktionssysteme 82

4.2.8 Heilala – Simulationsbasiertes Design für Produktionssysteme 82

4.2.9 Michaloski – Simulation der Produktion und des Gebäudes für eine nachhaltige Produktion 83

4.2.10 Weinert – Methode für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme 83

4.2.11 Dietmayr – Energieeinsatzmodellierung und Optimierung für Produktionsanlagen 85

4.2.12 Haag – Konzept für die Planung und Optimierung des Energieeinsatzes in Fabriken 85

4.2.13 Rahimfarad – Energieeffiziente Produktionsprozesse durch Minimierung der „verkörperten/enthaltenen“ Energie der Produkte 87

4.2.14 Abele – simulationsgestützte Energieeinsatz-Vorhersage für Bearbeitungsmaschinen 88

4.2.15 Löfgren – DES in einer Lebenszyklusbetrachtung 89

4.2.16 Cannata - Prozessanalyse und -verbesserung 90

4.2.17 Ansätze mit kontinuierlicher Simulation 90

4.3 ANSÄTZE BASIEREND AUF OPTIMIERUNGSPROGRAMMEN 91

4.4 ENTWICKLUNGSBEDARF ZU BESTEHENDEN ANSÄTZEN 93

5 DETAILLIERTE ZIELSETZUNG DER ARBEIT 98

6 KONZEPTENTWICKLUNG FÜR EINE SIMULATIONSGESTÜTZTE PLANUNGSMETHODE 99

6.1 ABBILDUNG DES GESAMTSYSTEMS INKLUSIVE INTERAKTION DER SYSTEMBESTANDTEILE (MASCHINEN, TGA, GEBÄUDE) 99

6.1.1 Modellierung für eine integrierte Simulation 99

6.1.1.1 Struktur und Systemgrenzen 99

6.1.1.2 Modellierung der Systembestandteile 101

6.1.1.3 Modellierung des spezifischen Energieeinsatzes 108

6.1.2 Kopplung Diskreter und Kontinuierlicher Simulation 110

6.2 SIMULATIONSKONZEPT FÜR DIE ENERGETISCHE BEWERTUNG VON LOGISTIKPROZESSEN 114

6.3 ENTWICKLUNG EINER SIMULATIONSGESTÜTZTEN OPTIMIERUNG 121

6.3.1 Beispielmodell 121

6.3.2 Zielfunktion 123

6.3.3 Optimierungsalgorithmen 125

6.3.4 Testergebnisse der vereinfachten Fallstudie 133

7 ANWENDUNG AUF EINE FALLSTUDIE 134

7.1 CHARAKTERISIERUNG DES FALLBEISPIELS 134

7.2 ANPASSUNGEN AN DIE FALLSTUDIE 137

7.3 ERGEBNISSE DER FALLSTUDIE 139

8 DISKUSSION DER ERGEBNISSE 144

9 AUSBLICK UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF 149

10 LITERATURVERZEICHNIS 151

Abkürzungsverzeichnis

AE	Auxilliary Energy
APG	Austrian Power Grid
APS	Advanced Planning and Scheduling Systeme
DESS	Differential Equation System Specification
DEVS	Discrete Event System Specification
DLL	Dynamic-Link Library
DS	Design Science
DSRM	Design Science Research Methodology
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
ERP	Enterprise Ressource Planung
EU ETS	EU-Emissionshandelssystem
EV	europäisches Verbundsystem
EWS	Energiewertstrom
FCS	Finite-Capacity Scheduling
FEM	Finite-Elemente-Methode
GA	Genetic Algorithm
ICT	Informations- und Kommunikationssysteme
IE	Indirekte Energie
IEA	International Energy Agency
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
ISO	International Organization for Standardization
IT	Information Technology
IuK	Informations- und Kommunikationssysteme
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und Mittlere Unternehmen
KNN	Künstliche Neuronale Netze
LCA	Life Cycle Assessments
MAS	Multiagentensysteme
MES	Manufacturing Execution Systems
MTM	Methods-Time Measurement
NP	nicht polynomieller Aufwand
ODE	Ordinary Differential Equation
OOS	Objektorientierte Simulation
PDEVS	Parallel Discrete Event System Specification
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PSO	Particle Swarm Optimization
QM	Qualitätsmanagementsystem
QSS	Quantized State Systems
SA	Simulated Annealing
SC	Systematic Combining
SEC	Specific Energy Consumption
TEA	Thermisch-Energetische Anlagensimulation
TEEM	Total Energy Efficiency Management

TEG	Thermisch-Energetische Gebäudesimulation
TGA	Technische Gebäudeausstattung
TPM	Total Productive Maintenance
TS	Tabu Search
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Systematisches Kombinieren von Dubois und Gadde (Dubois, Gadde 2002) 7

Abbildung 2: Forschungsdesign und Struktur der vorliegenden Arbeit 7

Abbildung 3: Entwicklungsprognose der Energienachfrage nach Energieträgern, nach IEA (Neugebauer 2014, S. 13) 12

Abbildung 4: Erforderliche Einsparungsbeiträge zur Erreichung des 2° C Erwärmungsziels – basierend auf dem World Energy Outlook des IEA (Neugebauer 2014, S. 13) 13

Abbildung 5: Langfristige Energiemix-Entwicklung – Prognose des wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung (Graßl 2003) 13

Abbildung 6: Gründe für Ressourceneffizienzsteigerung aus Unternehmenssicht - Befragungsergebnisse (Neugebauer 2014, S. 98) 14

Abbildung 7: Periphere Ordnung der Produktion (Schenk et al. 2014, S. 137) ... 19

Abbildung 8: Elektroenergiebedarf in der Automobilfertigung, Haag nach Engelmann, 2009 (Haag 2013, S. 20) 20

Abbildung 9: Durchschnittliche Aufteilung des Energieeinsatzes von Werkzeugmaschinen (Li 2015, S. 138) 21

Abbildung 10: Energieeffizienzsteigerung - Energiemanagement in der Produktion (Bunse et al. 2011) 22

Abbildung 11: Maßnahmen zur Reduktion des Energieeinsatzes in Fabriken (Thiede 2012, S. 33) 24

Abbildung 12: Lastgangprofil eines Unternehmens (Thiede 2012, S. 24) 28

Abbildung 13: Stromhandelsmärkte (Schnorrenberg 2006, S. 20) 29

Abbildung 14: E-Energiepreisentwicklung über den Tagesverlauf (Shrouf et al. 2014) 30

Abbildung 15: Beispielhafte Zusammensetzung des Energieportfolios des Stromeinkaufs (Neugebauer 2014, S. 165) 32

Abbildung 16: Betriebstypisierung nach Junge (Junge 2007) 36

Abbildung 17: mit der Planungsmethode betrachtete PPS Aufgaben (Rager 2008, S. 10) 40

Abbildung 18: Einordnung der PPS in die Betrieblichen Planungssysteme (Haag 2013, S. 44) 40

Abbildung 19: Zielsystem der PPS (Junge 2007) 42

Abbildung 20: Betriebskennlinie in Anlehnung an Nyhuis (Evers 2002) 42

Abbildung 21: Klassifikation der Simulation (Mattern, Mehl 1989, S. 200).....47

Abbildung 22: Prinzipdarstellung relevanter Energieflüsse einer Produktionshalle mit Produktionsanlage(n) (Hesselbach 2012, S. 119) 52

Abbildung 23: Simulationsgestützte Optimierung mit Simulation als Prognosefunktion in der Optimierung (März et al. 2011, S. 43) 55

Abbildung 24: Übersicht Optimierungsmethoden – Darstellung auf Grundlage von (Evers 2002; Junge 2007; Sivanandam, Deepa 2007) 56

Abbildung 25: Konzept und Simulationsansatz (Thiede 2012, S. 97).....72

Abbildung 26: Multilevel-Simulation zur Integration des Gebäudeverhaltens (Schönemann et al. 2016).....73

Abbildung 27: Zeitliches Verhalten der Co-Simulation (Junge 2007, S. 82).....75

Abbildung 28 Co-Simulationsframework implementiert über das Building Controls Virtual Testbed (BCVTB) (Heinzl et al.) 78

Abbildung 29: Schema des Simulationsablaufes (Leobner et al. 2013) 78

Abbildung 30: Systembeschreibung nach Heilala (Heilala et al. 2008).....82

Abbildung 31: Energie-Block Methode, Übersicht (Weinert et al. 2011) 84

Abbildung 32: Optimierung und Simulation im Regelkreis (Haag 2013, S. 116) 86

Abbildung 33: Simulationsparadigmen - Zusammenfassung durch Herrmann (Neugebauer 2014, S. 603).....95

Abbildung 34: Äußere Struktur des Planungstool-Einsatzes.....100

Abbildung 35: Struktur des Planungs-Werkzeugs.....100

Abbildung 36: Systemgrenzen einer Prozesseinheit (Duflou et al. 2012) 102

Abbildung 37: Cube-Beschreibung mit Schnittstellen.....103

Abbildung 38: Modellierungsansatz – Besonderheit des Cube-Ansatzes 104

Abbildung 39: Cube-Klassen (Modell-Struktur) 105

Abbildung 40: Schnittstellendiagramm der Cube-Klasse Industrie-Ofen.....106

Abbildung 41: State-Machine eines Industrie-Ofens.....107

Abbildung 42: Modellstruktur und verbundene Simulatoren (Zeigler et al. 2007)112

Abbildung 43: System der hybriden Simulation in der Forschungsarbeit 114

Abbildung 44: Energieeinsatz in Intralogistiksystemen: (a) Logistikzentrum mit hohem Automatisierungsgrad; (b) Lager; (c) Logistikzentrun (Neugebauer 2014, S. 738) 115

Abbildung 45: Einordnung des MTM-Logistik Systems (Deutsche MTM-Vereinigung e.V 2006) 117

Abbildung 46: Ermittlung von Energiekennwerten in Labor- und Feldversuchen (Müller et al. 2010, S. 561) 118

Abbildung 47: Einflussfaktoren auf den Energieeinsatz von Gabelstaplern 119

Abbildung 48: Lastgangkurve und Berechnung des Energieeinsatzes 119

Abbildung 49: Gegenüberstellung der Messergebnisse der einzelnen Flurförderzeuge - Heben der Last vom Boden auf 1 Meter Höhe 120

Abbildung 50: Simulationsmodell: Struktur und Material-, sowie Energieflüsse 122

Abbildung 51: Funktion $\boldsymbol{f1}$ 124

Abbildung 52: Leistungsvergleich der Metaheuristiken – Phase 1 126

Abbildung 53: Basis-Algorithmus des GA 127

Abbildung 54: Leistungsvergleich der Heuristiken – Phase 2 131

Abbildung 55: Veränderung der Zielfunktions-Bestandteile bei GA Anwendung – Phase 2 132

Abbildung 56: Simulationsmodell der Fallstudie 134

Abbildung 57: Energie-Ziel Trend der aktuell besten (Zwischen-)Lösung 139

Abbildung 58: Teil-Ziel-Trends der Durchschnittswerte pro Lösungs-Generation 140

Abbildung 59: Einfluss von variierten Optimierungs-Schrittgrößen auf die Optimierungs-geschwindigkeit und –ergebnisqualität (Werte: 1, 60 und 300 Sekunden) 141

Abbildung 60: Einfluss einer Variation der Populationsgröße des GA auf die Optimierungsleistung 142

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: BEWERTUNGSÜBERSICHT BESTEHENDER PLANUNGSANSÄTZE 94

TABELLE 2: BSP. FÜR ENERGIEBAUSTEINE FLURFÖRDERZEUGE – HEBEN VOM BODEN AUF EIN METER 120

Formelverzeichnis

FORMEL 1: BILANZIERUNG DER HALLENLUFT (VGL. HESSELBACH 2012, S. 119) 53

FORMEL 2: TEMPERATUR IM OFEN.....106

FORMEL 3: ABWÄRME DES OFENS.....106

FORMEL 4: VEREINFACHTE ZIELFUNKTION FÜR DIE OPTIMIERUNGS-ENTWICKLUNG 123

FORMEL 5: ZIELFUNKTION DER FALLSTUDIE.....136

1 Einleitung

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methode der simulationsbasierten Planungsoptimierung für die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) von Produktionssystemen entwickelt, ergänzt um die Planung und Steuerung aller relevanten Anlagen der Produktions-Peripherie, bis hin zur Technischen Gebäudeausstattung (TGA). Dabei wird das Zielsystem der Planung über die klassischen Wirtschaftlichkeitsziele um neue Energieeffizienzziele erweitert. Diese Erweiterung erfordert eine simultane Abbildung des Energie- und des Materialflusssystems – hierfür muss eine hybride Modellierungs- und Simulations-Methode entwickelt werden. Die Methode wird zunächst primär für die Stückgutfertigung entwickelt, ist aber grundsätzlich auch für die Prozessfertigung geeignet. Im folgenden ersten Kapitel der Arbeit wird die Motivation für die präsentierte Forschungsarbeit dargelegt und das zugrundeliegende Problem aus der Unternehmenspraxis identifiziert. Daraus folgend wird eine übergeordnete Forschungsfrage abgeleitet – zusätzlich wird ein Forschungsvorgehen entwickelt und die Struktur der Arbeit definiert.

1.1 Motivation, Zielstellung und Abgrenzung der Arbeit

Eine Kombination langfristig steigender Energiepreise und wachsenden Umweltbewusstseins der Gesellschaft, infolge des steigenden Bewusstseins begrenzter Ressourcen und gleichzeitig erster spürbarer Folgen des durch den Menschen beschleunigten Klimawandels, hat die Forderung nach weniger Energieeinsatz und Emissionen in die Top-Ziele der internationalen Politik eingereiht. In der United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) haben sich die Staaten verpflichtet, eine 2°C Erwärmungsgrenze über die Reduktion der CO_2 Emissionen zu erreichen – 1,9% bis 2040 (United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) 2017). Die daraus entstehende Notwendigkeit, die Energieeffizienz der Wirtschaft und der Produktion zu erhöhen, zusätzlich zur Energiewende, ist bereits auch in der Gesetzgebung angekommen (vgl. Bunse et al. 2011). Darüber hinaus ist das Konzept der Kreislaufwirtschaft bzw. Circular Economy, in der alle Ressourcen immer in möglichst hochwertigem Zustand gehalten werden sollen, einer der großen Trends in Gesellschaft und Wirtschaftsgeschehen. Auch das Kreislaufwirtschafts-Konzept schließt die nachhaltige, ressourcen- und energieeffiziente Produktion als Notwendigkeit ein (vgl. Neugebauer 2014, S. 143). Zusätzlich erzeugt die Energiewende hin zu mehr erneuerbaren Energiequellen eine Volatilität des Energieangebotes, wofür der Energieeinsatz dynamisch angepasst werden muss. Dies kann beispielsweise über

Smart-Grid- und Demand-Response-Konzepte erfolgen. Dafür wiederum benötigen auch produzierende Unternehmen Werkezuge, um den eigenen Energiebedarf planen und optimieren zu können (Uslar et al. 2013). Insgesamt ist das nachhaltige Wirtschaften zum neuen Paradigma moderner produzierender Unternehmen geworden (vgl. Thiede 2012, S. 2). Doch während die Kostenentwicklung und der Umweltschutz die Erhöhung der Energieeffizienz in der Produktion fordern, sind die dafür notwendigen Werkzeuge der Entscheidungsunterstützung und Planung noch nicht verfügbar (vgl. Kara et al. 2010).

Der potentielle Beitrag der Produktion zu reduziertem Energieeinsatz über erhöhte Energieeffizienz in der Fertigung ist erheblich (vgl. Cannata et al.) – weltweit entfallen 31% des Primärenergieeinsatzes und 36% der CO_2 Emissionen auf die produzierende Industrie (vgl. He et al. 2015). In Deutschland hält die Industrie 43% des Stromverbrauches (vgl. Dietmair, Verl) (vgl. Hesselbach 2012, S. 12). Für viele Unternehmen mit energieintensiver Produktion sind die Energiekosten zu einem erheblichen Wettbewerbsfaktor geworden. Insbesondere vor dem Hintergrund langfristig steigender Energiepreise kann Energieeffizienz zu einem entscheidenden Erfolgsfaktor werden, insbesondere in Hochtechnologieländern (vgl. Li 2015, S. 1).

Ein wesentlicher erster Schritt zur Reduktion der bislang für die Industrie benötigten Energiemenge ist die flexible Anpassung des Energieeinsatzes an den Zustand bzw. die Auslastung der Produktion, wobei Produktionssysteme bislang oft auch in Ruhephasen kaum ihren Energieeinsatz reduzieren (vgl. Abele et al. 2015). Diese zu schaffende Flexibilität kann zudem auch für die bessere Anpassung des Energieeinsatzes an die Erzeugung genutzt werden – dies wiederum wird zunehmend wichtiger, da der Anteil erneuerbarer Energiequellen in der Versorgung durch die Energiewende ansteigt (vgl. Behl et al. 2016). Bislang haben Unternehmen allerdings noch kaum aktiv Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung getroffen, vielfach bleibt der Energieeinsatz vorerst eine Unbekannte und wird als Nebensache behandelt (vgl. Schröter et al. 2009). Die Energieeffizienzmaßnahmen, die in den Unternehmen bislang ergriffen wurden, auch durch den Druck seitens der Gesetzgebung, betreffen zumeist technische Maßnahmen – diese sind zum einen mit erheblicher Investition verbunden und zum anderen wurden die einfach zu ergreifenden Maßnahmen teilweise schon ausgeschöpft.

Doch auch die Planung kann erheblichen Einfluss auf den Energieeinsatz eines Produktionssystems nehmen, beispielsweise durch kurzfristiges Lastmanagement aber auch durch gezielte Planungsoptimierung der Produktionsplanung und -steuerung. Diese Maßnahmen, samt dem damit verbundenen Einsparungspotential, sind in der Praxis fast noch gänzlich ungenutzt (vgl. Rager 2008, S. 4). Auf der

Suche nach den Ursachen kommt ein großes, internationales, von der EU gefördertes FP7 Projekt, für das über 106 Experten befragt wurden, zum Ergebnis, dass vor allem geeignete Werkzeuge für die Planung von Energieeffizienzmaßnahmen gebraucht werden und derzeit noch fehlen. Insbesondere IT-Planungswerkzeuge, die eine energiebewusste Planung in der bisherigen Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) verankern, haben großes Potential – eine McKinsey-Studie schätzt den globalen Markt dafür auf 15 Mrd. Euro im Jahr 2020 (vgl. Bunse et al. 2011). Die Notwendigkeit von und Forderung nach Systemen für die Vorhersage und das Management des Energieeinsatzes in der Produktion ist Konsens (vgl. Weinert et al. 2011), allerdings fehlt den Unternehmen vielfach noch das notwendige Wissen sowie die personellen und finanziellen Ressourcen (vgl. Thiede et al. 2012). In Abwesenheit von Planungssystemen, für den Energieeinsatz und die Bewertung von Maßnahmen, stehen somit Aufwand und Investitionen für Energieeffizienz unsicheren Ergebnissen gegenüber (vgl. Alhourani, Saxena 2009). In Übereinstimmung mit den Ergebnissen des EU-FP7-Projektes, gibt es daher in der Fachliteratur die verbreitete Forderung, den Energieeinsatz auch in der PPS zu berücksichtigen (vgl. Rager 2008, S. 4) und noch spezieller, die Energieeffizienz in der Unternehmens-IKT integriert zu berücksichtigen. Hierfür werden simulationsbasierte Ansätze als das Mittel der Wahl angesehen (vgl. Michaloski et al. 2011). Energieeffizienz muss hierbei im Verbund mit den klassischen, wirtschaftlichen Zielsetzungen optimiert werden, um von Unternehmen akzeptiert zu werden.

Diese erste Rundumschau bietet folgende wesentliche Erkenntnisse: Energieeffizienz muss in der Produktion gesteigert werden, um die gesellschaftlich geforderten Nachhaltigkeits- und Umweltziele erfüllen zu können und um Unternehmen einen Wirtschaftlichkeitsvorteil zu ermöglichen. Unternehmen fehlen geeignete Werkezuge, um gezielt Maßnahmen ergreifen zu können und wenn Maßnahmen ergriffen werden, sind es bislang fast ausschließlich investitionsintensive technische Maßnahmen. Die Beeinflussung des Energieeinsatzes von Produktionssystemen durch die Planung birgt ein erhebliches Potential, ist bislang kaum umgesetzt und Planungswerkezuge sowie Methoden hierfür werden dringend gebraucht. Genau dieses Fehlen geeigneter Planungswerkezuge für eine integrierte, energiebewusste Planung eines Produktionssystems soll durch die vorliegende Arbeit adressiert werden. Im folgenden Abschnitt wird aus dieser initialen Problemidentifikation eine übergeordnete Forschungsfrage abgeleitet.

1.2 Übergeordnete Forschungsfrage

Die übergeordnete Forschungsfrage lautet: Wie kann eine Methode für die optimierende Planung und Steuerung der Produktion aber auch der Peripherie, also der Hilfsaggregate, der technischen Gebäudeausstattung (TGA) und des Gebäudes selbst, mit Einbeziehung der Energieeffizienz in das Zielsystem, gestaltet werden? Das Ziel der Arbeit ist demnach die Entwicklung einer leistungsfähigen Planungsmethode zur Erhöhung der Energieeffizienz in der Produktion.

In dieser Arbeit wird die Methoden-Definition der Softwaretechnik genutzt, nach der eine Methode eine „systematische zielgerichtete Vorgehensweise, sowie planmäßiges Verfahren [ist], welches für eine Vielzahl von Problemen zu einer sinnvollen Lösung führt“, beziehungsweise „eingeübte oder formalisierte Abläufe, die sich als zweckmäßig und erfolgreich erwiesen haben“ (Claus 2003) bezeichnet. Die Methode soll prinzipiell unabhängig von einer Softwareimplementierung sein. Gleichzeitig kann aber eine praxisrelevante Validierung und Evaluierung der Methode nur anhand einer, zumindest auf Fallstudienbasis erfolgten, Implementierung erfolgen. Die Optimierungsmethode kann darüber hinaus ebenfalls nur anhand realitätsnaher Anwendungsfälle entwickelt werden, um Aussagen zur Eignung der Optimierung für die praktische Problemlösung erhalten zu können. In diesem Sinn wird also zusätzlich zur Methode auch eine beispielhafte Umsetzung in Form eines softwarebasierten Planungswerkzeuges durch einen Umsetzungspartner erfolgen – letzteres ist möglich, da die vorliegende Arbeit im Rahmen eines Forschungsprojektes[1] erfolgt. Was diese Arbeit nicht beabsichtigt, ist das Aufstellen eines Vorgehensmodells zur Anwendung der Methode bzw. des Planungswerkzeuges. Zwar wird an bestimmten Stellen auf ein grundsätzliches Vorgehen, bspw. zur Modellierung, verwiesen oder dieses auch in Grundzügen skizziert, allerdings erfolgt keine formale Zusammenfassung in Form eines Anwendungskonzeptes oder Leitfadens, da es den Umfang überstiege. Das Energie-Monitoring ist ein weiteres Thema, auf das diese Arbeit nicht im Detail eingeht – zwar sind Energiemessdaten eine wichtige Voraussetzung für planerische Methoden, so auch für diese, allerdings würde eine tiefergehende Betrachtung dazu den Rahmen dieser Arbeit überschreiten.

Eine weitere Präzisierung der hier zunächst grob umrissenen Forschungsfrage wird aus der Bedarfsanalyse abgeleitet (vgl. Kapitel 5), abgeleitet aus einer

---

[1] Projekt Balanced Manufacturing (BaMa), gefördert durch den Klima- Energiefonds und im Rahmen des Programms ENERGY MISSION AUSTRIA; FFG-Projektnummer 840746

vergleichenden Analyse des aktuellen Forschungs- und Entwicklungsstandes und den Anforderungen an die Planungsmethode (vgl. Kapitel 4). Das Forschungsvorgehen dieser Arbeit wird im folgenden Abschnitt skizziert.

1.3 Forschungsmethode und Aufbau der Arbeit

Im Folgenden wird die Forschungsmethode und das Vorgehen dieser Arbeit definiert. Die in dieser Arbeit entwickelte Methode wird von Beginn an auch in Form eines Planungswerkzeugs pilothaft implementiert, damit eine Evaluierung der Methode anhand realistischer Daten und Anwendungsumgebungen erfolgen kann. Die Methode stellt ein Informationssystem dar. Informationssysteme beziehungsweise Informations- und Kommunikationssysteme (IuK) sind komplementäre Netzwerke, die von Menschen genutzt werden, um Informationen zu sammeln, filtern, verarbeiten und zu generieren (vgl. D'Atri et al. 2008). Die verbreitete Ausprägung der IuK, die Computer Informationssysteme beziehungsweise Rechnergestützte Informationssysteme, erfüllen die vorgenannten Aufgaben, als System aus Menschen und Computertechnologie, teilweise automatisch (vgl. Hansen, Neumann 2009, S. 85). Gesucht wird also eine für Informationssysteme geeignete Forschungsmethode, im Bereich der Ingenieurtechnik und der Informationstechnologie, die auf Ergebnisse im Sinne einer praktischen Problemlösung abzielt. In der Evaluierung geeigneter Forschungsmethoden für die dargestellte Anforderung haben sich vor allem die Design Science Research Methodology (DSRM) und das Systematic Combining als geeignet herausgestellt. Design Science (DS) ist ein Ansatz für die Forschung zu Informationssystemen, insbesondere Computer-Informationssystemen, der das Ziel hat, ein Konzept und eine Forschungsmethode in Form eines Prozesses zur Verfügung zu stellen. Dabei sollte das Forschungsziel praxisrelevante Problemlösungen beinhalten. Sowohl das Gebiet der computergestützten Informationssysteme sowie das Forschungsziel der praxisrelevanten Problemlösung treffen auf die Anforderungen der vorliegend präsentierten Forschungsarbeit vollständig zu, daher wurde das DS als Hauptforschungsmethode ausgewählt (vgl. Peffers et al. 2007). Der Forschungsprozess des DS gliedert sich in sechs Schritte (vgl. Peffers et al. 2007):

- Problemidentifikation und Motivation – die Beweggründe für die Forschung und für das Vorgehen werden geklärt, genauso wie die Bedeutung der Ergebnisse
- Definition der Ziele für die erforschte Lösung – hierbei wird die erreichbare Verbesserung bei der Lösung des adressierten Problems in Bezug auf den bisherigen Stand der Technik und Forschung dargelegt

- Design- und Entwicklungsphase – in diesem Abschnitt werden die Methoden und Modelle entwickelt und ihre Struktur sowie Funktionen spezifiziert
- Demonstration – hierfür wird die Methode auf eine oder mehrere Instanzen des Problems angewendet und die Funktionsfähigkeit belegt
- Evaluation – hier wird gezeigt, wie leistungsfähig bzw. gut die entwickelte Methode die Problemlösung unterstützt, wobei auch ein iterativer Verbesserungsprozess beinhaltet sein kann
- Kommunikation – in dieser letzten Phase werden die Ergebnisse der Forschung für relevante Adressaten in Forschung und Praxis präsentiert, insbesondere in Bezug auf die Lösung und ihre Wirkung

Das Konzept des Systematischen Kombinierens bzw. Systematic Combining (SC) ist ein Forschungskonzept für empirische Forschung in komplexen Anwendungsumgebungen, in denen die Forschungsarbeit nicht exakt für die gesamte Forschungsdauer vorausgeplant werden kann. Gründe hierfür sind, dass sich Rahmenbedingungen in der beobachteten Realität im Verlauf der Forschung verändern können und weil die komplexen Systeme nicht von Beginn an hinreichend bekannt sind, um alle relevanten Aspekte schon zum Start der Forschung absehen zu können. Im Kern des SC steht ein Konzept, das die Forschungsarbeit als zwischen den Forschungsgegenständen kombinierende und nachschärfendes Element interpretiert. Wie in Abbildung 1 ersichtlich, befindet sich die Forschungsarbeit zwischen folgenden Komponenten: beobachtbare Realität, ausgewählter Anwendungsfall, Theorie und leitender Rahmen. Dieses Konzept scheint besonders für die Design- und Entwicklungsphase des durch DS vorgegebenen Forschungsvorgehens relevant zu sein. In Abhängigkeit der vorhandenen theoretischen und methodischen Konzepte muss, bezogen auf Fallstudien und auf die realen Fertigungsumgebungen, für deren Problemlösungen das Werkzeug letztlich dienen soll, eine neue Methode entwickelt werden. Hierbei ist Flexibilität in Bezug auf die gefundenen Konzepte, die Anforderungen an die zu entwickelnde Methode und die praktische Anwendung gefragt, um am Ende verwertbare Ergebnisse im Sinne der geforderten Lösungsfindung erhalten zu können. Hierbei sollen Prinzipien des SC Anwendung finden, vor allem der Abgleich zwischen möglichen Konzepten und gestellten Anforderungen, der Anwendungspraxis sowie das Prinzip des beständigen Nach-Ausrichtens der Forschungsarbeit (vgl. Dubois, Gadde 2002).

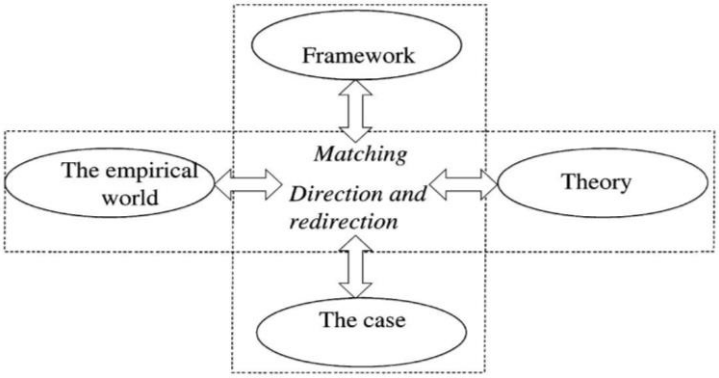


Abbildung 1: Systematisches Kombinieren von Dubois und Gadde (Dubois, Gadde 2002)

Das aus dem DS in Verbindung mit SK erstellte Forschungsdesign dieser Arbeit ist in Abbildung 2 dargestellt.

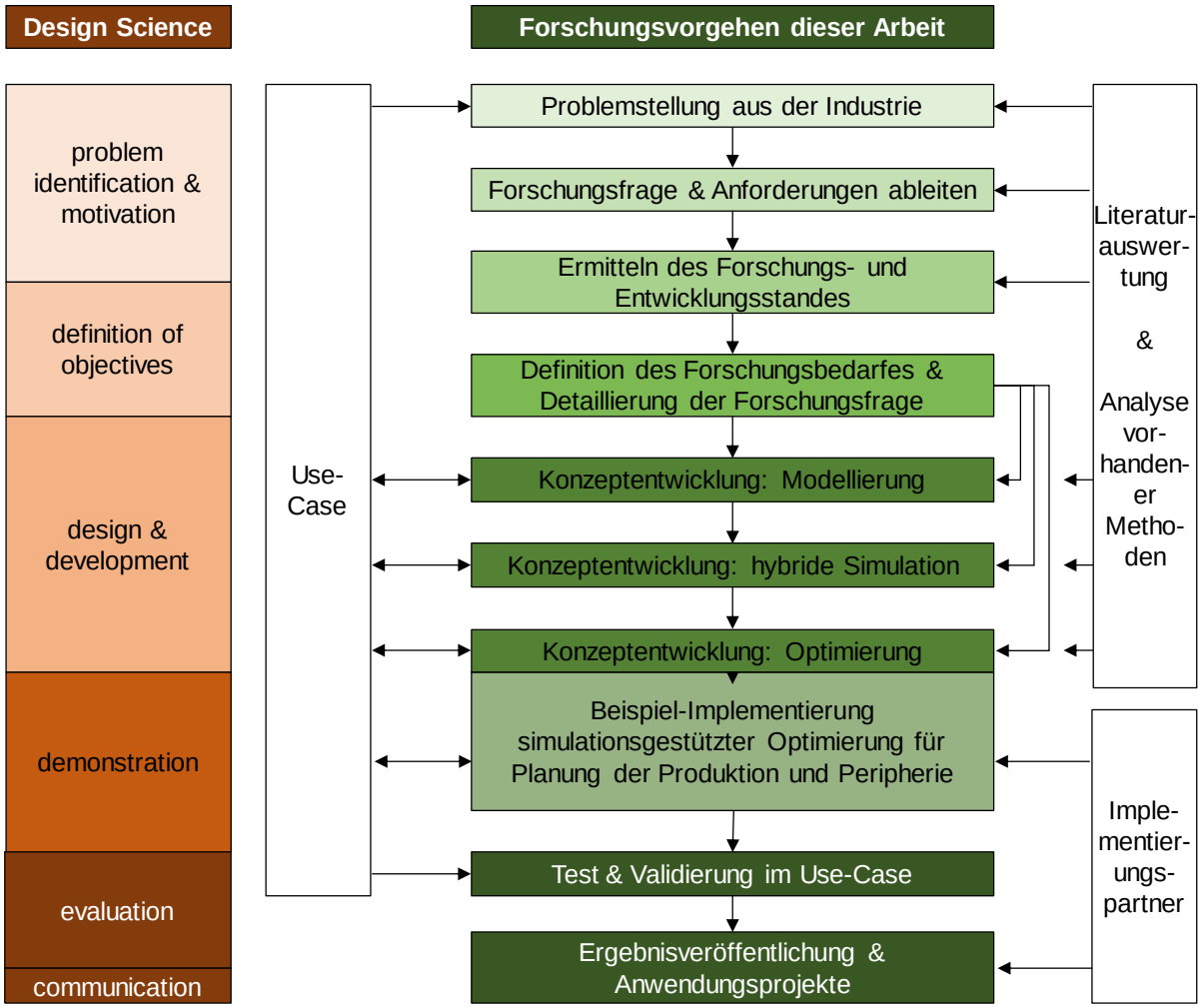


Abbildung 2: Forschungsdesign und Struktur der vorliegenden Arbeit

Auf der rechten Seite ist das Vorgehen dargestellt, dem, mit Ausnahme des zusätzlichen Grundlagenkapitels 2, auch die Struktur der Arbeit folgt, und auf der

linken Seite wird der dazu jeweils korrespondierende Schritt im gewählten Forschungsvorgehen DS aufgeführt. Ebenfalls angeführt sind wesentliche Quellen bzw. Gegenstände der Forschungsarbeit, in Bezug zum Vorgehen. Ein Use-Case als ein wesentlicher Gegenstand der Forschungsarbeit ist in ein Forschungsprojekt eingebettet, in dessen Rahmen wiederum auch die vorliegende Arbeit erstellt wurde. Es handelt sich hierbei um eine industrielle Großbäckerei in Österreich, in der ein komplexes Materialflussverhalten und ein ausgeprägtes thermisch-physikalisches Verhalten vieler Bestandteile des Produktionssystems gegeben sind; somit sind alle wesentlichen Aspekte der in der praktischen Problemstellung auch im Use-Case enthalten. Die Einbindung des Use-Case ist für die Arbeit unterschiedlich: Für die Identifikation der Problemstellung wird nicht nur der Fall der Großbäckerei, sondern Erkenntnisse aus weiteren fünf Use-Cases eines Forschungsprojektes genutzt, die von der Halbleiterproduktion bis hin zum Spezialmaschinenbau reichen. Damit wird eine branchenübergreifende Anforderungsanalyse gesichert. Für die Modellierung und Entwicklung der Simulation wurden ebenfalls mehrere Use-Cases genutzt, obwohl in dieser Arbeit schon die Beispiele aus dem beschriebenen Großbäckerei-Case in exemplarischen Darstellungen genutzt werden. Ab der Entwicklung der Optimierung ist in dieser Arbeit eine Fokussierung auf den Großbäckerei-Case insoweit erfolgt, wie dies für einen exemplarischen Test der Optimierung mit einer konkreten Zielfunktion notwendig ist. Zwar ist die Optimierung auch für andere Anwendungsfälle prinzipiell geeignet, allerdings gibt es Teile der Optimierung, die Use-Case spezifisch sind. Erst im Validierungs-Abschnitt wird vollständig der Test-Case mit seinen Spezifika betrachtet.

Zur Struktur dieser Arbeit: Die Problemstellung wird aus tatsächlichem Bedarf produzierender Unternehmen abgeleitet, ermittelt durch Expertengespräche mit Unternehmensvertretern im Rahmen eines Forschungsprojektes und abgesichert dadurch, dass die Problemstellung auch in der Literatur beschrieben ist, wie in Kapitel 1.1 dargestellt. Wo nicht anders gekennzeichnet, beziehen sich die Expertengespräche auf nicht formalisierte Workshops und Gespräche mit fünf verschiedenen Unternehmen sowie Hintergrundgespräche aus sechs Jahren Projektarbeit im Bereich der Planung in der Produktion mit diversen Unternehmen in Österreich. Für die daraus abgeleitete Forschungsfrage und das Ziel der Arbeit, die Entwicklung einer Planungsmethode, werden daraufhin Anforderungen ermittelt, wobei auch hierbei ein dualer Ansatz verfolgt wird: die aus einer Literaturauswertung ermittelten Anforderungen werden mit konkreten Anwendungsunternehmen im Zuge eines Forschungsprojektes ausgewertet und konkretisiert. Daraufhin wird der aktuelle Entwicklungsstand zu verfügbaren, ähnlich gelagerten Planungsmethoden in Forschung und Entwicklung ermittelt. Aus dem daraus ermittelten Stand wird im

Abgleich mit den zuvor aufgestellten Anforderungen ein Forschungsbedarf abgeleitet. Im Kontext der darauffolgenden Forschungsarbeit wird das Methodenkonzept in drei Stufen ausgearbeitet:

- Zunächst wird eine geeignete Methode zur Modellierung entwickelt,
- daraufhin wird eine dazu passende hybride Simulationsmethode aufgebaut, die in der Lage ist, das für die beabsichtigte Planungsfunktion nötige komplexe Systemverhalten der Produktion abzubilden,
- und zuletzt wird eine für diese Simulation geeignete Optimierungsmethode entwickelt.

Für die Entwicklung des Optimierungsmoduls der Methode wird eine pilothafte Implementierung des Simulationsmoduls für eine spezifische Anwendungsumgebung genutzt, da nur die Entwicklung anhand einer realitätsnahen Optimierungsaufgabe praxisverwertbare Ergebnisse erbringen kann. In der Konzeptentwicklung wird ebenfalls das duale Vorgehen gewählt, für das Methoden und Inhalte aus der Literaturarbeit mit Arbeit in konkreten Anwendungsumgebungen im Rahmen eines Forschungsprojektes verbunden werden. Nachdem das Konzept, also alle drei Methodenbestandteile, erstellt wurden, wird für einen konkreten umfangreichen Anwendungsfall, zusammen mit einem Implementierungspartner im Rahmen des Forschungsprojektes, eine Demonstrator-Implementierung realisiert. Diese Implementierung wird im Rahmen dieser Arbeit nur am Rande beschrieben, indem wesentliche Ergebnisse im Kapitel 7 – Anwendung und Validierung im Use-Case – mit vorgestellt werden. Der Grund hierfür ist, dass die Implementierung im Wesentlichen von Implementierungspartnern geführt wird und der spezielle Inhalt dieser Phase für die entwickelte Methode an sich nicht von erheblicher Bedeutung ist. Die Ergebnisse der Demonstrator-Implementierung nutzend, wird zum Ende die Planungsmethode im konkreten Anwendungsfall getestet, validiert und evaluiert.

Die Struktur der Arbeit folgt dem soeben beschriebenen Forschungsvorgehen, mit der wesentlichen Ergänzung, dass nach dem Einleitungskapitel ein zusätzliches Grundlagenkapitel angeführt ist, in dessen Verlauf Begriffe für die Arbeit geklärt werden und wesentliches, für die Konzeptentwicklung benötigtes, Grundlagenwissen zusammengefasst wird. Innerhalb dieses Grundwissens werden zudem die bislang nur angesprochenen Ziele und Methoden detailliert, sodass nachfolgend eine Detaillierung der Forschungsfrage möglich wird.

2 Grundlagen der Planungsmethode

Die Natur dieser Arbeit, mit einer komplexen Planungsmethode im Kern, bedingt, dass viele Themenbereiche, von technischen – Energie und Energieeinsatz –, betriebswirtschaftlichen – PPS – bis hin zu informationstechnologisch-methodischen – Simulation und Optimierung –, berührt werden. Die Methodenentwicklung muss demnach auf viele Elemente aus diesen Bereichen zurückgreifen. Der folgende Abschnitt klärt für den jeweiligen Bereich die Terminologie im Rahmen dieser Arbeit, stellt wesentliche, relevante Konzepte und Methoden vor und gibt für spätere Abschnitte benötigtes Hintergrundwissen in Kurzform an. Ebenfalls wird, insbesondere zur Energie und Energieeffizienz, Wissen erarbeitet, das für die Präzisierung der Forschungsfrage notwendig ist.

2.1 Energieeffizienz als Notwendigkeit moderner Produktion

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Planungsmethode, inklusive ihrer pilothaften Implementierung, mit der die Energieeffizienz in Produktionssystemen gesteigert werden kann. Im folgenden Abschnitt soll daher zunächst ein Energieeffizienzbegriff für diese Arbeit erarbeitet werden, danach werden grundsätzliche Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz eingeordnet, die Komponente der Energiekosten wird beleuchtet und zum Abschluss dieses Kapitals erfolgt ein Blick auf die relevanten Normen und Gesetze im Zusammenhang mit der Energieeffizienz.

2.1.1 Energieeffizienz

Der Kernbegriff der Energieeffizienzsteigerung ist die Energieeffizienz – der folgende Sub-Abschnitt soll die Begrifflichkeiten klären, die Notwendigkeit der Erhöhung der Energieeffizienz erklären und mögliche Messgrößen der Energieeffizienz vorstellen.

2.1.1.1 Was ist Energie?

Damit in einem Produktionssystem Produkte entstehen können, muss Arbeit an den eingehenden Werkstoffen verrichtet werden – diese Arbeit kann als Prozessablauf verstanden werden, aber gleichzeitig muss auch Arbeit im physikalischen Sinne zugeführt werden. Energie entspricht der Arbeit, die ein physikalisches System verrichten kann – sie kann nur umgewandelt, also nicht erzeugt oder vernichtet werden (vgl. Hesselbach 2012, S. 18). Im Fortlauf dieser Arbeit, wird vielfach von „Energieeinsatz“ gesprochen. Dies bezeichnet die einem System zugeführte Energie zur Umwandlung in Nutzenergie im Prozess, wobei in der Regel ein Großteil der

Energie in nicht nutzbare Energieformen, hauptsächlich die Abwärme, überführt wird. Der in der Praxis oft verwendete „Energieverbrauch“ bezeichnet dabei im Ergebnis dasselbe, der Begriff passt aber weniger treffend zum dahinterliegenden Energieumwandlungsprozess und wird daher hier nicht verwendet. Energie wird in der Regel in einem mehrstufigen Transport- und Umwandlungsprozess, von der in der Natur vorkommenden Primärenergie, über Sekundärenergie für den Transport und Speicherung bis zur Endenergie, umgewandelt. Endenergie ist die Form, in der die Energie den Endverbraucher erreicht. Hier wird die Endenergie dann in die eigentliche Nutzenergie für einen Prozess umgewandelt (vgl. Hesselbach 2012, S. 19). Diese Umwandlungen und Transporte bis zur letztendloch wirkenden Nutzenergie sind verlustbehaftet, das heißt, durchschnittlich 70% der ursprünglich vorhandenen Primärenergie wird auf dem Weg zum Verbraucher in nicht nutzbare Energieformen umgewandelt, wie beispielsweise Abwärme (vgl. Hesselbach 2012, S. 20). Nicht alle Energieformen sind aus Verbrauchersicht gleichwertig, eine Qualitätsbewertung für Energie kann anhand der Entropie, einer thermodynamischen Zustandsgröße, erfolgen: Je weniger Entropie im System ist, desto größer ist der Energieanteil, der in Nutzenergieformen umgewandelt werden kann und nicht als Abwärme in die Umgebung abgeleitet wird (vgl. Hesselbach 2012). Elektrischer Strom hat demnach das höchste Qualitätslevel, Wärme hingegen ein niedriges. Der Begriff Exergie bezeichnet den in andere Energieformen umwandelbaren Teil der Energie – dabei ist die Menge an nicht mehr nutzbarer Energie proportional zur Entropie (Duflou et al. 2012).

Wird Energie betrachtet, die pro Zeiteinheit von einem Prozess zur Verrichtung von Arbeit benötigt wird, entspricht dies der Leistung. Wird der Energieeinsatz eines Prozesses oder auch einer gesamten Fertigung im Zeitverlauf betrachtet, wird also in der Regel der Verlauf der Leistungsabnahme dargestellt (vgl. Haag 2013).

2.1.1.2 Energiesparen als Notwendigkeit

Grundsätzlich gibt es drei wesentliche Gründe für Unternehmen, nach mehr Energieeffizienz zu streben: Der Kostenfaktor Energie, der in Produktionsunternehmen stark zwischen 1% und 60% der Gesamtkosten variiert (vgl. Bunse et al. 2011), die gesellschaftliche Verantwortung für die Umweltauswirkungen und der Druck seitens der Politik und der Gesetzgebung (vgl. Rahimifard et al. 2010). In einer Umfrage im Jahr 2011 gaben 65% der Unternehmen in Deutschland an, eine zunehmende Bedeutung der Energieeffizienz zu erkennen (vgl. Neugebauer 2014, S. 29).

Das Kostenargument ist wesentlich durch die langfristig steigenden Energiepreise begründet, denn die Energiekostensteigerungsrate aller wesentlichen Energieformen liegt seit den 2000er Jahren über der Steigerung der allgemeinen Lebenshaltungskosten (vgl. Thiede 2012, S. 6). Die meisten Prognosen gehen von weiterhin wachsender Nachfrage für Energie aus – die Abbildung 3 zeigt die Zukunftsprognosen der Nachfragentwicklung bestimmter Energieträger.

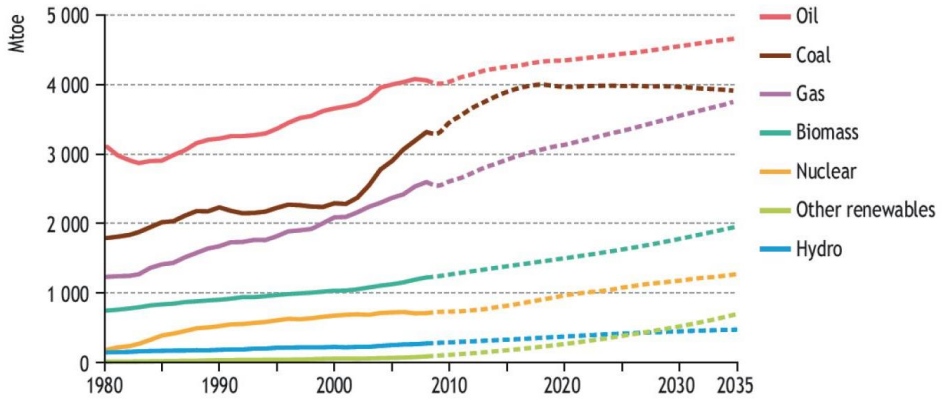
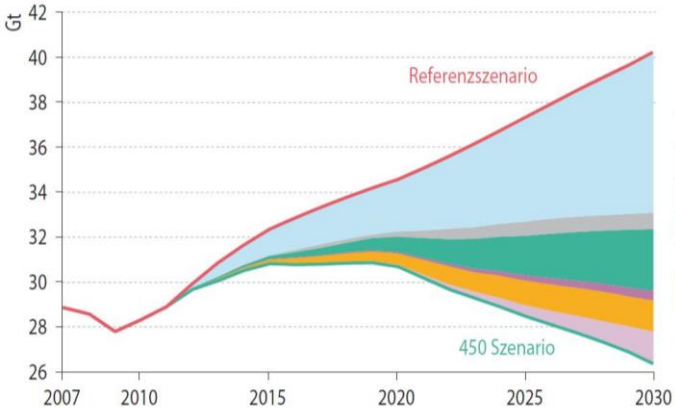


Abbildung 3: Entwicklungsprognose der Energienachfrage nach Energieträgern, nach IEA (Neugebauer 2014, S. 13)

Bezüglich der Nachfrage nach Energie zeigt sich auch, dass fossile Energieträger und insbesondere Kohle zukünftig weniger gefragt sein werden. Dies ist vor allem durch die Politik und Gesetzgebung induziert, die bestrebt ist, die damit verbundenen Treibhausgasemissionen, vor allem CO_2, zu reduzieren, um die Erderwärmungszielsetzungen der internationalen Staatengemeinschaft zu erreichen. Die Verträge von Kyoto 1997 haben erstmals mit dem 20% CO_2‘ Vermeidungsziel bis 2020 quantifizierte Ziele festgelegt, gefolgt von Kopenhagen 2009 (Bunse et al. 2011) und zuletzt Paris (Rogelj et al. 2016), wo ein Erderwärmungsziel vereinbart wurde, das drastische CO_2 Reduktionen und damit eine zunehmende Abkehr von fossilen Brennstoffen als Energiequelle erfordert. Auch das Werkzeug des Emissionshandels schafft Anreize für die Reduktion des Energieeinsatzes, insbesondere aus fossilen Brennstoffen (Junge 2007). Die Abbildung 4 zeigt die für das vereinbarte Erderwärmungsziel von 2° C notwendigen Beiträge nach Prognosen der International Energy Agency (IEA). Demnach müssen über 50% der Einsparung durch höhere Energieeffizienz und davon fast alles auf der Verbraucherseite erreicht werden. Mit dem hohen Anteil des Industrieverbrauches wird der Druck auf die Industrieverbraucher deutlich. Die Energieziele Deutschlands sind noch strenger: hier wird eine Reduktion des Primärenergieeinsatzes von 2008 bis 2020 um 20% und bis 2050 um 50% vorgeschrieben, bei gleichzeitiger Festsetzung einer jährlichen

Energieproduktivitätssteigerung von 2,1% in Bezug auf den Endenergieeinsatz (vgl. Neugebauer 2014, S. 16).



	Ausstoß (Millionen Tonnen CO_2) 2020	2030
Effizienz	2 517	7 880
Endverbrauch	2 284	7 145
Kraftwerke	233	735
Erneuerbare	680	2 741
Biokraftstoff	57	429
Nuklear	493	1 380
CCS	102	1 410

Abbildung 4: Erforderliche Einsparungsbeiträge zur Erreichung des 2° C Erwärmungsziels – basierend auf dem World Energy Outlook des IEA (Neugebauer 2014, S. 13)

Die zweite notwendige Maßnahme ist die angesprochene, und ebenfalls in Abbildung 4 ersichtliche, verstärkte Nutzung erneuerbarer Energiequellen anstatt fossiler Brennstoffe. Die dafür notwendige Entwickelung des Energiemixes der Erzeugung ist in Abbildung 5 dargestellt – ein deutlicher zukünftiger Anstieg der Solarenergie und der Windenergie sind prognostiziert.

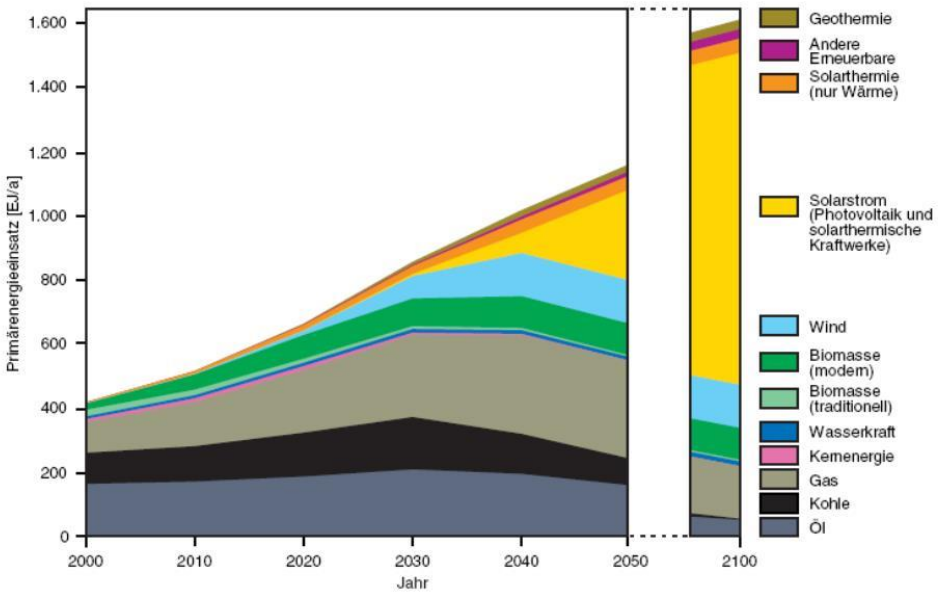


Abbildung 5: Langfristige Energiemix-Entwicklung – Prognose des wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung (Graßl 2003)

Diese Entwicklung hat, nicht zuletzt in Deutschland und Österreich, längst Einzug gehalten, Wind und auch Solarstrom sind fester Bestandteil des Energiemixes. Das

hat Folgen auch für die Verbraucher: Aufgrund der Tageszeit-, Jahreszeit- und Wetterabhängigkeit dieser Energieerzeugungsart, ergibt sich ein zunehmend schwankendes Energieangebot. Daran muss der Verbrauch möglichst flexibel anzupassen sein, insbesondere beim nicht bzw. nur schwer speicherbaren Strom. Das Kapitel 2.1.3 wird diesbezüglich mehr Details vorstellen, aber schon an dieser Stelle kann geschlussfolgert werden, dass diese Flexibilität eine sichere Vorhersage sowie möglichst optimierte Planung des Energieeinsatzes erfordert, und damit genau die Ziele, die auch die Planungsmethode der vorliegenden Arbeit verfolgt.

Neben dem Kostenfaktor und dem politischen und Gesetzesdruck, sehen sich Unternehmen auch zunehmend von einer umweltbewussten Gesellschaft umgeben, der sie nicht zuletzt als Verpflichtung gegenüber ihren Kunden Rechnung tragen müssen. Die Abbildung 6 zeigt, dass neben dem Kostenargument auch Imagegründe zählen, außerdem wird Energieeffizienz als Chance gesehen, einen Innovationsvorteil zu generieren.

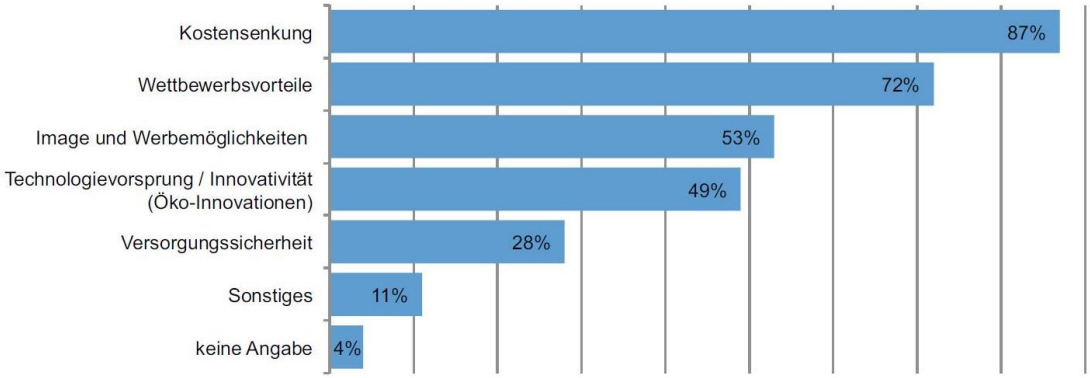


Abbildung 6: Gründe für Ressourceneffizienzsteigerung aus Unternehmenssicht - Befragungsergebnisse (Neugebauer 2014, S. 98)

Während gesamtwirtschaftlich bislang wenige Unternehmen das Thema Energieeffizienz als wichtig erachtet haben, beginnen derzeit zumindest die großen Unternehmen damit, Energieeffizienz in den Managementzielen zu verankern und ein Energiemanagement zu etablieren. Außerdem wird in der extrem energieintensiven Prozessindustrie schon länger ein Planen mit Energie betrieben, aus der Notwendigkeit heraus, die Versorgung zu sichern und aufgrund des extrem hohen Anteils der Energiekosten – aber auch in der logistisch oft komplexeren und weniger energieintensiven Produktion kann Energieeffizienz in der Planung wirken, sobald die notwendigen Werkezeuge zur Verfügung stehen (vgl. Duflou et al. 2012). Dieser Bereich ist aber in der Regel durch Prozessindustrie geprägt, bspw. Aluminium, Stahl- oder Chemie-Werke, die sich deutlich von variantenreicher Stückgutproduktion und ihren komplexen Materialflüssen und oft langen

variantenreichen Prozessketten unterschiedet. Nicht exklusiv, aber vorwiegend sind letztere der Haupt-Adressat der entwickelten Methode.

2.1.1.3 Was ist Energieeffizienz?

Nachdem die Notwendigkeit der Energieeffizienzsteigerung beleuchtet wurde, soll jetzt folgend der Energieeffizienzbegriff für diese Arbeit festgehalten werden. Grundsätzlich ist Energieeffizienz eine Input-Output-Relation: Dem Produktionsoutput wird die für dessen Erzeugung eingesetzte Energie gegenübergestellt (Patterson 1996). Laut Hesselbach beschreibt Energieeffizienz das Verhältnis von Nutzenergie zu eingesetzter Energie (Hesselbach 2012) und nutzt damit eine eher technische Definition, angelehnt an die mehrstufige Energieversorgungskette von der Primär- bis zur Nutzenergie. Eine wiederum strenger auf den Produktionsoutput bezogene Input-Output-Relation ist die Energieproduktivitat, als Quotient aus dem Energieeinsatz und der wirtschaftlichen Leistung (Hesselbach 2012, S. 21), die somit einen Bezug des Energieeinsatzes zur Wertschöpfung herstellt. Eine weitere verwandte Größe ist die Energieeffektivität, die darauf abzielt, die richtigen Prozesse anzuwenden und nicht, wie die Energieeffizienz, nur auf die möglichst energiesparende Ausführung eines gegebenen Prozesses abzielt (vgl. Duflou et al. 2012). Auf höherstehender Betrachtungsebene allerdings, bezogen beispielsweise auf ein gesamtes Produktionssystem in Form einer Fabrik, kann die Energieeffizienz dieses Gesamtsystems durchaus die Energieeffektivität auf darunterliegender Ebene miteinschließen. In dieser Arbeit wird unter Energieeffizienz im Folgenden sowohl die Energieeffizienz wie auch die Energieproduktivität, nach der in Hesselbach gegeben Definition, und auch die Energieeffektivität verstanden. Der Grund ist, dass der Hauptfokus dieser Arbeit auf der positiven Beeinflussung des Energieeinsatzes der Produktion durch Planung und Steuerung liegt. Das kann durchaus auch die Energieeffizienz im engen Sinne betreffen, wenn beispielsweise durch günstige Ansteuerung der technischen Gebäudeausstattung (TGA) ein günstigerer Energiewandlungsprozess zur Erzeugung von Prozesswärme genutzt werden kann, hauptsächlich aber wird es allgemein Einsparungen eingesetzter Energie für die Produktion beeinflussen, und damit eine Wirkung, die über den weiteren Energieproduktivitätsbegriff erfasst wird. Auch die ebenfalls im Ziel der Arbeit stehende Erreichung eines günstigeren Energieeinsatzprofils bzw. Lastgangs der Produktion, z.B. über Vermeidung von Lastspitzen oder ungünstiger Verbrauchsmengen zu bestimmten Zeitpunkten, in Hinblick auf die Versorgungssituation, soll demnach unter den erweiterten Energieeffizienzbegriff dieser Arbeit fallen. Weiterhin ist auch die Verbesserung der energiebezogenen Wirtschaftlichkeit durch Senkung der Energiekosten, bspw. durch einen günstigeren

Energiemix – dieser hat ebenfalls ökologische Vorteile –, inbegriffen. Eine Differenzierung und Qualifizierung der Wirkung der Planung auf den Energieeinsatz wird an gegebener Stelle erfolgen, bspw. im Abschnitt zum Zielsystem und zur Zielfunktion. Der Begriff Energieeffizienz ist deswegen so weit gewählt, um der in der Literatur, hier vor allem englischsprachige Veröffentlichungen, gebräuchlichen Begriffsverwendung zu entsprechen. Gleichzeitig entspricht dies auch dem verbreiteten Verständnis der Begriffe in der Unternehmenspraxis.

Zu den verwandten Größen, die nicht im Fokus dieser Arbeit stehen, zählt die Öko-Effizienz, die einem Produkt oder einer Dienstleistung die durch diese verursachte Umweltauswirkung gegenüberstellt (vgl. Li 2015, S. 16). Zwar schließt das wesentlich die Energieeffizienz ein, jedoch ist der Begriff viel weiter gefasst und umfasst beispielsweise auch die Energiebilanz der Vorprodukte und damit teils sehr komplexe Supply Chains, die im Rahmen der beabsichtigten Methode aus praktischen Erwägungen nicht erfasst werden können. Ebenso kann die Lebenszyklusbetrachtung der Energie (vgl. Linke, Overcash 2012) nicht Ziel dieser Arbeit sein, da auch hierfür Daten erforderlich wären, die derzeit praktisch nicht verfügbar und auch in absehbarer Zukunft nicht standardmäßig zu erheben sind. Die Lebenszyklusbetrachtung schließt die komplette energetische bzw. umweltbeeinflussende Wirkung von Produktion ein.

Miteingeschlossen werden in den Energieeffizienzbegriff dieser Arbeit soll allerdings noch die Energieflexibilität (vgl. Reinhard 2015) – sie beschreibt die Fähigkeit der Produktion, flexibel auf die Energiepreise reagieren zu können, insbesondere auf dem Strommarkt. Dies entspricht der schon im vorgehenden Abschnitt erwähnten Zielsetzung einer flexiblen planerischen Anpassung des Produktionssystems an die variable Energieversorgungssituation, aktuell und noch verstärkt in der Zukunft.

2.1.1.4 Energieeffizienzgrößen

Nachdem das Energieeffizienzverständnis dieser Arbeit geklärt ist, sollen nun geeignete Messgrößen vorgestellt werden. Ein verbreitetes Konzept ist das des Spezifischen Energieeinsatzes (Specific Energy Consumption – SEC), das ein Verhältnis des Energieinput eines Prozesses zu dessen physischen Output beschreibt (vgl. Li 2015, S. 10). Somit entspricht das Inverse des SEC der Energieeffizienz. Bezüglich der Energieeffizienz-Indikatoren lassen sich physikalisch-thermodynamische Indikatoren von ökonomischen differenzieren (vgl. Patterson 1996):

- thermodynamisch: nur auf thermodynamischen Messungen/Daten beruhend, mit dem Vorteil einer objektiven Betrachtung und dem Nachteil, wenig praxisrelevant zu sein, gerade für ökonomisch-technische Entscheidungen
- physikalisch-thermodynamisch: hybride Indikatoren, die einen thermodynamischen Input einem Output in physikalischen Einheiten entgegensetzen, mit dem Vorteil, an die Leistungserbringung aus Kundensicht angelehnt zu sein, aber dem Nachteil, dass das Treffen ökonomischer Entscheidungen in der Regel doch wieder eine Kostenbewertung auch des Energieinputs erfordern
- ökonomisch-thermodynamisch: hybride Indikatoren, die einen thermodynamisch gemessenen Input einem in Marktpreisen bewerteten Output entgegensetzen, mit dem Nachteil, dass die technische Energieeffizienz unbetrachtet bleibt und viele unbekannte Einflussfaktoren, wie Energiemix, Arbeitssubstitution, Sektorenverschiebung, die Aussagekraft erschweren
- ökonomisch: sowohl der Energieinput wie auch der Leistungserbringungs-Output werden in Marktwert bewertet, ein oft für volkswirtschaftliche Betrachtungen genutzter Indikator

Bezüglich ökonomischer Indikatoren ergeben sich Bewertungsprobleme durch die Veränderung des Wertes von Gütern und Energie im Zeitverlauf – für die geplante Planungsmethode aber ist dies kein Problem, da sie zum einen auf eher kurzfristige Zeiträume abzielt und zum anderen die Energiepreisentwicklung aktiv als Inputdaten miteinbezieht. Ein weiteres Problem ist die Frage der Energiequalität, die schon im Abschnitt zur Energiebegriffsklärung vorgestellt wurde: Obwohl in einer rein enthalpischen Betrachtung nicht zu unterscheiden, hat beispielsweise die Heizung mit höher-qualitativer Elektrizität im Gegensatz zu niedriger-qualitativem Gas, erheblich unterschiedliche Wirkungen auf die Umwelt (vgl. Patterson 1996). Eine Möglichkeit, die in der vorliegenden Arbeit genutzt werden soll, ist daher Energie, aufgeteilt in die jeweiligen Energieträger, sowohl bezüglich der Kosten wie auch bezüglich der damit jeweils verbundenen CO_2 Emissionen, zu bewerten. An dieser Stelle soll kurz der Begriff des CO_2-Footprints erläutert werden, da dieser in aktuellen Veröffentlichungen zur Energieeffizienz aber auch in Unternehmen viel diskutiert wird: Der CO_2-Footprint beschreibt für ein Betrachtungsobjekt, zumeist ein Produkt, wieviel CO_2-Emission mit seiner Entstehung und Nutzung verbunden ist, wobei die Betrachtungsgrenze das gesamte Produktleben oder auch nur bestimmte Schritte in der Herstellung umfassen kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird der CO_2-Footprint, im Sinne einer Lebenszyklusbetrachtung oder Bilanzierung der Umweltauswirkung des Energieeinsatzes nicht betrachtet. Der Grund hierfür ist, dass er selbst eine

komplexe Berechnung mit vielen Inputdaten darstellt und die langfristigen Bilanz-Anteile praktisch keinen Einfluss auf die von der Produktionsplanung berührten Stellgrößen hat. In der Planungsmethode wird nur die in der Produktion, und damit in der simulierten Zeit, anfallende CO_2-Emission ggf. als Bestandteil der Zielfunktion für die Planungsoptimierung betrachtet.

Generell hat der beabsichtigte simulationsbasierte Ansatz, der auch das physikalische Verhalten des Produktionssystems berücksichtigt, den Vorteil, dass sowohl technische Aspekte der Energieeffizienz berücksichtigt werden, beispielsweise beim Treffen von Steuerungsentscheidungen, und gleichzeitig im Ergebnis sichergestellt werden kann, dass über ein ökonomisch zentriertes Zielsystem der Gesamtbetrachtung, die Energieeffizienzziele in für die Anwendungs- und Unternehmenspraxis zweckmäßige Balance gebracht werden. Näheres dazu wird in der Entwicklung der Zielfunktion in Abschnitt 6.3.2 vorgestellt.

2.1.2 Möglichkeiten der Energieeffizienzsteigerung in produzierenden Unternehmen

Nach der Klärung des Energieeffizienzbegriffes, inklusive der Darstellung der Notwendigkeit zur Erhöhung der Energieeffizienz in der Produktion, soll im folgenden Abschnitt untersucht werden, wo und wie in der Produktion die Energieeffizienz erhöht und wo Einsparungspotential bezüglich des Energieeinsatzes erschlossen werden kann. Hierbei wird also der Bereich der Stellgrößen für die zu entwickelnde Planungsmethode untersucht.

2.1.2.1 Wo kann der Energieeinsatz gesenkt werden?

Abhängig vom Industriesektor wird 35-60% Einsparungspotential für den Energiebedarf in der Fertigung gesehen (vgl. Bonneville, Rialhe 2006). Zunächst soll ermittelt werden, wo in der Produktion der Energieeinsatz stattfindet und demnach auch, wo die Einsparungspotentiale umgesetzt werden müssen. Grundsätzlich lassen sich Produktionssysteme in mehrere Ebenen einteilen, startend von der Einzelanlage (bzw. dem Einzelarbeitsplatz und Prozessschritt), über die Linie bzw. Anlagengruppe (inklusive ihrer Unterstützungseinrichtungen), die Hallen oder Werksebene (die dann die Technische Gebäudeausstattung (TGA) beinhaltet), bis hin zur Ebene mehrerer Standorte (zunächst in unmittelbarer Umgebung, die also noch energetisch miteinander kommunizieren könnten), und letztlich bis zur Supply-Chain-Ebene (die global Produktionsstandorte miteinander verbindet). Auf jeder dieser Ebenen wird Energie verbraucht und auf jeder Ebene können Planungsentscheidungen mit Einfluss auf den Energieeinsatz getroffen werden (vgl. Duflou et al. 2012). In der vorliegenden Arbeit wird ein Planungssystem für einen einzelnen Standort konzipiert. Prinzipiell wäre es durchaus möglich, verschiedene

Ebenen über das gleiche Grundkonzept einer simulationsbasierten Planung in einer Planungsmethode bzw. einem Planungswerkzeug zu erfassen, mit einem jeweils auf die Ebene angepasstem Detaillierungsgrad und Zielsetzungen sowie Stellgrößen – jedoch ist eine derartige Betrachtung für den Rahmen dieser Arbeit zu umfangreich. Außerdem erfolgt die PPS in der Unternehmenspraxis aktuell vor allem zunächst auf Werksebene, zumindest im beabsichtigten Detailgrad einer kapazitätsorientierten Betrachtung der Fertigung bis auf die Ebene der Einzelanlagen. Daher wird für die vorliegende Arbeit die Werksebene als Planungsebene festgehalten.

Eine Möglichkeit, den Energieeinsatz innerhalb eines Produktionsstandortes zu bilanzieren ist ein Zwiebelschalenmodell. Ausgehend vom Einzelprozess, wird das System in Schichten um den Einzelprozess bzw. die Einzelmaschine herum betrachtet. Ein ähnlicher Ansatz ist im System der Peripheren Ordnung der Produktion von Schenk enthalten (vgl. Abbildung 7), auch hier werden die Verbraucher rund um die Einzelmaschine in Schichten unterteilt.

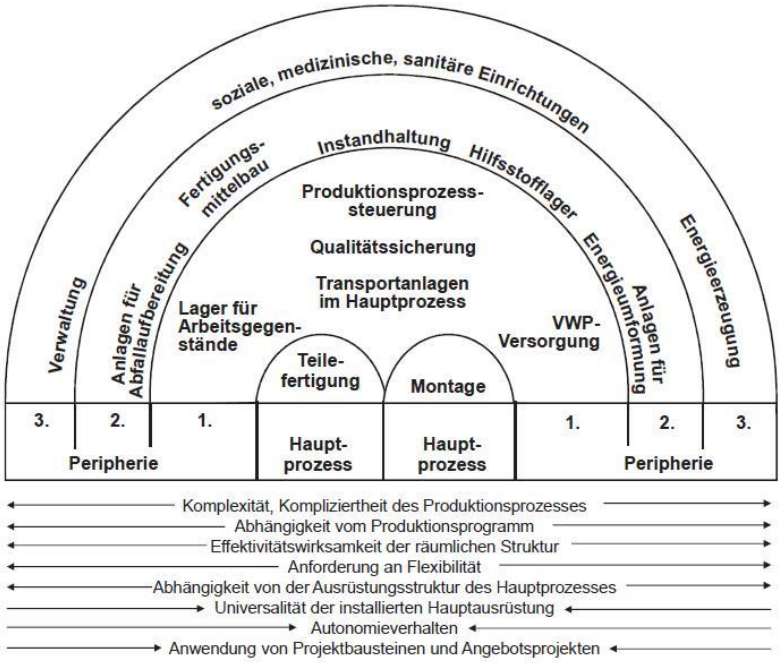


Abbildung 7: Periphere Ordnung der Produktion (Schenk et al. 2014, S. 137)

Die sich aus Sicht des Einsparungspotentials durch Planungsmaßnahmen daran anschließende Frage ist, wieviel des Gesamtenergieeinsatzes eines Produktionssystems auf welche der Ebenen entfällt. Grundsätzlich kann diese Frage nicht generalisiert beantwortet werden, da unterschiedliche Industriezweige stark unterschiedliche Prozesse und damit verbundene Technologie und Anlagen erfordern. Allerdings ist für viele Unternehmen, gerade in der Produktion von Hochtechnologieunternehmen in Mittel- und Westeuropa, zu konstatieren, dass ein

erheblicher Anteil des Verbrauchs in den Bereichen außerhalb des Hauptprozesses anfällt. Die Abbildung 8 zeigt exemplarisch eine Verbrauchsbilanzierung, verteilt auf die Ebenen der peripheren Ordnung eines Produktionssystems. Darin wird ersichtlich, dass etwa die Hälfte des Energieeinsatzes außerhalb des eigentlichen Fertigungsprozesses verortet ist und davon der größere Anteil in der äußersten Schicht.

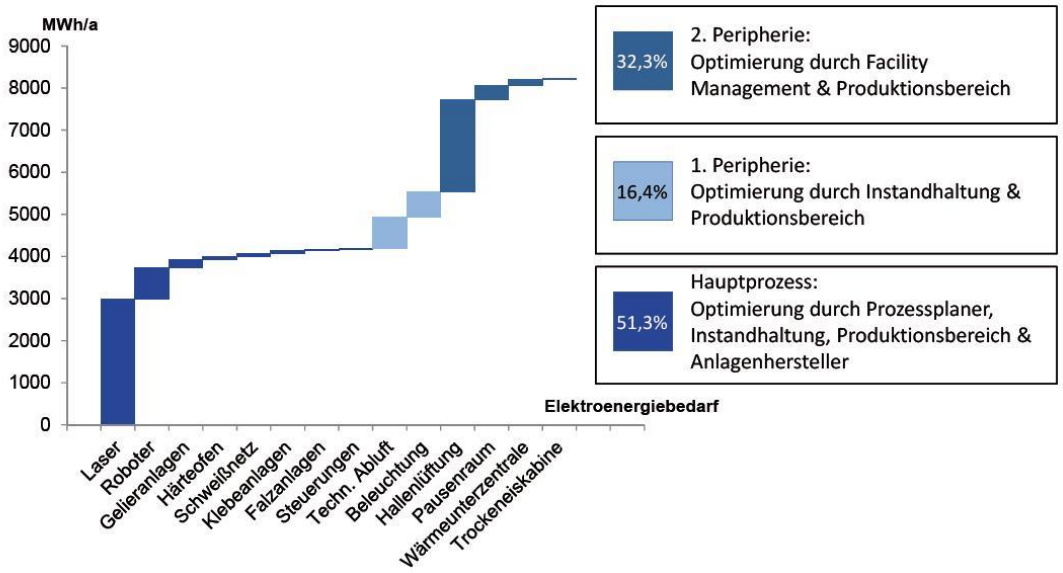


Abbildung 8: Elektroenergiebedarf in der Automobilfertigung, Haag nach Engelmann, 2009 (Haag 2013, S. 20)

Aus Planungssicht und damit aus der Perspektive der vorliegenden Arbeit, ist dies ein Hinweis auf großes Potential vor allem in diesen Peripherieebenen: Während der Hauptprozess und die damit verbundene Technik häufig schon auch energetisch optimiert wurde – allein schon, weil die (wirtschaftliche) Produktivität, als Ziel der Produktionsplanung, in der Regel auch die Energieeffizienz fördert –, werden die Anlagen in der Peripherie in der Regel weitgehend unabhängig vom Hauptprozess gesteuert. Gezielte operative Planung findet hier nur selten statt. Häufig werden Aggregate in der Peripherie entweder auf einen einfachen Regelwert eingestellt, unabhängig davon, ob der Hauptprozess gerade aktiv ist oder nicht und die Anlagensteuerung erfolgt, wenn überhaupt, oft nach Partikularzielen, die nicht auf das Gesamtzielsystem der Produktion abgestimmt sind (Haag 2013). Traditionell gilt der Ansatz, dass die Peripherie nur möglichst fehlerfrei funktionieren muss, eine Abstimmung auf den tatsächlichen Zustand des Produktionssystems, bspw. bezüglich Auslastung, erfolgt in der Regel nicht. Das zeigen auch eigene Expertenbefragungen in am Forschungsprojekt teilnehmenden Unternehmen, in das diese Arbeit eingebettet ist.

Wird der Energieeinsatz auf Anlagenebene betrachtet, ergibt sich ein ähnliches Bild – ähnlich wie auf der Ebenen-Betrachtung, entfällt auch innerhalb der Maschine ein großer Teil der Energie auf Neben- bzw. Hilfsaggregate (vgl. Abbildung 9).

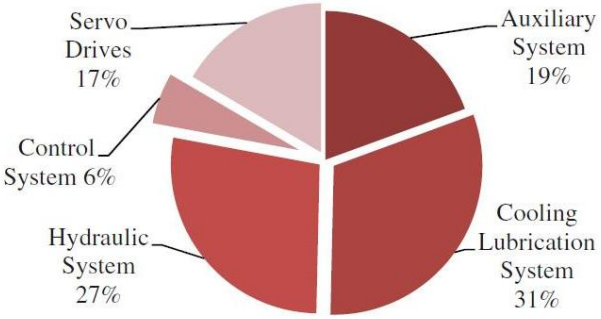


Abbildung 9: Durchschnittliche Aufteilung des Energieeinsatzes von Werkzeugmaschinen (Li 2015, S. 138)

Die Steuerung innerhalb einer Anlage, obwohl sie Potentiale zur Effizienzsteigerung bietet und grundsätzlich auch mit simulationsbasierten Planungswerkzeugen zu erfassen ist, wird nicht Stellgröße der entwickelten Planungsmethode sein. Der Grund dafür ist die Modellkomplexität: die Modellierung bis auf Anlagenkomponentenebene, inklusive der anlageninternen Steuerung, würde den Rahmen der Forschungsarbeit bei weitem überschreiten. Für weitergehende Arbeit kann allerdings der im Rahmen der vorgestellten Forschung entwickelte Simulator auch für eine Abbildung bis hinunter auf die Steuerungsebene innerhalb von Werkzeugmaschinen erweitert werden, da der Simulator alle notwendigen Details abbilden kann – allerdings wäre hier vor allem die Modellierung eine große Herausforderung, genauso wie die Beherrschung der Rechenperformance der implementierten Simulation im dann noch komplexeren Modell als im vorliegenden Fall. Nur etwa 10% des Energieinputs einer Werkzeugmaschine entfällt auf die eigentliche Bearbeitung (vgl. He et al. 2015) und auch innerhalb der Prozessenergie wird nur der geringste Teil für die eigentlich „wertschöpfende“ Spanabhebung aufgewendet. Der Energieeinsatz der Anlagen wird entweder in Energieprofilen hinterlegt oder in vereinfachten Modellen abgebildet (vgl. Kapitel 6.1.1).

2.1.2.2 Wie kann der Energieeinsatz gesenkt werden?

Nach dem oben erfolgten Verorten des Energieeinsatzes in der Produktion und der dadurch möglichen Identifikation grundsätzlicher Hebel, sollen nun folgend grundsätzliche Möglichkeiten der Maßnahmen zur Energieeffizienz-Erhöhung vorgestellt werden, die in weiterer Folge dann auch von der Planungsmethode berücksichtigt werden können. Neugebauer zählt folgende Handlungsfelder zur

Energieeffizienzsteigerung von Produktionsanlagen auf (vgl. Neugebauer 2014, S. 10):

- Substitution durch erneuerbare Energie (Photovoltaik, Solarthermie, Wind- & Wasserkraft, Geothermie, Biomasse/Biogas
- Effizientere/emissionsarme Kraftwerke und Energie-Umwandlungstechnologie
- Energieeffiziente Technologie in Haushalten und Gewerbe
- Effiziente Verfahren und Prozesse in der Industrie
- Planung und Betrieb der Produktion – diese Maßnahmengruppe ist die von der entwickelten Planungsmethode genutzte Stellgröße

Dazukommend ist noch die Energierückgewinnung und Energieweiternutzung zu nennen (vgl. Fuss 2009), die ebenso zu den Stellgrößen der Methode zählt. Alle Handlungsfelder können durch Unternehmen im Rahmen eines Energiemanagements betrachtet werden – im Zuge eines großangelegten EU-Forschungsprojektes wurden die Handlungsfelder des Energiemanagements in Form eines Referenzmodells aufgestellt (vgl. Abbildung 10).

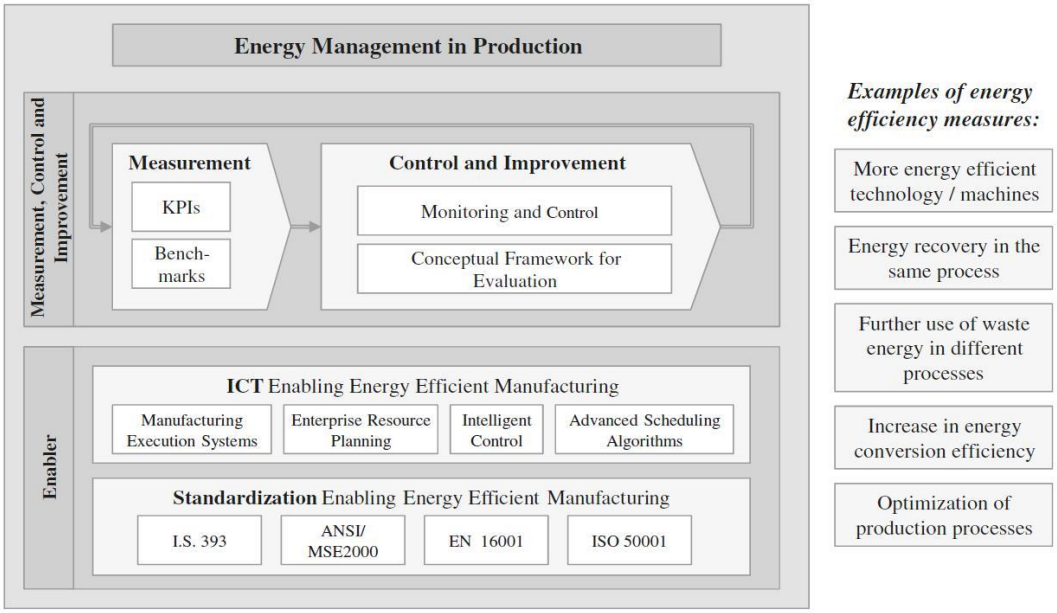


Abbildung 10: Energieeffizienzsteigerung - Energiemanagement in der Produktion (Bunse et al. 2011)

Auch hier sind wieder die eingangs aufgeführten Handlungsfelder bezüglich Technologie und Prozess aufgeführt, verbunden mit einem groben Referenzmodell des Managementprozesses und mit einer Auflistung von Schlüsselkomponenten. Zu den Schlüsselkomponenten werden computergestützte Informationssysteme gezählt, die Energie in den IT Systemen der PPS berücksichtigen, und dazu

Managementmethoden, wie das Energiemanagement nach ISO 50001 – somit gelten Planungssysteme, wie das hier entwickelte, als Instrumente eines umfassenden Energiemanagements der Produktion.

Das System unterschiedlicher Betrachtungsebenen – vorgestellt im vorigen Sub-Kapitel – aufnehmend, sollen nun Maßnahmen in Kurzform zusammengefasst werden: die Einzelprozess-/Anlagenebene, die Ebene mehrerer Maschinen, die Standortebene und die Ebene der Supply Chain. Auf **Einzelanlagen-Ebene** werden zum einen Strukturmaßnahmen gesehen, bspw. besseres Design und bessere, effizientere Komponenten und Technologie, zum anderen werden Maßnahmen im Prozess gesehen, wie die optimale Wahl von Prozessparametern, die Vermeidung von Stillstandszeiten sowie des Standby-Zustands, aber auch eine optimierte Prozessplanung und Prozessauswahl (vgl. Duflou et al. 2012). Die prozessrelevanten Maßnahmen betreffen Stellgrößen, die durch die Planungsmethode dieser Arbeit adressiert werden. Auf Mehrmaschinen-Ebene wird vor allem die Mehrfachnutzung von Energieeinsatz, hier insbesondere die Abwärme-Nutzung, gesehen. Die Kernidee dabei ist, dass die in einem Prozess angefallene Abwärme für einen weiteren Prozess genutzt werden kann und somit ein kaskadierendes System der Energienutzung entsteht (vgl. Duflou et al. 2012). In der Praxis ist dabei zu beachten, dass diese mehrstufige Nutzung technisch begrenzt ist, bzw. der Bereich, in der diese Mehrfachnutzung wirtschaftlich umsetzbar ist.

Die Berücksichtigung der Abwärme-Nutzung ist eines der physikalischen Vorgänge, die im Simulationskonzept im Kern der Planungsmethode abgebildet werden können. Mit der Methode getroffene Planungsmaßnahmen können demnach diese Form der Mehrfachenergienutzung berücksichtigen. Auf **Mehranlagen-Ebene** ist die Prozess- und Produktionsplanung zu nennen, die Auswahl bestmöglicher Prozessvarianten, ebenso wie die Vermeidung von Leistungsspitzen und die Nachtstromnutzung – alle werden auch als Stellgrößen in der Planungsmethode berücksichtigt. Neben der Lastspitzenvermeidung wird auch die Planungsanpassung auf Umgebungsbedingungen genannt, vor allem die Lichtverfügbarkeit, Stromverfügbarkeit und Außentemperatur (vgl. Weinert et al. 2011). Die Abhängigkeit des Energieeinsatzes vieler Prozesse von den bearbeiteten Produkten ist teilweise erheblich. Unterschiedliche Materialen bei der Blechbearbeitung bspw. induzieren in Beispiel-Betrachtungen bis zu 40% Unterschiede im Energieeinsatz (vgl. Reinhard 2015). Entsprechend groß ist das Potential, durch eine optimierte Reihenfolge- und Termin-Planung die Energieeffizienz zu erhöhen – beispielsweise, indem energieintensive Aufträge zu Zeiten hoher Verfügbarkeit selbst produzierten Solarstroms bearbeitet werden. Neben der kurzfristigen Reaktion des Lastspitzen Vermeidens, wird auch die Möglichkeit der Lastverlagerung genannt – dies bedeutet

ein Verschieben von Last in bislang ungenutzte oder bezüglich der Energiekosten günstige Zeiträume durch energiebewusste PPS (vgl. Abbildung 11). Für eine derartige, energiebewusste Planung, muss der Energieeinsatz bis hinunter auf die Anlagenebene erfasst werden (vgl. Weinert et al. 2011).

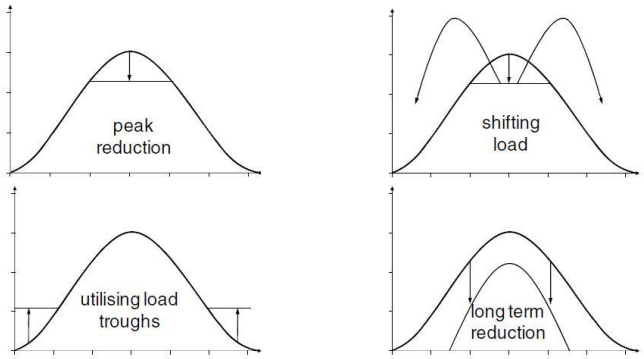


Abbildung 11: Maßnahmen zur Reduktion des Energieeinsatzes in Fabriken (Thiede 2012, S. 33)

Auf **Fabrik-Ebene** werden bislang meist Infrastruktur und bauliche Maßnahmen (z.B. Schnelllauftore, bauliche Isolierung) sowie technische Optimierungsmöglichkeiten genannt, ebenso wie die TGA (z.B. dezentrale statt komplizierte zentrale Versorgung mit Druckluft) (vgl. Duflou et al. 2012). Die Einflussmöglichkeit über die PPS fehlt bislang aufgrund fehlender Planungswerkzeuge. Allerdings, auf der Konzeptebene wird diese Stellgröße, wie vorgestellt, bereits erkannt und ihr großes Potential zugeschrieben. Bislang gibt es auch bei großen Hochtechnologie Konzernen nur eine geringe Korrelation zwischen der Produktionsauslastung eines Werkes und dessen Energieeinsatz. Zwar gibt es Werkzeuge (vgl. Giacone, Mancò 2012), die eine Prädiktion des Energieeinsatzes mittels des Produktionsoutputs vorzunehmen, allerdings ist dies aktuell eher für einfache Einzelprozesse anwendbar – komplexe Produktionssysteme als Ganzes hingegen reagieren aktuell noch sehr indirekt auf Auslastungsschwankungen der Produktion. Hier besteht demnach großes Potential durch angepasste Reglung und Planung des Gesamtsystems (vgl. Flick 2/16/2016). Eine Steuerung der TGA in Abhängigkeit des Produktionszustandes kann beispielsweise eine Heizungs- und Lüftungsregelung, Lichtsteuerung oder Steuerung des Druckluftsystems, angepasst an den aktuellen oder auch zukünftigen Auslastungszustand des Produktionssystems, ermöglichen (vgl. Leobner et al. 2013). Mögliche Maßnahmen auf **Supply-Chain-Ebene** umfassen beispielsweise die „Industrielle Symbiose“, in der Fertigungsstandorte international so genutzt werden, dass eine energieoptimale Gesamtsituation der Wertschöpfungskette entsteht (vgl. Duflou et al. 2012). Ein Faktor hierbei ist die Klimazone und die vorherrschende Außentemperatur: Das Konzept der Klimaeffizienzzonen in der Automobilindustrie hat einen Temperaturbereich von 10-22 °C als ideal identifiziert, da bei

Temperaturen darüber oder darunter entweder aktiv gekühlt oder geheizt werden muss und das für teils sehr große Automobilwerke. Unterschiedliche Orte weltweit eignen sich demnach unterschiedlich gut: San Luis Potosí in Mexiko beispielsweise liegt fast ganzjährig in der Effizienzzone, Shenyang in China nicht. In einer konzernweiten Planung kann diese Information für strategische aber auch planerische Entscheidungen miteinfließen (vgl. Imgrund 2/16/2016). Weitere Stellgrößen auf Supply-Chain-Ebene umfassen vor allem die Logistik, hier ist der Transportaufwand, in Abhängigkeit von Transportlosen, und der Transportmodus beispielsweise relevant für den Energieeinsatz (vgl. Duflou et al. 2012). Das Einsparungspotential für alle Ebenen ist kaum seriös abschätzbar. In der Literatur und Studien finden sich Werte zwischen 20 und 80% –große internationale Veröffentlichungen führen etwa 50% Einsparungspotential an, gemittelt über alle Ebenen (vgl. Bonneville, Rialhe 2006; Duflou et al. 2012). Um den gesamten Energieeinsatz von Produkten zu erfassen werden Methoden wie die bereits erwähnten Lebenszyklusbetrachtungen und Modelle wie das der vollständigen verkörperten Energie eines Produktes betrachtet (vgl. Kara et al. 2010). Derartige Lebenszyklus-Betrachtungen sind allerdings, zumindest bei der derzeitigen Datenlage, nicht geeignet, um im Planungshorizont und im Detaillevel der PPS mit betrachtet zu werden.

2.1.3 Energiepreise und -kosten in der Produktion

Nach den Möglichkeiten der Einflussnahme auf den Energieeinsatz, soll nun die Einflussmöglichkeit über Energiepreise auf die Energiekosten eines Unternehmens betrachtet werden. Strenggenommen, sind die Energiepreise und ihr Einfluss auf die Energiekosten kein Bestandteil der Energieeffizienz, da sie die Menge eingesetzter Energie für das Produktionsergebnis nicht beeinflussen. Die vorliegende Arbeit versteht Energieeffizienz allerdings in einem weiteren Sinn, auch, da das erklärte und von Unternehmen geforderte Ziel eines energiebewussten Planungswerkzeuges die Energieeffizienz nur als ein weiteres Element eines Zielsystems aus ökonomischen und ökologischen Zielen aufnehmen kann. Die reine Erhöhung der Energieeffizienz bedeutete nicht nur ausgelassene Möglichkeiten, da durch eine integrierte Optimierung eines ganzen Zielsystems zusätzliches Verbesserungspotential zu erschließen ist, sondern würde auch von Industrieunternehmen nicht akzeptiert; Kosten- und Wirtschaftlichkeit sind weiterhin die bestimmenden Faktoren für den Erfolg von Unternehmen im Wettbewerb. In diesem weiteren Energieeffizienz-Begriff ist auch die Senkung der mit der Beschaffung und dem Verbrauch von Energie verbundenen Kosten ein Zielbestandteil der Planung: Grundsätzlich besteht ein direkter Zusammenhang zwischen konsumierter Energiemenge und den damit verbundenen Kosten. Allerdings gibt es Optionen für die Industrieverbraucher, bei

der Energiebeschaffung die Energiekosten auch über die Reduktion des Energieeinsatzes hinaus – diese ist ja nicht zuletzt technisch und planerisch begrenzt – zu reduzieren. Eine wesentliche Möglichkeit ist hierbei die Berücksichtigung zeitvariabler Energiepreise. Besonders ausgeprägt und komplex ist dies auf dem Strommarkt, mit einem System aus im Zeitverlauf veränderlichen Preisen. Dadurch, dass elektrische Energie nur schwer speicherbar ist, besteht zudem die Notwendigkeit, die Erzeugung und den Verbrauch dieser Energieform stets anzugleichen (vgl. Neugebauer 2014, S. 163) – dazu kann eine Prognose und Planung des Verbrauches im Kurzfristhorizont beitragen. Genau diese zeitliche Planung des Verbrauches durch die Produktion ist ein wesentliches Ziel des entwickelten Planungswerkezuges. Aus diesen Gründen sollen im Folgenden kurz die Möglichkeiten zur Reduktion der Energiekosten durch Planungsmaßnahmen, aus Sicht der Industrieverbraucher und für die Energieform der elektrischen Energie, zusammengefasst werden. Für andere Energieformen, bspw. Gas oder Fernwärme, ist das Prinzip auch übertragbar, aufgrund der hohen Relevanz für das Planungstool und den transparenten Markt, wird hier der zeitveränderliche Preis am Beispiel elektrischer Energie betrachtet.

Versorgung und Verbrauch elektrischer Energie

Die Stromnachfrage im Bereich Sachgüterproduktion in Österreich steigt, trotz zwischenzeitlichen Einbruchs in der Wirtschaftskrise im Jahr 2008 und der darauffolgend zunächst schwachen Konjunkturentwicklung, mittelfristig an. Gleichzeitig entfallen 45% des Gesamtjahresverbrauches an elektrischer Energie auf diesen Sektor (vgl. STATISTIK AUSTRIA, S. 1). Beides zusammengenommen, steigender Stromverbrauch und ein hoher Anteil des Stromverbrauches durch produzierende Unternehmen, unterstreicht die Bedeutung für Maßnahmen und Methoden zur Steigerung der Energieeffizienz in der Produktion. Die Versorgung wird in Österreich zu 89%[2] aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt – 77% davon aus Wasserkraft und 6,5% aus Windenergie (vgl. E-Control_02, S. 42). Die Energiewende, hin zu erneuerbaren Energiequellen, hat Implikationen für die Versorgungssituation: Diese Energiequellen haben, insbesondere die Wind- und Solarenergie, eine stark zeitlich fluktuierende Energiebereitstellungsmenge. Dadurch werden zukünftig vor allem ad-hoc zu- oder abschaltbare Kraftwerke benötigt, entgegen der bisherigen Dominanz sogenannter Grundlast-Kraftwerke, wie Atom- oder großer Braunkohlekraftwerke, die im Dauerbetrieb eine konstanten

[2] Anteil gekennzeichneten Stroms aus erneuerbaren Energiequellen im Jahr 2014

Energiemenge produzieren (vgl. Sachverständigenrat für Umweltfragen, S. 2). Neben flexibleren Mittel- und Spitzenlastkraftwerken, gibt es auch seitens des Stromnetzes eine Struktur, die eine ausgeglichene Versorgung unterstützen soll. Das europäische Verbundsystem (EV) bspw. soll durch eine gemeinsame Vorhaltung von Reserveleistung die Versorgungssicherheit erhöhen, indem temporäre Engpässe durch internationalen Stromaustausch ausgeglichen werden können – der österreichische EV Teilnehmer ist die Austrian Power Grid (APG), der nationale Netzbetreiber (vgl. Schulz 2015, S. 85). Dennoch wird die Energieversorgung zukünftig durch Fluktuationen in der Bereitstellung gekennzeichnet sein, nicht zuletzt, da der Betrieb der Spitzenlast ausgleichenden Kraftwerke mit höheren Grenzkosten der Energieerzeugung verbunden ist. Unternehmen werden daher davon profitieren, wenn sie in der Lage sind, ihren Energieeinsatz auf die Versorgung abzustimmen. Dafür ist eine Vorhersage und Optimierung des eigenen Energieeinsatzes die Grundvoraussetzung, im Fall produzierender Unternehmen betrifft dies den Verbrauch in Abhängigkeit des Produktionsprogramms. In einer zweiten Stufe können Unternehmen ihre Planung energetisch auf die Versorgungssituation optimieren. Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Planungswerkzeug soll daher die dafür benötigten Energiemarktinformationen mit in die Planungsoptimierung einbeziehen.

Auf der Verbraucherseite werden Unternehmen aktuell in zwei Gruppen unterteilt: Für Verbraucher mit entweder einer jährlichen Verbrauchsmenge kleiner 100.000 kWh oder einer Anschlussleistung kleiner 50 kW werden standardisierte Lastprofile genutzt (E-Control_05 2012). Für die Zukunft wird eine Einführung von Smart Metern als Möglichkeit zur Lastprognose auch für kleine Verbraucher gesehen (vgl. Hinterstocker et al.). Nach der Kurzcharakterisierung der Versorgungssituation auf dem Strommarkt, soll nun die Zusammensetzung des Strompreises geklärt werden, da die Besonderheiten dabei von einer Planungsoptimierung genutzt werden können.

Zusammensetzung des Strompreises

Der Strompreis setzt sich aus folgenden Kosten und Kostenanteilen (Beispiel-Daten für Wien, Österreich, bei 30.000 KWh Jahresverbrauch) zusammen – (E-Control_06 2017):

- **23,5 Netzkosten** bzw. Systemnutzungsentgelte für die Netzbetreiber
- **37,1% Steuern und Abgaben** auf Strom (inkl. EEG-Umlage – Erneuerbare-Energien-Gesetz – bei Strom, Gesetz über Vorrang erneuerbarer Energien)
- **39,4% Energiepreis** für die tatsächlich bezogene Energie

Die Netzbetreiber werden aufgrund der natürlichen Monopolstellung durch eine Kontrollbehörde überwacht, in Österreich durch E-Control. Die **Energiepreise** werden auf Energiemärkten gebildet. Das Wirkprinzip des Marktes erklärt zusätzlich auch den Bedeutungsverlust von Grundlastkraftwerken und die steigende Notwendigkeit, auf eine Versorgung mit erneuerbaren Energiequellen verbrauchsseitig reagieren zu können: Auf den liberalisierten Strommärkten, auf denen über das Markt- bzw. Börsen-Prinzip die Einsatzreihenfolge von Kraftwerken bestimmt wird, ergibt sich über den Merit-Order-Effekt ein Verdrängen fossil befeuerter Kraftwerke durch regenerative Energiequellen (vgl. Roon, Huck 2010).

Die Abbildung 12 zeigt ein Lastgangprofil eines Unternehmens, inklusive des Peaks, der die Höhe des Netznutzungsentgelts determiniert. Der Peak ergibt sich über eine Messung des Lastgangs in Viertelstundenscheiben – die Scheibe mit dem höchsten Energieeinsatz definiert den Peak. Dadurch sind die Abnehmer zu einem Lastspitzenmanagement zur Glättung und Vermeidung von Lastspitzen angehalten. Dies berücksichtigt aber nicht den zukünftig wichtiger werdenden Fakt, zu welchem Zeitpunkt eine Lastspitze auftritt – im Gesamtnetz kann es unter Umständen sogar günstig sein, wenn ein Verbraucher eine Lastspitze zu einem bestimmten Zeitpunkt (des Überangebotes) erzeugen kann. Dies ist bei den Tarifmodellen der Netzkosten noch nicht berücksichtigt.

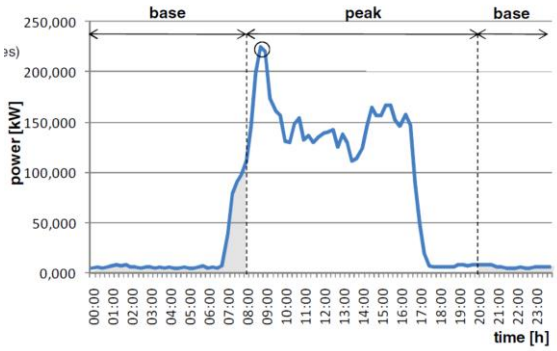


Abbildung 12: Lastgangprofil eines Unternehmens (Thiede 2012, S. 24)

Nach der Klärung der grundsätzlichen Zusammensetzung des Strommarktes erfolgt nun eine kurze Erläuterung zur Preisfindung auf dem Strommarkt, da diese Preise die Eingangsdaten einer möglichen Planungsoptimierung sind.

Energiepreisfindung auf dem Strommarkt

Stromhandel wird von Kraftwerksbetreibern, Energieversorgern sowie energieintensiven Industrieverbrauchern betrieben und wird entweder direkt über die Strombörse oder über bilaterale Verträge im Over-the-Counter-Markt (OTC)

abgewickelt (vgl. E-Control_01, S. 5). Einen Überblick über die Stromhandelsmärkte gibt die Abbildung 13.

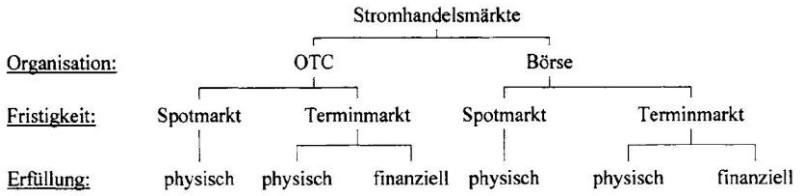


Abbildung 13: Stromhandelsmärkte (Schnorrenberg 2006, S. 20)

Auf den Stromhandelsmärkten gibt es eine Unterteilung in die Strombörse und außerbörslich-bilateralen Over-the-Counter (OTC) Handel. In beiden werden folgende Formen unterschieden (vgl. E-Control_01):

- Terminhandel – hier wird bis zu sechs Jahre im Voraus Energie zu einem gesicherten Preis ver- und gekauft, wobei dies hauptsächlich zur Absicherung gegen ungünstige Sportmarktentwicklungen genutzt wird und die Geschäfte nicht zwingend physisch erfüllt werden müssen.
- Day-Ahead-Markt – hier wird Energie für den nächsten Tag gehandelt (dieser Spotmarkt findet für Österreich börslich auf dem EPEX Spot in Paris oder EXAA, der Österreichischen Energie- und Umweltbörse in Wien statt).
- Intraday-Markt – hier werden in einem noch kurzfristigeren Handel, bis zu 30 Minuten vor der Fälligkeit, Stromlieferungs-Blöcke in einem Fließpreisverfahren gehandelt. Daneben gibt es noch den Regelreservemarkt, auf dem positive oder negative Regelenergie, zum Ausgleich von Unter- oder Überversorgung, gehandelt wird.

Abbildung 14 zeigt einen exemplarischen Spotmarkt-Verlauf über einen Arbeitstag – die Preise schwanken zwischen -40% und +100% um den Durchschnittswert – die potentiellen Vorteile einer gezielten Energieeinsatzplanung in Verbindung mit einer flexiblen Energiebeschaffung werden offensichtlich. Grundsätzlich gilt zudem, dass sich über flexibles Agieren auf dem Spotmarkt in der Regel ein günstigerer Preis für Strom erzielen lässt, als in der langfristigen Beschaffung – allerdings muss hierfür der Energieeinsatz genau geplant werden und es besteht zudem das Risiko, kurzfristig hohe Preise für die bezogene Energie zahlen zu müssen.

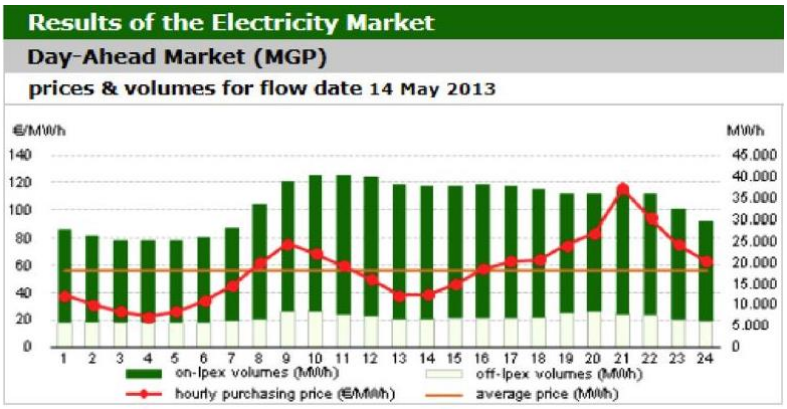


Abbildung 14: E-Energiepreisentwicklung über den Tagesverlauf (Shrouf et al. 2014)

Es bleibt die Frage, ob alle Industrieunternehmen diese Möglichkeit prinzipiell auch nutzen können – dafür soll nun ein kurzer Blick auf die aktuelle Situation der Energiebeschaffung durch Industrieverbraucher geworfen werden.

Energiebeschaffung und Vertragsmodelle

Bezüglich der Netzkosten, in den Netztarifen, gibt es wenig Spielraum, mit der Ausnahme unterbrechbarer Tarife – hier allerdings stehen Mehrkosten für Zähler, Steuerhardware eher geringem Einsparpotential entgegen (Netz Burgenland 2013).

Bei den Stromtarifen hingegen gibt es, je nach Größe des Verbrauchers, unterschiedliche Tarifmodelle – die folgende Einteilung wurde auf Basis von Experteninterviews bei Österreichs Energieversorgern aufgestellt[3]:

- Gewerbekunden, <100.000 kWh: Es erfolgt i.d.R. eine Kombination aus einem fixen monatlichen Grundpreis und einem Verbrauchspreis für die bezogene Energiemenge, ergänzt um Zusatzoptionen wie Nachtstromtarife (diese spezielle Form verliert aufgrund der Energiewende langsam an Bedeutung). Smart Tarife, basierend auf individuellem Verbrauch, erfasst über Smart-Meter, sind noch nicht verbreitet und von Unternehmen aufgrund ungenügender Information und einem als ungünstig betrachteten Nutzen-Aufwand-Verhältnis aktuell auch noch nicht gefragt. Aber: Gemäß § 40 Abs. 5

[3] Die Informationen dieses Abschnitts fußen auf Interviews mit VertreterInnen der Energieversorger Wien Energie, Verbund, MyElectric, Energie AG von Mai bis April 2016. Das ausführlichste Interview darunter ist mit Herrn Kastner der Enamo GmbH – Bestandteil der Energie AG – geführt worden. Darüber hinaus sind noch Interviews mit produzierenden Unternehmen erfolgt, die gleichzeitig Erzeuger und Verbraucher von Energie sind (Miba Sinter GmbH, UPM Kymmene GmbH, Laakirchen Papier AG).

EnWG sind Anbieter dazu angehalten, last-variable oder tageszeitabhängige Tarife anzubieten.

- Businesskunden, 100.000 kWh - 1 GWh: Es erfolgt eine Auswertung des individuellen Lastprofils der Unternehmen und daraus eine Ermittlung eines individuellen Tarifs, aber auf Fixkostenbasis.
- Industriekunden 1 – 15 GWh: Nutzung von Floatern, also ein Ausgangspreis plus eine nachträgliche Anpassung an die Börsenpreisentwicklung, ggf. in Kombination mit Beschaffung in mehreren Tranchen (i.d.R. ab 4 GWh), wird gewählt.
- Industriekunden >15 GWh: Stromhandel, und Portfoliomanagement werden genutzt, also i.d.R. das Abdecken des Basisbedarfs am Terminmarkt und dann die Deckung des Differenzprofils über a) Floater, b) den Day-Ahead-Markt zu Spotmarktpreisen oder c) die direkte Beschaffung von Ausgleichsenergie zu Ausgleichspreisen (bringt mehr Risiko auf dem Regelreservemarkt, aber auch Einsparung des Sicherheits-Preisaufschlags vom Energielieferanten – diese Option erfordert ein kontinuierliches Lastmanagement und ist bislang nur bei Industriekunden >200 GWh üblich.

Zum Ende dieses Kapitels zu den Möglichkeiten der Energiebeschaffung für Strom sollen nun die grundsätzlichen Möglichkeiten der Industrieverbraucher, Energiekosten bei der Energiebeschaffung zu sparen, zusammengefasst werden:

Eine klassische Option ist das **Spitzenlastmanagement** (Selzam 2013), um den Leistungspreis zu minimieren, obwohl das die neueren Entwicklungen durch die Energiewende noch nicht berücksichtigt, denen zufolge nicht mehr bloßes Glätten sondern auch gezieltes, flexibles zeitliches Anpassen der Last belohnt werden sollte, im Sinne eines guten Abgleichs zwischen Erzeugung und Verbrauch. Nur über diesen Abgleich kann die Notwendigkeit zusätzlichen Netzausbaus gemindert werden, der mit hohen Investitionen verbunden ist. Hier ist eine entsprechende Anpassung der Tarife in naher Zukunft wahrscheinlich. Darüber hinaus gibt es verschiedene Ausprägungen des **Portfoliomanagements**. Allen gemeinsam ist das Prinzip, eine bestimmte Energiemenge für die Grundlast auf längerfristigen Märkten (Terminmarkt) einzukaufen und das Differenzprofil mit kurzfristigeren Energieprodukten zu decken, entweder über den Day-Ahead-Handel oder sogar den sehr kurzfristigen Intra-Day-Handel. Die Abbildung 15 zeigt exemplarisch ein mögliches Profil, zugehörig zu einer Stromversorgung mit Portfoliomanagement.

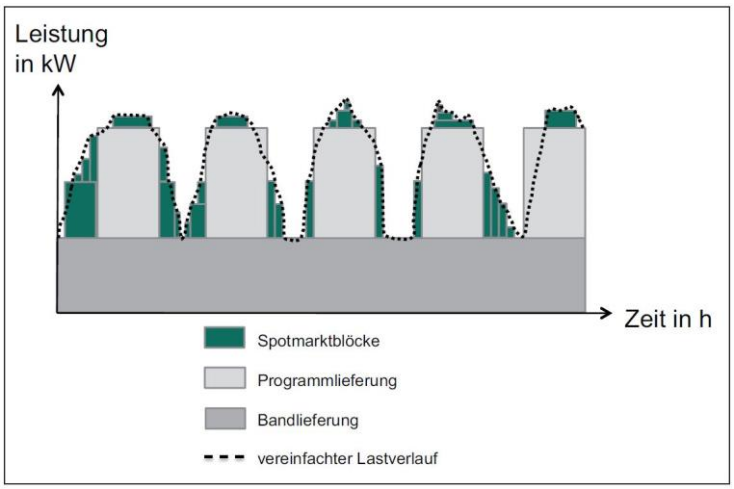


Abbildung 15: Beispielhafte Zusammensetzung des Energieportfolios des Stromeinkaufs (Neugebauer 2014, S. 165)

Industrieverbraucher nutzen bislang verbreitet noch einfache Pauschalmodelle der Tarifgestaltung. Der flexible Handel ist bislang noch dominiert durch große Marktteilnehmer. Aber auch kleinere Erzeuger und Verbraucher können mittelfristig von den Märkten profitieren, wenn zum einen die Regeln und Mechanismen des Zugangs weiter vereinfacht werden und zum anderen die Unternehmen ihren Energieeinsatz genau planen und beeinflussen können. Auch der Regelenergie-Markt, ein flexibleres System aus positiver und negativer Regelenergie, könnte dadurch auch für Industrieverbraucher möglich werden. Insgesamt gilt, dass Industrieverbraucher durch aktives Handeln, besonders auf den Spotmarkt, erhebliche wirtschaftliche Vorteile bei der Energieversorgung erschließen können, sofern sie ihren Energieeinsatz planen können und noch mehr, sobald sie ihren Verbrauch durch gezielte Planungsoptimierung auf die im Zeitverlauf variablen Energiepreise abstimmen können. Die Berücksichtigung eines variablen Energiepreises auf Termin- vor allem aber auf Spotmärkten soll daher Bestandteil des in dieser Arbeit entwickelten Planungswerkzeuges sein. Es geht nicht um eine direkte Kopplung bspw. an Spotmarktdaten, sondern eine geeignete Datenschnittstelle zu variablen Energiepreisen zu schaffen, die von einer Planungsoptimierung als Bestandteil des Planungswerkzeuges dazu genutzt werden kann, die Produktionsplanung gegebenenfalls auf die Marktsituation anzupassen, um Energiekosten zu sparen. Auch die entwickelte Optimierung soll diese Möglichkeit prinzipiell nutzen können. Damit könnte das Planungstool grundsätzlich zukünftig auch für das Energiemanagement in Industrieunternehmen geeignet sein.

2.1.4 Gesetzliche Vorschriften und Normen zur Energieeffizienz

Wenn Unternehmen Energieeffizienz-Maßnahmen ergreifen, also auch die in dieser Arbeit betrachteten planerischen, ordnet sich dies im Unternehmen in das Energiemanagement ein. Im folgenden Abschnitt sollen daher kurz wesentliche gesetzliche Vorschriften und Normen zum Energiemanagement und zur Energieeffizienzsteigerung zusammengefasst werden, da diese einen Rahmen für die beabsichtigte Planungsmethode darstellen.

Seitens der Politik und der **Gesetzgebung** gibt es zum einen das Richtlinien- und Zielpaket für Klimaschutz und Energie, das die Europäische Union im Jahr 2008 verabschiedet hat. Dieses sieht bis zum Jahr 2020 eine Senkung des Energieeinsatzes um 20%, eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien um 20% sowie eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 20% vor (vgl. Neugebauer 2014). Gültig ist diese Regelung für alle Mitgliedsländer. Folgende weitere gesetzliche Anforderungen bestehen (vgl. Neugebauer 2014, S. 16):

- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG): Ausbau Erneuerbarer Energie
- Energieeinsparverordnung (EnEV): erhöhte energetischen Anforderungen an Neubauten ab 2016 mit Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagetechnik bei Gebäuden
- Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG): verpflichtende Anteile Erneuerbarer Energie bei der Deckung des Wärmebedarfes
- EU-Emissionshandelssystem (EU ETS): Abgabepflicht der Stromerzeuger für CO_2-Zertifikate wird im Zuge von Klimaschutzabkommen verschärft werden, es werden also zunehmend weniger Emissionszertifikate verfügbar sein

Diese Gesetze und Vorschriften werden zunehmend die Reduktion des Energiebedarfes, besonders für Unternehmen fördern, bzw. die Emissionen und hohen Energiebedarf verteuern. Dadurch wird der Energieeinsatz für Unternehmen zukünftig eine noch wichtigere Zielgröße werden, da auch die damit verbundenen Kosten steigen. Zusätzlich zu den schon beschlossenen Gesetzen, gibt es den politischen Hintergrund der Klimapolitik, mit Einfluss auf die Energiezeile der Länder. Der 1997 in Kyoto begonnene und in Kopenhagen 2009 und Paris fortgeführte Prozess des Setzens verbindlicher Erderwärmungsziele wird absehbar in einer weiteren Verschärfung der Energierichtlinien münden (vgl. Bunse et al. 2011). Die bislang getroffene Vereinbarung von 20% CO_2-Verminderung bis zum Jahr 2020 reicht demnach nicht aus und muss durch zusätzliche Maßnahmen ergänzt werden, wie in Paris im Jahr 2015 vereinbart. Auch von den Unternehmen wird der in Kyoto begonnene Prozess strenger Klimaziele mit direkten Auswirkungen auf Energieziele

der Industrienationen als bislang verbindlichste und gleichzeitig ambitionierte Verpflichtung der Staaten gesehen (vgl. Imgrund 2/16/2016).

Bezüglich der für Energieeffizienz relevanten **Normen** sind vor allem die EN16001 und die EN ISO 50001 zu nennen. Die EN16001 galt ab 2009 als Leitfaden zum Aufbau eines betrieblichen Energiemanagementsystems, mit dem Ziel der nachhaltigen Steigerung der Energieeffizienz in Unternehmen und wurde 2011 ersetzt durch die EN ISO 50001 (in Deutschland als DIN EN ISO 50001 veröffentlicht). Die EN ISO 50001 ist kompatibel zu Qualitätsmanagement ISO 9001 sowie zum Umweltmanagement-Standard (EMS) ISO 14001 (vgl. Bunse et al. 2011). In Deutschland bietet die implementierte EN ISO 50001 den Unternehmen die Möglichkeit der Begrenzung der EEG-Stromkostenzulage durch das Vorweisen eines Energiemanagementsystems (vgl. Hesselbach 2012, S. 11). Die grundsätzlichen Inhalte eines Energiemanagementsystems werden im Abschnitt 4.1.1 erläutert. Die grundsätzliche Kritik an der Norm ist, dass sie zunächst nur ein Managementsystem darstellt, das Unternehmen vor allem dazu zwingt, eine bestimmte Form einzuhalten und zunächst weniger konkrete Einsparungsziele erzwingt (Bunse et al. 2011). Darüber hinaus gibt es spezielle Normen, bspw. zum Umweltmanagement (EN-ISO 14040 2006) oder zur Ökobilanzierung (EN-ISO 14044 2006) (vgl. Heilala et al. 2008). Diese Normen betreffen allerdings vor allem den über die gesamte Produktlebensdauer auftretenden Umwelteinfluss und fallen somit nicht in die Kernthemen der vorliegenden Arbeit, deren Methode vor allem mit der ISO 50001 kompatibel sein muss.

2.2 Grundlagen zur Planung von Produktion und Logistik

Das Thema der vorliegenden Arbeit fällt grundsätzlich ins Operations Management, also das Design und Management von Produkten, Prozessen, Dienstleistungen und Wertschöpfungsketten (vgl. Thiede 2012, S. 9). In den folgenden Sub-Kapiteln soll eine Kurzcharakterisierung der Produktion und Eigenschaften der für diese Arbeit relevanten Produktionsunternehmen und Produktionssysteme erfolgen, weiterhin folgt eine Kurzzusammenfassung der Planung in der Produktion, ihrer Peripherie sowie der Produktionslogistik.

2.2.1 Produktion und Produktionsunternehmen

Dangelmaier definiert die Produktion als gezielten Transformationsprozess, der Güterinput in einen in einen andersartigen Güteroutput wandelt (vgl. Dangelmaier 2009, S. 1). Nach Nebl ist die Produktion eine gezielte Kombination von Elementarfaktoren, also des Repetierfaktors Werkstoffe (WS) und der Potentialfaktoren Betriebsmittel (BM) sowie Mitarbeiter (MA). Die Repetierfaktoren

müssen dem Produktionssystem ständig neu zugeführt werden, die Potentialfaktoren sind kapazitätsbildend, haben also das Vermögen, Arbeit zu verrichten. Im Prozess der Produktion werden die originären Elementarfaktoren unter gezielter Einwirkung des derivativen dispositiven Faktors produktiv kombiniert (vgl. Nebl 2011, S. 7). Diese Wirkung des dispositiven Faktors umfasst vor allem die Planung und Steuerung der Produktion. Der dispositive Faktor umfasst organisational die Leitung, Planung, Organisation und Kontrolle in einem Unternehmen. Die äußere Struktur der Produktion beschreibt den Transformationsprozess, unter Beteiligung der genannten Produktionsfaktoren, als einen Vorgang mit Eingängen und einem gezielten Output, den Erzeugnissen und Leistungen (Nebl 2011, S. 11). Neben diesen Hauptfaktoren gibt es Hilfs- und Betriebsstoffe, zu denen auch die für den Produktionsprozess, also die Faktorkombination bzw. den Transformationsprozess, benötigte Energie gezählt wird. Zu den Outputs gehört zudem auch der unbeabsichtigte Output, wie der Abfall und die Emissionen, sowie ggf. produzierte Energie. Die wesentlichen Planungsbereiche der Produktion folgen der Makrostruktur: dem Input wird die Beschaffungswirtschaft zugeordnet, dem Output die Absatz-Wirtschaft und dem Throughput die Produktionsplanung. Letztere ist der Fokus dieser Arbeit und beschreibt die Wirkung des dispositiven Faktors (vgl. Nebl 2011, S. 12). Diese Planung der Produktion durch den dispositiven Faktor ist, in Verbindung bzw. Erweiterung der Planung durch die Integration des Energiesystems, der Kern der in dieser Arbeit entwickelten Planungsmethode.

Um die Unternehmen zu charakterisieren, für welche die entwickelte Methode Gültigkeit besitzt, können Betriebstypisierungen verwendet werden, wie sie in vieler Literatur zu Grundlagen der Produktionswirtschaft aufgestellt werden – ein Beispiel zeigt Abbildung 16. In diesen Typisierungen werden Kriterien untersucht, die von der Art der Auftragsauslösung, über die Erzeugnisstruktur bis hin zur Struktur der Fertigung und deren Organisationsform reichen und damit alle wesentlichen funktionalen und strukturellen Merkmale eines Unternehmens zu erfassen versuchen.

	Merkmale der Auftragsabwicklung	Merkmalsausprägung der Auftragsabwicklung				
1	Art der Auftrags-auslösung	Produktion auf Bestellung mit Einzelaufträgen	Produktion auf Bestellung innerhalb von Rahmenverträgen	Kundenanonyme Vorproduktion/ kundenauftragsbezogene Endproduktion	Produktion auf Lager	
2	Erzeugnis-spektrum	Erzeugnisse nach Kundenspezifikation	Typisierte Erzeugnisse mit kundenspezifischen Varianten	Standarderzeugnisse mit Varianten	Standarderzeugnisse ohne Varianten	
3	Erzeugnis-struktur	Mehrteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur	Mehrteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur	Geringteilige Erzeugnisse		
4	Ermittlung Erzeugnis-/ Komponenten-bedarf	Deterministisch auf Erzeugnisebene	Teilweise deterministisch/ teilweise heuristisch auf Komponentenebene	heuristisch auf Komponentenebene	heuristisch auf Erzeugnisebene	Stochastisch auf Erzeugnisebene
5	Auslösung des Sekundär-bedarfs	auftragsorientiert	Teilweise auftragsorientiert/teilweise periodenorientiert	periodenorientiert		
6	Beschaffungs-art	Weitestgehend Fremdbezug	Fremdbezug in größerem Umfang	Fremdbezug unbedeutend		
7	Bevorratung	Kaum Bevorratung von Bedarfpositionen	Bevorratung von Bedarfpositionen auf unteren Strukturebenen	Bevorratung von Bedarfpositionen auf oberen Strukturebenen	Bevorratung von Erzeugnissen	
8	Fertigungsart	Einmalfertigung	Einzel- und Kleinserienfertigung	Serienfertigung	Massenfertigung	
9	Organisations-form	Baustellenfertigung	Werkstattfertigung	Gruppen-/Linienfertigung	Fließfertigung	
10	Fertigungs-struktur	Fertigung mit geringer Tiefe	Fertigung mit mittlerer Tiefe	Fertigung mit großer Tiefe		
11	Kunden-änderungsein-flüsse	Viele Änderungseinflüsse	Gelegentliche Änderungseinflüsse	Wenige Änderungseinflüsse		

Abbildung 16: Betriebstypisierung nach Junge (Junge 2007)

An dieser Stelle soll keine umfangreiche Typisierung erfolgen, da die zu entwickelnde Methode bewusst universell anwendbar sein soll. Dennoch gibt es, alleine schon den Unternehmen folgend, die im Rahmen der Forschung als Fallstudien und Praxispartner zur Verfügung standen, bestimmte Gruppen von Unternehmen, für die eine Anwendung der Methode besonders geeignet erscheint. Auch diese werden anhand von Kriterien der Unternehmenstypisierung charakterisiert: Die Art der Auftragsauslösung ist für den Methodeneinsatz wenig bedeutend, allerdings ist ein Planungswerkzeug umso wichtiger, je mehr auf spezielle Kundenaufträge produziert wird, weil dadurch eine Notwendigkeit zur Flexibilität entsteht. Gleiches gilt für das Erzeugnisspektrum: je mehr Varianten und Optionen und je komplexer das Produkt, umso mehr ist ein Unternehmen auf leistungsfähige, computergestützte Planungswerkezuge angewiesen. Bezüglich der Organisationsform sind grundsätzlich auch alle Gestaltungsvarianten geeignet, allerdings steigt der Aufwand für eine Simulation und Optimierung für eine Werkstattfertigung individueller Produkte drastisch an, so dass der Aufwand für die Planung den Nutzen fallweise infrage stellen kann. Die Art der Erzeugnisse, bspw. Stückgutproduktion oder Prozessfertigung, ist grundsätzlich für die Planungsmethode

unerheblich – allerdings sind alle betrachteten Unternehmen in der Forschungsarbeit Stückgutproduzenten, so dass die Planung und Steuerung sowie die Simulationsmodellierung vorrangig für diesen Typ erfolgt ist. Bezüglich der Produktionslogistik bedeutet dies, dass eher komplexe Materialflüsse betrachtet wurden, sowie diskrete Produkte. Die später entwickelte Planungsmethode folgt demnach auch dem klassischen System der Produktionsplanung, mit Systemen, die Produkte in Stücklisten und Arbeitsplänen beschreiben. Dennoch ist die entwickelte Simulation und Optimierung grundsätzlich auch für die Prozessfertigung geeignet – deren besondere Anforderungen bezüglich Logistik-Logik und Abbildung der Produkte müsste lediglich in der Modellierung zusätzlich berücksichtigt werden. Ein wesentliches, in klassischen produktionswirtschaftlichen Unternehmenstypisierungen nicht erfasstes Kriterium ist der Energieeinsatz des Unternehmens. Auch hier gilt, dass die Planungsmethode grundsätzlich für jeden Typ geeignet sein wird, allerdings ist der für die Planung anfallende Aufwand aus praktischer Sicht viel leichter für Unternehmen mit energieintensiven Prozessen zu rechtfertigen. Die Einsparungs- bzw. Verbesserungspotentiale durch eine leistungsfähige Planungsmethode sind hier deutlich größer und rechtfertigen den zu betreibenden Aufwand.

2.2.2 Planung der Produktion und Produktionslogistik

Grundbegriffe der Produktionsplanung und –steuerung (PPS)

Nachdem der Produktionsgrundbegriff geklärt und die Produktionsplanung grundsätzlich in der Unternehmensstruktur verortet wurde, soll es im folgenden Abschnitt um die Beschreibung der Produktionsplanung und Steuerung (PPS) gehen, die eine der zwei großen Planungsfelder der entwickelten Planungsmethode ist; das andere ist die Planung und Steuerung der Peripherie, die im darauffolgenden Kapitel 2.2.3 charakterisiert wird. Buzacott definiert Planung als *„die gedankliche Vorwegnahme zukünftiger Handlungen, d.h. sie erfolgt nicht unüberlegt, sondern sie wird von Vorstellungen über in der Zukunft liegenden Ereignissen geleitet und in systematischer Weise vollzogen."* (Buzacott 2010, S. 1) Nach dem Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (REFA) ist "Planen […] das systematische Suchen und Festlegen von Zielen sowie von Aufgaben und Mitteln zum Erreichen der Ziele" (REFA 1991, S. 18) und "Steuern ist das Veranlassen, Überwachen und Sichern der Aufgabendurchführung hinsichtlich Menge, Termin, Qualität, Kosten und Arbeitsbedingungen" (REFA 1991, S. 22). Der spezielle Fall der Produktionsplanung und Steuerung ist nach Schuh der Kern jedes Industrieunternehmens, durch den die Ressourcen des Unternehmens auf die Wertschöpfung für den Kunden ausgerichtet werden sollen. Das Ziel der Planung ist die Optimierung des Produktionssystems. Vereinfacht heißt das, mit möglichst

geringem Ressourceneinsatz – Personal, Betriebsmittel und Werkstoffe – möglichst viel nutzenstiftenden Output des Produktionssystems zu erzielen. Nutzenstiftend bedeutet, dass nur der Output generiert wird, der von den Kunden auch nachgefragt und dadurch verkauft wird. Wesentliche Komponenten hierbei sind der zeitliche Verlauf von Nachfrage, Produktion und Einkauf, die im Zuge der Planung bestmöglich aufeinander abgestimmt werden müssen, um das Produktionssystem effizient arbeiten zu lassen. Eine Herausforderung für die Planung ist dabei die Informationsunsicherheit, bspw. bezogen auf die Nachfrage der Kunden oder die Verfügbarkeit von Werkstoffen (vgl. Schuh 2007, S. 11). Eher schon in Richtung einer Unterstützung bzw. Ausführung der PPS mit einem IKT-Werkzeug definiert Westkämper die PPS: "*Produktionsplanung und -steuerung als die EDV gestützte organisatorische Planung, Steuerung und Überwachung der Produktionsabläufe von der Angebotsbearbeitung bis zum Versand."* (Westkämper, Decker 2006, S. 180). Allen Definitionen ist gemein, dass das Planungsobjekt alle im Produktionsunternehmen wesentlichen Produktionsfaktoren umfasst, die insbesondere zeitlich auf eine Kundennachfrage abgestimmt werden müssen. Eine verbreitete Modellierung der Produktionsplanung und Steuerung ist das Aachener PPS Modell, in dem versucht wird, alle wesentlichen Elemente und ihre Zusammenhänge im Gesamtsystem der PPS zu abstrahieren und zu vereinfachen (vgl. Schuh 2007, S. 12). Die Aufgabensicht des Aachener PPS Modells, enthält die für die vorliegende Arbeit relevanten Aufgaben: Die Planungsmethode soll die Planung der Produktion bis auf die Ebene der einzelnen Produktionsaufträge und deren Terminierung, Sequenzierung und Zuordnung zu Arbeitsplätzen und Anlagen optimieren – demnach entspricht der Aufgabenbereich im PPS Modell dem der Eigenfertigungsplanung, ergänzt um Elemente der Produktionsbedarfsplanung. Diese erfolgt in einem kurzfristigen Planungshorizont. In den davorliegenden Phasen der Produktionsprogrammplanung und Produktionsbedarfsplanung erfolgt:

- zunächst eine grobe zeitliche Verteilung des längerfristigen Produktionsprogramms – üblicherweise eine Jahresplanung – unter grober Berücksichtigung der begrenzten Fertigungskapazität (vgl. Schuh, S. 40 ff.),
- gefolgt von einer Auflösung der Bedarfe auf Produktebene, bis in die Ebene der Einzelmaterialien, sowie ein Abgleich mit Lagerbeständen und einer Entscheidung für entweder Zukauf oder Eigenfertigung (vgl. Schuh, S. 42 ff.). Die ebenfalls in der Produktionsbedarfsplanung stattfindende Durchlaufterminierung und Abstimmung benötigter mit vorhandener Kapazität ist bereits Bestandteil der entwickelten Planungsmethode, ebenso wie die gesamte Eigenfertigungsplanung.

In der Eigenfertigungsplanung und Steuerung erfolgt (vgl. Schuh, S. 48 ff.):

- die Losgrößenrechnung, in der Teile zu wirtschaftlichen Gruppengrößen für die Bearbeitung zusammengefasst werden, um den Rüstaufwand und die Nachteile hoher Bestände in ein günstiges Verhältnis zueinander zu bringen,
- die Feinterminierung und die Ressourcenfeinplanung, die sich analog zur Durchlaufterminierung und Kapazitätsabstimmung verhalten, nur detaillierter und für kürzere Planungsperioden erfolgen,
- die Reihenfolgeplanung, welche die Aufträge in der Warteschlange vor jeder Anlage mit dem Ziel einer optimalen Bearbeitungsfolge sequenziert,
- die Verfügbarkeitsprüfung, die eine Ausführbarkeit der ermittelten Planung in Bezug auf die Arbeitsbereitschaft der notwendigen Ressourcen prüft,
- und letztlich die Auftragsfreigabe, die eine Ausführung der Fertigungsaufträge anstößt.

Die von der entwickelten Planungsmethode ausgeführten PPS Aufgaben umfassen also die Terminierung und Sequenzierung von Aufträgen sowie die Zuordnung zu Maschinen und Anlagen. Die Abbildung 17 von Rager ist eine Möglichkeit der grafischen Darstellung des übernommenen PPS-Aufgabenbereiches. Während Ragers Ansatz auf die Maschinenbelegungsplanung (grau hinterlegt) fokussiert, soll die hierin entwickelte Planungsmethode auch die Losgrößen und Fertigstellungstermine sowie die kurzfristige Produktionsprogrammplanung übernehmen und dafür den mittelfristigen Produktionsplan zur Verfügung gestellt bekommen.

Zu den klassischen PPS-Aufgaben kommt noch ein Element aus der Arbeitsplanung hinzu: Obwohl die Arbeitsplanung im Sinne der einmaligen Planungsmaßnahmen im Rahmen der Arbeitsvorbereitung nicht zu den Aufgaben der entwickelten Planungsmethode zählen sollen, wird ein dynamisches Wählen von Arbeitsvorgangsalternativen und alternativen Arbeitsplätzen im Rahmen der Ressourcenfeinplanung mit betrachtet und optimiert.

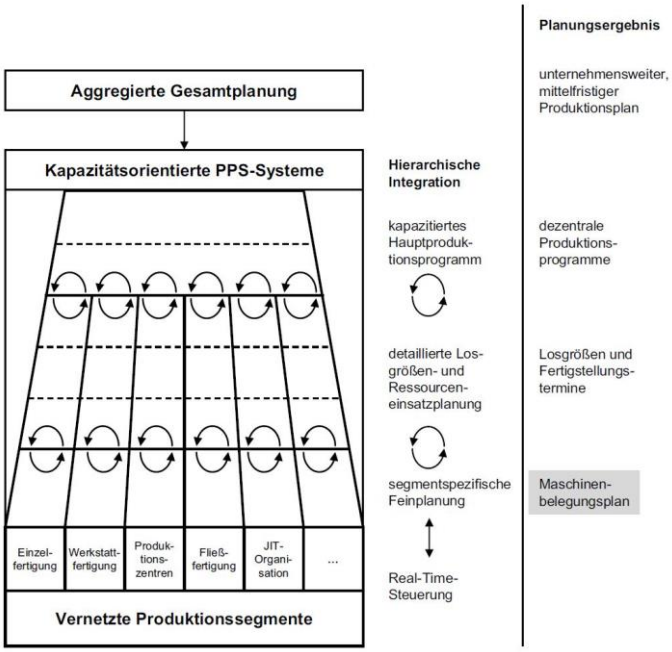


Abbildung 17: mit der Planungsmethode betrachtete PPS Aufgaben (Rager 2008, S. 10)

Die Ausführung der PPS, wie schon in der Definition von Westkämper beschrieben, erfolgt in der Planungspraxis in der Regel in IKT Systemen. Die Abbildung 18 zeigt diese IKT Systeme der Unternehmen in einer Übersicht. Die beschriebenen relevanten PPS-Aufgaben werden von Enterprise Ressource Planning Systemen (ERP) und Manufacturing Execution Systems (MES) ausgeführt. In der Regl erfolgt der wesentliche Teil der Maschinenbelegungsplanung und Feinplanung in den MES.

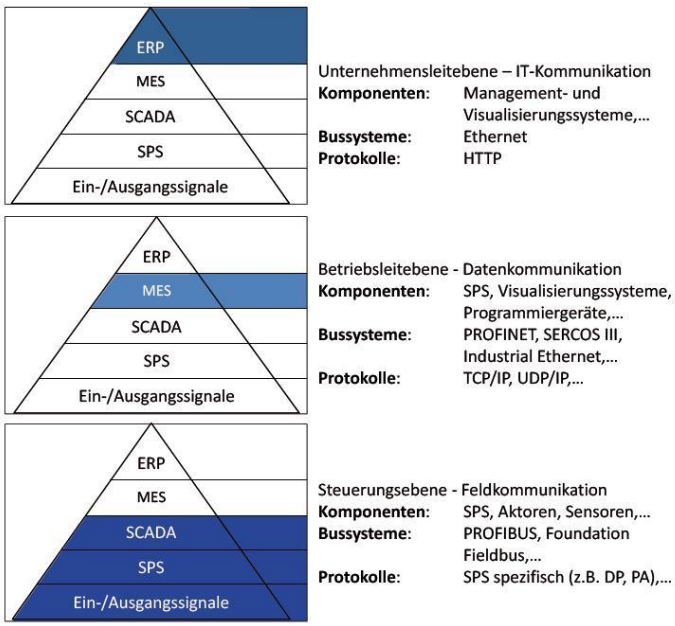


Abbildung 18: Einordnung der PPS in die Betrieblichen Planungssysteme (Haag 2013, S. 44)

Entwicklungen im Bereich der PPS IT-Systeme

Im Kern der IT-Systeme (ERP und MES) für die PPS stand ursprünglich in den 1960er Jahren die Materialbedarfsplanung (MRP), die dann um die Termin- und Kapazitätsplanung im Rahmen des Manufacturing Resource Planning (MRP II) erweitert wurde (Claus et al. 2015, S. 4) und somit eine geschlossene, einheitliche Datenbasis für alle wesentlichen Unternehmensressourcen bieten soll (vgl. Busch 2002, S. 175). Seit einiger Zeit gibt es zudem IT-Systeme, die alle Schritte der Eigenfertigungsplanung integriert vornehmen und dabei ggf. auch Optimierungsalgorithmen einsetzen, um ein bestmögliches Planungsergebnis zu erreichen. Diese Systeme werden verbreitet als Advanced Planning and Scheduling Systeme (APS) bezeichnet (vgl. Stadtler, Kilger 2000; Busch 2002). Energieeffizienz ist derzeit noch kein Planungsziel von PPS Systemen. Im Forschungsprojekt OPUS (Organisationsmodelle und Informationssysteme für einen produktionsintegrierten Umweltschutz) wurde allerdings bereits Bedarf an neuen PPS-Strukturen ermittelt, da der klassische Aufbau aus Stücklisten und Arbeitsplänen für die Energiebetrachtung nicht ausreicht (vgl. Steinaecker, J. von 1999). Auch einige MES bieten bereits Zusatzmodule, die für die Lastspitzenvermeidung eingesetzt werden können – diese erkennen also, ob für bestimmte Anlagen eine Leistungsspitze zu einem bestimmten Zeitpunkt erzeugt würde und verhindert dies durch kurzfristiges zeitliches Verschieben von Aufträgen. Dies ist allerdings keine Planung, sondern nur eine Kurzfristmaßnahme für ein einfaches System bekannter (Groß-)Verbraucher in einer Fertigung (vgl. Kletti 2015, 127 ff.), unter Nutzung determinierten Energieeinsatzes pro Produkt bzw. Auftrag. Daneben entstehen gerade Konzepte für eine Integration von Energieeffizienz in die Planung mit MES (Gerhard 2015).

Die in dieser Arbeit entwickelte Planungsmethode übernimmt, wie beschrieben Aufgaben aus dem ERP und vor allem aus dem MES und dem APS. Wichtig zu betonen ist, dass die Methode kein ein eigenes MES, APS oder gar ERP sein soll oder diese ersetzen kann – vielmehr ist sie dazu geeignet, mit diesen beiden IKT Systemen zu kommunizieren und diese zu unterstützen oder sie kann in diese Systeme integriert werden. Eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus eines Planungssystems mit der Integration der entwickelten Planungsmethode erfolgt in Kapitel 6.1.1.

Zielsystem und Probleme der PPS

Da die entwickelte Planungsmethode Energieeffizienz in das Zielsystem der PPS aufnehmen soll, erfolgt an dieser Stelle eine Kurzcharakterisierung dieses PPS-Zielsystems. Die Abbildung 19 zeigt eine klassische Ausprägung des Zielsystems der

PPS. Die Ziele sind teilweise antagonistisch – bspw. steht die kurze Durchlaufzeit mit hoher Auslastung in Konkurrenz –, somit ist das Gesamtziel der Wirtschaftlichkeit nur als ein Kompromiss zwischen den Teilzeilen möglich.

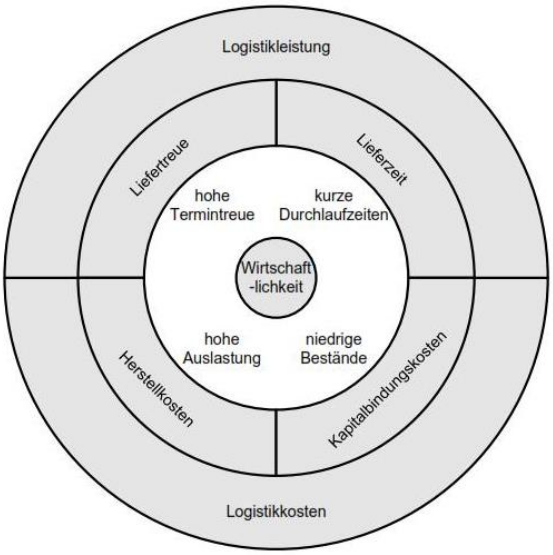


Abbildung 19: Zielsystem der PPS (Junge 2007)

Die beschriebene Kompromissfindung lässt sich besonders gut in den logistischen Kennlinien Nyhis‘ darstellen (vgl. Nyhuis, Wiendahl 2012, 175 ff.) (vgl. Abbildung 20): Ein hoher Bestand sichert eine hohe Auslastung der Anlagen, führt aber zu unerwünschten langen Durchlaufzeiten der Produkte.

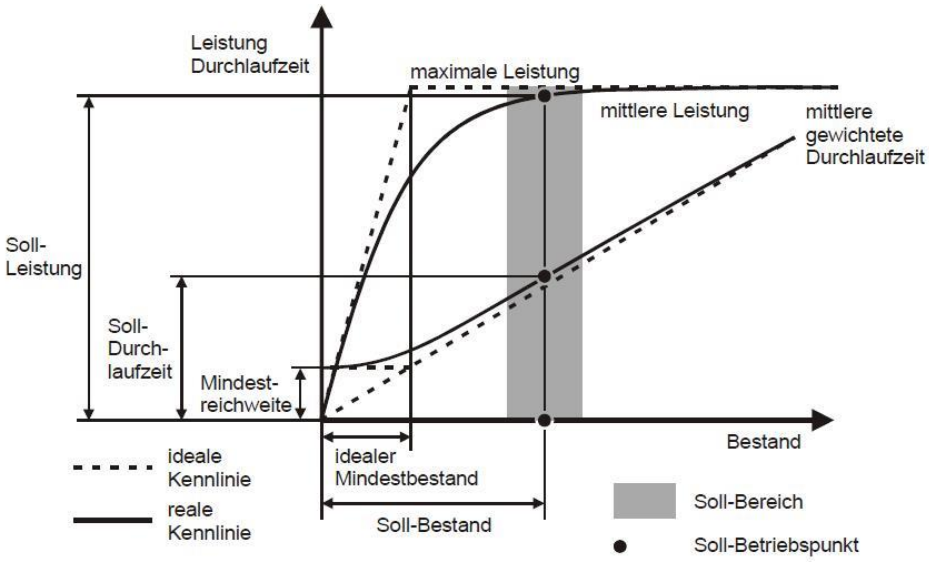


Abbildung 20: Betriebskennlinie in Anlehnung an Nyhuis (Evers 2002)

Das Ziel der Planung ist es, den Bestand möglichst weit zu senken, mit positiver Wirkung auf die Durchlaufzeit, solange bis eine Absenkung der Auslastung der Anlagen einträte, die ebenfalls unerwünscht ist – dieser Punkt ist der Soll-

Betriebspunkt. Das Problem in der Praxis ist, dass die Produktionskennlinien nicht bekannt sind und ihre Ermittlung nur näherungsweise und mit einigem Aufwand erfolgen kann. Der Kompromiss ist naturgemäß auch von den Präferenzen der Unternehmensführung abhängig. In den letzten Jahren hat eine Verschiebung der Zielgewichtung von der Auslastung hin zu kurzen Lieferzeiten, Termintreue und niedrigen Beständen stattgefunden (vgl. Junge 2007). Die entwickelte Planungsmethode wird die Planung gemäß eines vom Unternehmen definierten Zielsystems optimieren.

Logistikplanung

Die Planung der Produktionslogistik erfolgt grundsätzlich im Zuge der PPS. Allerdings wird die Logistikplanung auch in der derzeitigen Planungspraxis der Unternehmen noch oft nachrangig und wenig detailliert geplant, weshalb an dieser Stelle kurz auf dieses Planungsobjekt extra eingegangen werden soll.

Unter Logistik ist hierbei vor allem die Weitergabe, der Transport, die Handhabung und Lagerung von Material zu verstehen. Die schon für die PPS vorgestellten Kennlinien von Nyhuis können in Form von Lagerkennlinien auch für die Planung der Logistik im engeren Sinn genutzt werden. Die Planung mit Hilfe der Kennlinien und klassischen Analysemethoden, wie bspw. der ABC Analyse[4], ist in der Regel eine strategische, mittel- und langfristige Festlegung einer Dispositionsstrategie (Nyhuis, Wiendahl 2012, S. 268) – damit ist sie weniger ein Instrument für die operative Planung, dem Fokus der vorliegenden Arbeit. Das Logistiksystem soll in der Planungsmethode dieser Arbeit integriert mit der PPS sowie der Planung der Anlagen der Produktions-Peripherie erfolgen. Dabei sollen weniger die strategischen Planungselemente eine Stellgröße sein, sondern bspw. eine gezielte Transportsteuerung – die Wahl der richtigen Transportmittel, die Bestimmung optimaler Transportlosgrößen –, sowie ggf. das Wählen günstiger Lagerorte, falls mehrere Optionen zur Verfügung stehen. Um die Komplexität des Systems aber nicht unnötig zu erhöhen, soll, soweit möglich, nicht in den Ablauf bspw. eines chaotischen Lagers eingegriffen werden. Eine derartige Feinsteuerung soll also, ebenso wie die strategische Logistikplanung, keine Stellgröße der Planungsmethode sein. Aus Logistikplanungssicht am wichtigsten für die Planungsmethode wird daher

[4] Die ABC Analyse ist ein Priorisierungsverfahren, das Material bezüglich seines Wert- oder/und Mengen-Anteils in der Produktion bewertet, in Segmente einteilt und die Segmente je nach Priorität unterschiedlich in der Disposition berücksichtigt; oft verwendet mit Erweiterungen, wie bspw. eine Charakterisierung des Verbrauchs der Materialien (XYZ-Analyse) (vgl. Nebl 2011, 242 ff.).

die energetische Berücksichtigung der Logistik in der Simulation sein. Das Optimierungsmodul der Methode nutzt die Simulation als Bewertungsfunktion und kann somit die Planung unter Berücksichtigung der Logistik verbessern – dadurch werden auch Optimierungen möglich, die sonst nur über eine langfristigere Logistikoptimierung zu treffen wären, wie bspw. das Festlegen der Lagerreichweite bestimmter Produkte und Halbfertigprodukte, die in der Planungsoptimierung dynamisch veränderbar sein werden.

2.2.3 Planung und Steuerung der Produktions-Peripherie

Neben der PPS soll die hierin entwickelte Planungsmethode auch die restlichen, für den Energieeinsatz von Produktionssystemen relevanten, Verbraucher erfassen. Diese befinden sich, das Schalenmodell der Produktion nutzend (vgl. Abschnitt 2.1.2.1), in der Peripherie der Hauptprozesse. Darin miteingeschlossen sind auch Hilfsaggregate, die TGA und das Gebäude. Die Regelung der TGA und des Gebäudes erfolgt in der Praxis derzeit fast überall ohne die Kenntnis des aktuellen oder zukünftigen Status der Produktion. Es werden beispielsweise Temperaturschwellwerte versucht zu erreichen oder im Produktionswerk verteilte Anlagen speisen unabhängig voneinander Kälte oder Druckluft in einen oder mehrere Kreisläufe ein, ohne gezielt auf die Produktionsauslastung geregelt zu sein. Eine übergeordnete Regelung und Planung könnte Faktoren wie die Außentemperatur (und deren Prognose), den Zustand der Produktion und die zukünftigen Fertigungsaufträge berücksichtigen. Die Vorausschau und Abstimmung der Anlagensteuerung hat das Potential, den Energieeinsatz zu senken oder ein günstigeres Lastprofil im Zeitverlauf zu erreichen (Martin et al. 2008). Die Ansteuerung der TGA und des Gebäudes, die derzeit losgelöst von der Produktion erfolgt, soll in der entwickelten Methode integriert mit der Produktion geplant und gesteuert werden.

Allerdings erfolgt auch bereits heute eine Planung im Bereich der Peripherie, nur bezieht sich diese in der Regel auf die Konzeptionsphase und nicht auf den operativen Betrieb sowie dessen Optimierung. Die VDI 6020 für die Thermisch-Energetische Gebäudesimulation (TEG) und die Thermisch-Energetische Anlagensimulation (TEA) definiert eine in der Regel stündlich zu aktualisierende Simulation der Gebäudereaktion unter Berücksichtigung äußerer Faktoren wie Klimadaten und Anlagenlasten im Inneren (vgl. Martin et al. 2008). Das Ziel ist die Berechnung des Jahresenergieeinsatzes für die Konzeptionsphase von geplanten oder bestehenden Gebäuden und bspw. die Auslegung der Heizungs- oder Klimaanlagen. Die zweite große Anwendung liegt in der Berechnung der energetischen Auswirkungen architektonischer Maßnahmen, bspw. Designvarianten

oder die Ergreifung von Maßnahmen der Gebäudeertüchtigung – vor allem Dämmung der Gebäudehülle und Dächer – im Zuge des Energiemanagements. Unterschieden werden die statische Simulation und dynamische Verfahren. Während die statischen Verfahren einfach zu bedienen sind, wenig Basisdaten erfordern und für die Planung einfacher, kleinerer Bauvorhaben schnell hinreichend genaue Ergebnisse erzeugen können, sind diese für die realistische Berechnung komplexer Gebäude nicht geeignet. Die dynamischen Verfahren hingegen simulieren auf Basis eines physikalischen Modells, das die Speicherfähigkeit der Bausubstanz berücksichtigt – die Ergebnisse sind, insbesondere für komplexere Bauten, realistischer, allerdings erfordert die Bedienung erhebliches Fachwissen und umfangreichere Basisdaten sowie größeren Modellierungsaufwand. Obwohl die dynamischen Verfahren schon seit Jahren existieren, sind die statischen Verfahren immer noch das dominierende Verfahren in der Praxis (vgl. Gummerer et al. 2000, S. 1). In den dynamischen Programmen, wie TRNSYS, BLAST oder Energy+, werden Gebäude als Systeme von Differentialgleichungen beschrieben. Dabei wird das Gebäude in Zonen unterteilt, die in der Regel Räumen oder Raumgruppen im Gebäude mit ähnlichen thermischen Voraussetzungen entsprechen. Abwärme und Strahlung werden berücksichtigt (vgl. Gummerer et al. 2000, 38 ff.). Die thermisch-energetische Anlagensimulation schließt an die Gebäudesimulation an und berechnet das Verhalten von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen auf Basis der Gebäudesimulation (vgl. Bracht et al. 2011, S. 121). Die TEG und TEA ist demnach für die Konzeptionsphase von Gebäuden und TGA gedacht und bezieht sich in der Regel auf eine längere Betrachtungsdauer, wie beispielsweise ein Jahr. Die Produktion und die durch die Produktionsanlagen entstehende Abwärme wird nur pauschal über den Betrachtungszeitraum abgebildet. Folglich werden die dynamischen Programme derzeit noch nicht für eine Betrachtung in der PPS genutzt, allerdings ist das Kernprinzip, eine physikalisch-thermische Simulation, geeignet, um das Verhalten der TGA und des Gebäudes, also der zu betrachtenden Produktions-Peripherie, realistisch abzubilden. Für die in dieser Arbeit entwickelte Planungsmethode ist die Betrachtung der Gebäudetechnik und des Gebäudes mittels thermisch-energetischer Simulation notwendig, um Wechselwirkungen auch mit dem Materialflusssystem zu erfassen und damit verbundenes Effizienzsteigerungspotential erschließen zu können. Demnach muss die grundsätzlich in Systemen der TEG und TEA verwendete dynamische, kontinuierliche Simulation mit der Simulationsabbildung des Materialflusses und der Auftragsbearbeitung gekoppelt werden. Weiterführende Überlegungen zur integrierten Simulation der Produktion und ihrer Peripherie finden sich im Kapitel 2.3.

2.3 Simulation

Bereits in der Einleitung (vgl. Kapitel 1.1) wurde dargelegt, dass für eine integrierte, energiebewusste Optimierung der Produktion sowie der Anlagen in der Peripherie, die Methode Simulation die geeignetste Option ist, um das komplexe Systemverhalten eines realen Produktionssystems realistisch abzubilden. Die in dieser Arbeit entwickelte Methode basiert demnach auf einer Simulation des gesamten Produktionssystems, von den Hauptprozessen bis zur Peripherie, inklusive einer Energiebetrachtung. Im folgenden Kapitel wird der Simulationsbegriff dieser Arbeit geklärt und es sollen alle wesentliche Simulations-Bereiche für Teilsysteme des Produktionssystems beleuchtet werden, da diese in der späteren Methodenkonzeption aufgegriffen werden.

2.3.1 Simulation – Begriffsklärung

„Simulation ist die Durchführung von Experimenten an einem Modell. Dabei ist das Modell eine abstrahierte Abbildung eines zu untersuchenden Systems, das entweder bereits existiert oder zukünftig entstehen soll.“ (März et al. 2011, S. 13) Ähnlich definiert es auch die VDI-Richtlinie 3633, die dabei noch mehr den funktionalen Charakter herausstellt: Simulation ist das *„Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. […]“* (2008: VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1). Bezüglich der Simulationsausführung definiert die VDI-Richtlinie den einzelnen Simulationslauf als *„die Nachbildung des Verhaltens eines Systems mit einem [...] Modell über einen bestimmten (Modell-) Zeitraum [...], wobei gleichzeitig die Werte untersuchungsrelevanter Zustandsgrößen erfasst und ggf. statistisch ausgewertet werden“* (2008: VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1). Und schließlich die Simulationsexperimente werden definiert als: *„gezielte empirische Untersuchung des Verhaltens eines Modells durch wiederholte Simulationsläufe mit systematischer Parameter- oder Strukturvariation“* (2008: VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1)

Simulation kann bezüglich ihrer Eigenschaften klassifiziert werden in (Law, Kelton 2000, 5 ff.):

- statische oder dynamische Simulation: In der statischen Simulation wird ein System nur zu einem Zeitpunkt betrachtet (z.B. Monte-Carlo-Simulation), während in der dynamischen Simulation das Systemverhalten im Zeitverlauf betrachtet wird (z.B. Ablaufsimulation einer Fertigung).
- deterministische oder stochastische Simulation: In der deterministischen Simulation werden keine zufallsabhängigen Komponenten berücksichtigt,

während in der stochastischen Simulation zufällige Ereignisse und deren Eigenschaften berücksichtigt werden.

- kontinuierliche oder diskrete Simulation: In der kontinuierlichen Simulation werden ständig veränderliche Systemzustände betrachtet (z.B. Differentialgleichungssysteme), während in der diskreten Simulation die Systemzustände nur in bestimmten Zeitpunkten veränderlich sind.

Eine zusätzliche Klassifizierung nach der Art des Ablaufes ist, wie in Abbildung 21 dargestellt, möglich – wichtig ist hier besonders die zusätzlich aufgeführte Eigenschaft der ereignisorientierten diskreten Simulation: die üblichen Simulatoren im Bereich der diskreten Simulation verwenden die Ereignissteuerung (Discrete Event Simulation – DES), es bestimmt also das Auftreten von Ereignissen in Prozessabläufen die Betrachtungszeitpunkte der Simulation.

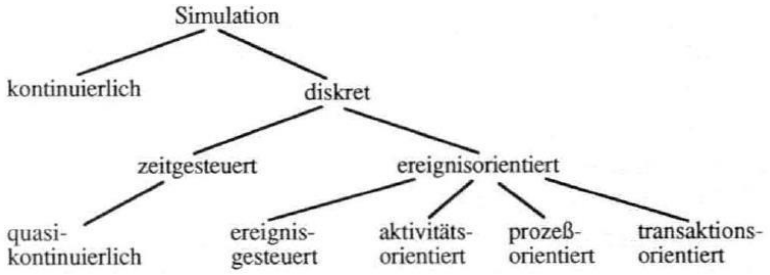


Abbildung 21: Klassifikation der Simulation (Mattern, Mehl 1989, S. 200)

Im Kern jeder Simulation steht das Simulationsmodell als virtuelle Abstraktion des realen Systems, ein wesentliches Element der Simulation ist daher die Modellierung des Simulationsmodells. Nach März umfasst die Modellierung grundsätzliche Modellformalismen, wie Ereignisgraphen oder Petrinetze, über Modellierungssprachen, bis hin zu anwendungsorientierter Simulationssoftware mit spezifischen Bauteilbibliotheken (vgl. März et al. 2011, S. 16). Einen Überblick über diese Modellierungskonzepte gibt Wenzel (vgl. Wenzel 1998, S. 38). Der Grundsätzliche Ablauf einer Simulation, der auch für die Simulation in dieser Arbeit gültig ist, stellt sich wie folgt dar (vgl. Banks 1998, 15 ff.):

- Problemformulierung (konkretes, zu lösendes Problem aus der Praxis wird beschrieben)
- Zieldefinition und Projektplan (exakte Ziele des Simulationseinsatzes inklusive der Art der Messung der Zielerreichung werden definiert)
- Modellkonzeption (Abstraktion des realen Systems wird erstellt, Detaillevel und Funktionsprinzipien werden festgelegt)
- Datensammlung und Aufbereitung (Aufbereitung der Datenbasis der Simulation)

- Modellimplementierung (Umsetzung des konzeptionellen Modells in einer Simulationsumgebung)
- Verifizierung (Überprüfung, dass das implementierte Modell das Verhalten des konzeptionellen Modells korrekt abbildet)
- Validierung (Überprüfung, dass das konzeptionelle Modell das Verhalten des realen Systems korrekt abbildet)
- Experimentplanung (definieren der notwendigen Simulationslaufe zur Erreichung des Ergebnisses)
- Simulationsläufe und Auswertung (Ausführung der Simulation inkl. Analysen und ggf. Anpassungs-Schleifen)
- Dokumentation, Maßnahmenplanung, Umsetzung (Nutzung der Simulationsergebnisse).

Zum Ende der Begriffsklärung soll noch der grundsätzliche Einsatzbereich der Simulation in der Planung geklärt werden: Immer wenn ein komplexes System aus Ziel-, Stell- und Störgrößen vorliegt oder bzw. und die Anzahl der Systemkomponenten ein komplexes Systemverhalten im Zeitverlauf ergibt oder bzw. und stochastisches Verhalten von Elementen auftritt, kann dies über analytische Verfahren nicht sinnvoll bewältigt werden. Simulation ist in diesen Fällen eine bewährte Methode der Entscheidungsunterstützung für Planer (vgl. März et al. 2011, S. 10).

Der Leistungsfähigkeit der Methode Simulation steht dabei der vergleichsweise hohe und nur schwer im Vorhinein abschätzbare Aufwand für den Einsatz in der Praxis entgegen. Eine Standardisierung der Modellierung oder ein Anlegen einer wachsenden Modellbibliothek für wiederkehrende Anwendungsfälle kann hierbei helfen, durch Wiederverwendbarkeit von Modellen und zur Verfügung stellen von Referenzlösungen, diesen Aufwand besser abschätzbar zu gestalten sowie diesen zu reduzieren (vgl. März et al. 2011, S. 5). Eine wesentliche Umsetzung der Standardisierung und Vereinfachung stellt die Objektorientierte Simulation (OOS) dar. Sie bildet das Verhalten interagierender Objekte im Zeitverlauf ab. Dabei werden Objektbibliotheken erstellt, die Objektklassen mit bestimmten Eigenschaften enthalten – diese wiederverwendbaren Objekte können kombiniert werden, um ein Gesamtsystem zu modellieren. Die Hauptvorteile der OOS liegen in der Erweiterbarkeit und Wiederverwendbarkeit von Modellen sowie der dadurch erreichten Vereinfachung der Simulationsmodellierung. Wesentliche Eigenschaften der OOS sind die Möglichkeit der Kapselung und Vererbung, die es ermöglichen, Modelle aus Grundbestandteilen (Klassen) aufzubauen und diese ggf. anzupassen. Der hierarchische Aufbau eines OOS beginnt mit einer Programmiersprache wie C++

im Kern, mit der grundsätzliche Objektklassen beschrieben und in Bibliotheken gesammelt werden. Daraus werden Simulationsklassen und Simulations-Modellierungs-Pakete erstellt, aus denen wiederum komplexe Simulationsmodelle zusammengesetzt werden können (vgl. Banks 1998, 397 ff.).

Für eine Praxisanwendung ist weiterhin der Detaillierungsgrad der Simulation entscheidend: Details bedeuten Aufwand in der Datenaufbereitung, der Modellierung und der Simulationsausführung (Rechenzeit) – daher sollte das Detaillevel der Modellierung der gewünschten Aussage und Komplexität des realen Systems angepasst werden (vgl. Banks 1998, S. 6). Die Datenaufbereitung repräsentiert in der Praxis den Großteil des Aufwands einer Simulationsstudie und gleichzeitig eine entscheidende Komponente, denn ein Planungsergebnis einer Simulationsstudie kann nur so gut sein, wie die Qualität der Basisdaten es erlaubt. Daher gilt es nur mit verlässlichen Daten zu arbeiten und das Detaillevel der Simulation an die Datenqualität anzupassen, um keine Scheingenauigkeit und unverlässliche Planungsergebnisse aus der Simulation zu riskieren.

2.3.2 Materialflusssimulation

Nach der Begriffsklärung sollen nun die für die zu entwickelnde Planungsmethode relevanten Simulationsdomänen beleuchtet werden. Die erste wesentliche Simulations-Komponente betrifft die für die entwickelte Planungsmethode notwendige Simulation des Produktionssystems, hinsichtlich des Materialflusses, der Auftragsbearbeitung und der damit verbundenen Prozesse, sowie der Steuerungslogik des Gesamtablaufes, inklusive der Zuordnung von Aufträgen zu Fertigungsressourcen (Potentialfaktoren); diese Anwendungen sollen im Folgenden unter der Simulation des Materialflusses verstanden werden. Hinsichtlich der Planungsdomänen betrifft die Materialflusssimulation das Kapitel der PPS (vgl. Abschnitt 2.2.2). Die Simulation der Produktion im Hinblick auf den Materialfluss ist eine der Hauptanwendungsgebiete von DES (vgl. Banks 1998, S. 535). Die Simulation für Zwecke der PPS unterscheidet sich von der Planungslogik der Planung gegen begrenzte Kapazität (Finite-Capacity Scheduling (FCS)), die bspw. in den MES und APS Systemen eingesetzt wird: Während die Prozesse im FCS sehr stark vereinfacht und deterministisch betrachtet werden – im Wesentlichen erfolgt das Verschieben fester Planzeitblöcke in einer virtuellen Plantafel –, werden in der Simulation, je nach Modelldetail, stochastische Einflüsse, eine Vielzahl von Einflussgrößen und Systembestandteile, wie der Transport und die Materialhandhabung, mit betrachtet. Dadurch ergibt sich das genaue Verhalten des Systems in der Simulation erst aus dem Ablauf der Simulationsläufe. Der Vorteil ist, dass eine realistischere Abbildung der Realität erfolgt und somit auch eine größere

Anzahl an Stellgrößen mit betrachtet werden kann, sofern die Simulation für die Planung des Produktionssystems genutzt wird (vgl. Banks 1998, 677 ff.). Die Ziele der Simulation im Materialflussbereich reichen von der Auslegung von Fertigungsanlagen, dem Finden von Engpässen, der Prognostizierung von Entwicklungen, über die Planungsabsicherung, die Steuerung und Planung der Produktion, der Kapazitätsplanung, der Losgrößenoptimierung, bis hin zur Dimensionierung von Transport- und Lagersystemen, sowie der Simulation und Programmierung von Robotern (vgl. Banks 1998, 520 ff.). Der Einsatz kann sowohl auf Einzelkomponenten, Anlagen oder ganze Standorte oder Standortsysteme und Wertschöpfungsketten bezogen sein, wobei jeder Fall mit einer angepassten Modellierung umgesetzt würde.

Folgend wird kurz das Grundprinzip und der Aufbau einer Discrete Event Simulation (DES) zusammengefasst, da diese Simulationsdomäne eine der beiden für die zu entwickelnde Planungsmethode benötigten Bereiche darstellt: In der DES werden Zustandsänderungen des Systems beim Eintritt von Ereignissen abgebildet (vgl. März et al. 2011, S. 14). Das Ablaufverhalten kann in folgende grundsätzliche Zusammenhänge zusammengefasst werden: Die Statusvariablen der DES ändern sich nur zu diskreten Zeitpunkten, an denen Ereignisse stattfinden, die wiederum als Folge von Aktionen und Verzögerungszeiten auftreten. Die Statusvariablen sind alle den Zustand eines Systems beschreibenden Größen. Weitere Kernbestandteile der DES sind Entitäten und Ressourcen: Entitäten sind bewegliche oder statische Bestandteile des Modells. Ressourcen sind das Äquivalent von Repetierfaktoren – sie repräsentieren Kapazitäten, wie bspw. Maschinen, Mitarbeiter oder Transportmittel. Falls Entitäten um Ressourcen konkurrieren, werden Warte-Schlangen gebildet. Entitäten können während Aktionen und Verzögerungszeiten gehalten werden und zu Ereignissen können Ressourcen belegt oder freigegeben werden (vgl. Banks 1998, 8 ff.). Bezüglich der Implementierung einer Simulation gibt es Software auf verschiedenen Ebenen: Auf der unteren Ebene, der Programmiersprachen-Ebene gibt es Universal-Simulations-Software, wie z.B. GPSS/GH, SLX oder SIMPLE++. Diese sind in der Regel ähnlich einer Universal-Programmiersprache wie C++, und sind zusätzlich zu dieser Sprache um Objektbibliotheken ergänzt; bspw. für die effiziente Modellierung von grundsätzlichem Terminierungs- und Zeitablaufverhalten. Diese Software verfügt nur über eine einfache GUI und die Bedingung erfolgt hauptsächlich über das Schreiben von Programmcode. Auf höherer Abstraktionsebene gibt es spezielle Simulations-Software, die, zugeschnitten auf spezielle Anwendungsgebiete, eine mehr für den Planungs-Anwender zugeschnittene, objektorientierte Simulationsumgebung repräsentiert. Für den für diese Arbeit relevanten Fall der Produktion sind dies bspw.

FelxSim, Arena, AutoMod oder Plant Simulation. Diese enthalten umfangreiche Modellbibliotheken und können weitgehend über eine grafische Modellierung und nachfolgende Parametrisierung bedient werden. Auch die Visualisierung der Simulation und der Ergebnisse ist in der Regel in Software dieses Typs verfügbar. Ebenfalls auf Unternehmen bezogen, aber nicht zwingend auf den Produktions-Fall, ist noch Simulations-Software für Geschäftsprozesse, wie z.B. ProcessModel, zu nennen (vgl. Banks 1998, 819 ff.). Die hierin entwickelte Planungsmethode hat das Ziel, einen Simulator mit der Art der Bedienung und dem grundsätzlichen Aufbau der letztgenannten Gruppe, der objektorientierten speziellen Simulatoren, zu nutzen. Die Herausforderung besteht darin, nicht nur das soeben beschriebene Verhalten des Materialflusssystems abzubilden, sondern gleichzeitig auch das des Energiesystems bzw. das thermische-physikalische Verhalten der Systembestandteile. Die dafür benötigte Simulationsdomäne wird im folgenden Abschnitt charakterisiert.

2.3.3 Thermisch-Physikalische Simulation

Das thermisch-physikalische Verhalten des Produktionssystems und seiner Bestandteile ist keiner der Planungsdomänen direkt zuzuordnen. Zu einem erheblichen Teil wird zwar hier das Energiesystem der Produktion abgebildet, also die Anlagen und Aggregate in der Peripherie der Produktion, da diese vielfach ein ausgeprägtes physikalisches Verhalten zeigen; bspw. Klimageräte oder Heizkreisläufe. Die Planung und Steuerung dieser Anlagen wurde in Abschnitt 2.2.3 vorgestellt, inklusive einiger simulationsbasierter Planungsinstrumente – dort wurde in Technisch-energetische Gebäudesimulation (TEG) und Technisch-energetische Anlagensimulation (TEA) nach VDI 6020 unterschieden (vgl. Junge 2007, S. 44). Allerdings wurde die Simulation dort nicht für die Operative Planung (PPS) sondern für die Anlagenauslegung genutzt. Zum anderen betrifft die Abbildung physikalischen Verhaltens aber auch alle schon in der PPS und in der Materialflusssimulation betrachteten Anlagen und Systembestandteile; so ist bspw. ein industrieller Backofen sowohl bezüglich seines Materialflussverhaltens und seines thermisch-physikalischen Verhaltens abzubilden, um ein realistisches Gesamtverhalten in der Simulation zu erreichen. Für die Abbildung thermischen-physikalischen Verhaltens werden im Ingenieurwesen Gleichungssysteme und Systeme aus Differentialgleichungen genutzt. Die Simulationsdomäne zur Abbildung dieses Verhaltens ist die der kontinuierlichen Simulation. Hierbei werden die Zustandsvariablen des Systems kontinuierlich verändert. Für die Simulation bedeutet dies, dass die Differentialgleichungssysteme numerisch gelöst werden müssen. Dafür erfolgt eine Diskretisierung in ODE-Solvern; ODE steht für Ordinary Differential Equation, also Lösungsmethoden für gewöhnliche Differentialgleichungen. Die numerischen Lösungsverfahren der Differentialgleichungssysteme basieren meist auf

einer Zerlegung der Objekt-Geometrie in geometrisch gleiche Elemente, dieses wird auch als Finite-Elemente-Verfahren (FEM) bezeichnet (vgl. Leimer 2002). Die Objekte können hierbei das Gebäude, Anlagen, Anlagenteile oder auch Werkstoffe sein (vgl. Gummerer et al. 2000, S. 59). FEM ist ein gängiges Verfahren für die kontinuierliche Simulation. Es findet in Berechnungen im strukturmechanischen Bereich (z.B. Verformung, Urformen oder Zerspanen) sowie für strömungsmechanische Probleme Verwendung und auch, wie im genannten Abschnitt beschrieben, für die thermische Simulation von Gebäuden und Anlagen (vgl. Bracht et al. 2011, S. 113). Die Verbindung zwischen den Elementen der FEM wird durch Knoten oder Kanten definiert. Das Netz aus den Elementen wird in der Simulation bezüglich der Knotenposition, der Kantenlänge oder Druck und Temperatur im Element verändert, als Reaktion auf äußere Einwirkung (vgl. Bracht et al. 2011, S. 114). Einen Überblick wesentlicher, der durch die kontinuierliche Simulation zu beschreibenden, Wärme-Energieströme eines Produktionssystems gibt Abbildung 22, am Bsp. einer Halle mit einer Spritzgussmaschine. Der Wärmestrom der Spritzgussmaschine $\dot{Q}_{SGM}$ setzt sich zusammen aus der Abwärme $\dot{Q}_{Wärme}$, der Wärme, die im gegossenen Kunststoffbauteil die Maschine verlässt $\dot{Q}_{Kunststoff}$ sowie dem Enthalpiestrom, der durch das Kühlwasser abgeführt wird $\dot{Q}_{Kühl}$. Für die thermische Bilanzierung wird $\dot{Q}_{SGM}$ zusammen mit der Abwärme durch die Beleuchtung $\dot{Q}_B$ dem System zugeführt und die Ströme für Lüftung $\dot{Q}_{Lü}$ und die Transmissionsverluste $\dot{Q}_{Tr}$, also der Wärmestrom über alle Elemente der Gebäudehülle an die Außenluft, führen Energie aus dem System ab.

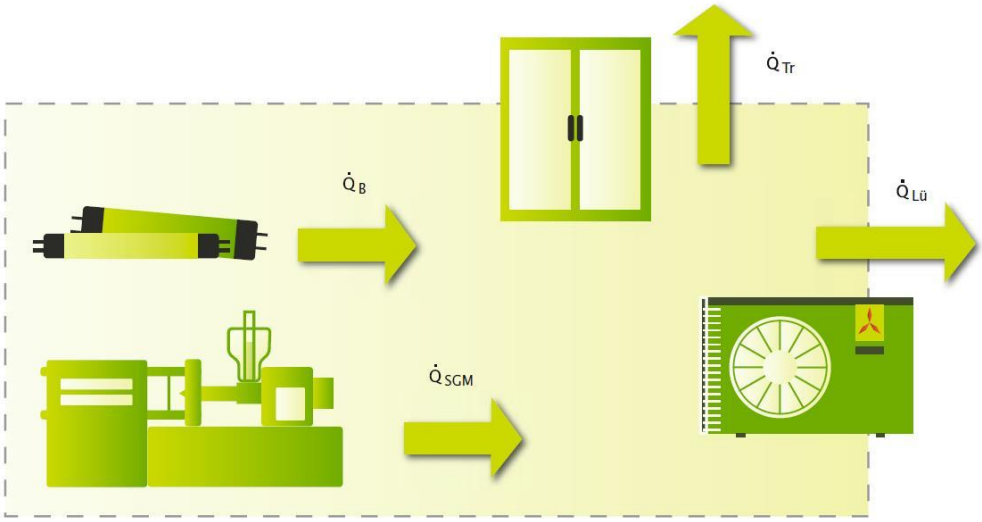


Abbildung 22: Prinzipdarstellung relevanter Energieflüsse einer Produktionshalle mit Produktionsanlage(n) (Hesselbach 2012, S. 119)

Die Bilanzgleichung der Luft ergibt sich somit zu Formel 1.

Formel 1: Bilanzierung der Hallenluft (vgl. Hesselbach 2012, S. 119)

$$V_L\, \rho_L\, c_L \frac{dT_L}{dt} = \dot{Q}_B + \dot{Q}_{SGM} - \dot{Q}_{L\ddot{u}} - \dot{Q}_{Tr}$$

Derartige Differentialgleichungen und Systeme dieser Gleichungen werden in der kontinuierlichen Simulation mit Hilfe von ODEs gelöst. Nachdem geklärt wurde, wie die thermisch-physikalische Simulation des Systemverhaltens eines Produktionssystems abgebildet werden kann – dieses wird auch in der entwickelten Simulationsmethode erfolgen –, soll im nächsten und abschließenden Abschnitt zur Simulation geklärt werden, wie die Richtigkeit der Aussagen einer Simulation gewährleistet werden kann.

2.3.4 Verifikation und Validierung von Simulation

Simulation ist, wie in Abschnitt 2.3.1 ermittelt, eine modellhafte Abbildung eines realen Systems, im Fall der vorliegenden Arbeit also eines komplexen Produktionssystems. Damit die Simulation für die Planung als Bewertungsfunktion für Planungsvarianten verwendet und die Planungsergebnisse als verlässlich betrachtet werden können, muss sichergestellt werden, dass die Simulation das Verhalten des realen Systems hinreichend genau wiedergibt. Da die vorliegende Arbeit auf eine praxis- und anwendungsorientierte Methode abzielt, ist dieser Aspekt von großer Bedeutung und muss auch in der Methodenentwicklung berücksichtigt werden. Im Folgenden werden daher die Grundlagen für die Verifikation und Validierung von Simulation aufgeführt.

Die Validierung überprüft, ob das richtige konzeptionelle Modell verwendet wurde und dieses das für die Planungsaussage relevante Systemverhalten korrekt wiedergibt. Die Verifikation prüft hingegen, ob das konzeptionelle Modell des Systems richtig in die Modellierung und Implementierung der Simulation überführt wurde (Rabe et al. 2008, S. 14). Diese Definition geht von einem Modellierungsprozess aus, in dem zu Beginn der Simulation eine Aufgabenspezifikation erfolgt, aus der ein konzeptionelles Modell abgeleitet wird, das dann in ein formales und daraufhin in ein ausführbares Modell implementiert wird, bevor Simulationsexperimente stattfinden können. Ein Grundprinzip der Validierung und Verifikation ist, dass diese keinen Gültigkeitsnachweis im eigentlichen Sinn darstellt, sondern aufgrund der Komplexität der Modelle nur eine Bestätigung der Glaubwürdigkeit der Simulation repräsentiert. Daher ist der Test eines Modells ein entscheidendes Prinzip, da durch Tests die Fehlerhaftigkeit von Modellen gezeigt werden kann (vgl. Rabe et al. 2008, S. 1) – durch sorgfältiges Testen kann also die Fehlerhaftigkeit für wesentliche, für die Planung relevante, Fälle ausgeschlossen

werden. Wesentliche Methoden der Validierung sind (vgl. Rabe et al. 2008, S. 95): Animation, Begutachtung, Schreibtischtest, Strukturiertes Durchgehen, Test von Teilmodellen, Monitoring, Sensitivitätsanalyse, Festwerttest, Grenzwerttest, Ereignisvaliditätstest & Vergleich mit aufgezeichneten Daten, Statistische Techniken.

Insbesondere die Methode der Tests von Teilmodellen findet im Vorgehen dieser Arbeit Verwendung, da diese auch schon in der Entwicklung der Simulation Verwendung findet. Um das komplexe Modell eines Produktionssystems erstellen zu können, wird es aus Teilsystemen aufgebaut, die auch im realen System Elemente darstellen. Auch dem Simulationsprinzip der Objektorientierten Simulation (OOS), die in dieser Arbeit Verwendung finden wird (vgl. Kapitel 2.3.1), entspricht das Prinzip der Zerlegung des Gesamtmodells in überschaubare Teilmodelle. Im OOS können Teilmodelle als Klassen beschrieben und in Bibliotheken archiviert werden, damit beim Modellieren neuer Systeme auf diese Bestandteile zurückgegriffen werden kann. Auch die Tests gegen einen Erwartungswert bzw. historische Daten sowie die Sensibilitätsanalyse werden, ebenso wie das Monitoring, in Verbindung mit der Animation von Ergebnissen, in dieser Arbeit verwendet werden.

2.4 Simulationsgestützte Optimierung

Die in dieser Arbeit entwickelte Planungs-Methode basiert auf der Simulation komplexer Produktionssysteme. Mit Hilfe der Simulation kann der Planer Plan-Varianten und Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirkung auf das Gesamtsystem finden, bewerten und auswählen. Im Fall des komplexen Systems dieser Arbeit, mit einer Vielzahl von Stellgrößen – vom Produktionsplan über die Ansteuerung von Aggregaten der Produktion bis hin zu Peripherie – und einem entsprechend komplexen Zielsystem für den Planer – wirtschaftliche und energieeffizienzrelevante Ziele, mit jeweils teils konkurrierenden Sub-Zielen –, ergibt sich eine hohe Planungskomplexität. Die Anzahl der möglichen Stellgrößen-Parameter-Kombinationen ist für den menschlichen Planer unüberschaubar und die Fähigkeit des Menschen, in Zielsystemen mit unterschiedlichen Teilziel-Gewichtungen rationale Entscheidungen zu treffen, ist begrenzt. Dafür soll der menschliche Planer durch ein Optimierungsmodul in der Methode unterstützt werden. Der folgende Abschnitt gibt daher eine kurze Übersicht zu für diese Arbeit relevanten Grundlagen der simulationsgestützten Optimierung. Dies ist erforderlich, da in der Entwicklung der Methode auf die vorgestellten Verfahren zurückgegriffen wird.

2.4.1 Optimierung

Die Optimierung ist eine der Kern-Techniken des Operations Management (vgl. Sokolowski, Banks 2012, S. 168). Sie bezeichnet mathematische Verfahren, die

geeignet sind, ein globales Optimum mit einem vorgegebenen Ziel unter Nebenbedingungen zu erreichen und dabei in möglichst wenigen Suchschritten ans Ziel zu gelangen. Es gibt Verfahren der linearen sowie der nichtlinearen Optimierung – die Unterscheidung, in welche Kategorie ein Problem fällt, ist nicht immer auf Anhieb zu treffen (vgl. März et al. 2011, S. 21). In der vorliegenden Arbeit wird die Optimierung gemeinsam mit einer Simulation eingesetzt – dafür gibt es grundsätzlich zwei Varianten: Eine Simulation wird mit integrierter Optimierung für ein Teilproblem im Simulationsverlauf ausgestattet oder eine Simulation wird durch die Optimierung zur Bewertung des Systemverhaltens ausgelöst (vgl. März et al. 2011, S. 42). Die zweite Ausprägung der simulationsgestützten Optimierung wird in der vorliegenden Arbeit verwendet – sie ist in Abbildung 23 als Ablaufdiagramm dargestellt. Die Optimierung verhält sich wie ein automatischer Experimentator: sie gibt eine Planung, also ein Parameterset für die Simulation vor, lässt diese von der Simulation hinsichtlich der Zielerreichung überprüfen und wählt in Abhängigkeit des Ergebnisses das nächste Parameterset. Dieser Ablauf wird solange durchgeführt, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist.

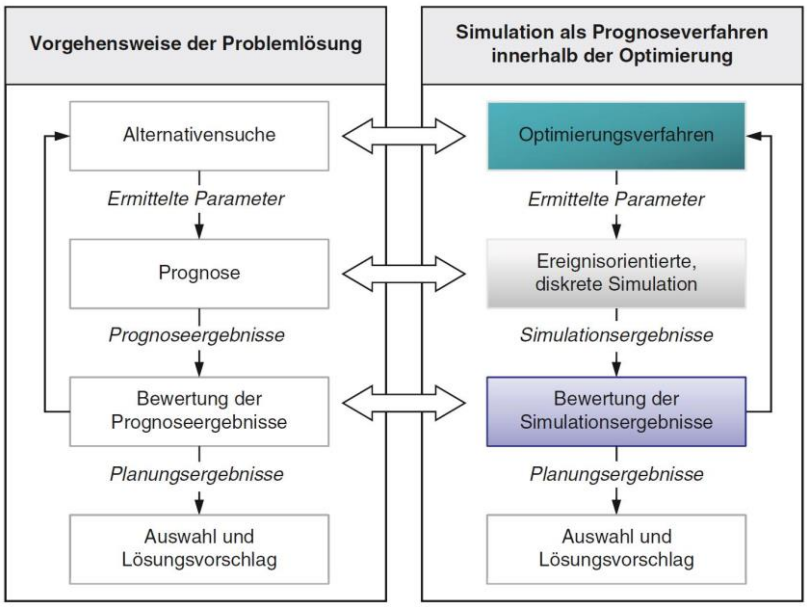


Abbildung 23: Simulationsgestützte Optimierung mit Simulation als Prognosefunktion in der Optimierung (März et al. 2011, S. 43)

Teilweise sind Optimierungsmodule auch schon in kommerziell verfügbaren DES Programmen verfügbar (Johansson et al.), obwohl die Leistungsfähigkeit dieser Module zumeist auf die Variation eines oder weniger Parameter begrenzt ist. Das in der vorliegenden Arbeit zu lösende Optimierungsproblem ist grundsätzlich eine Maschinenbelegung, kombiniert mit einer Terminierung und Sequenzierung von

Aufträgen, ergänzt um die zeitliche Steuerung der Aggregate in der Produktion und ihrer Peripherie.

2.4.2 Optimierungsmethoden

In der Optimierung werden grundsätzlich mathematische Verfahren genutzt, die das Ziel haben, ein bestmögliches Ergebnis zu erzielen. Die Abbildung 24 gibt einen Überblick über wesentliche verfügbare Methoden, die für das vorliegende Optimierungsproblem der Maschinenbelegungsplanung sowie Terminierung und Sequenzierung von Aufträgen geeignet sind – sie erhebt keine Anspruch auf Vollständigkeit, da in der Literatur keine einheitliche Einordnung der Verfahren erfolgt und die Klassifikation und Abgrenzung der Verfahren nicht exakt und allgemeingültig erfolgen kann.

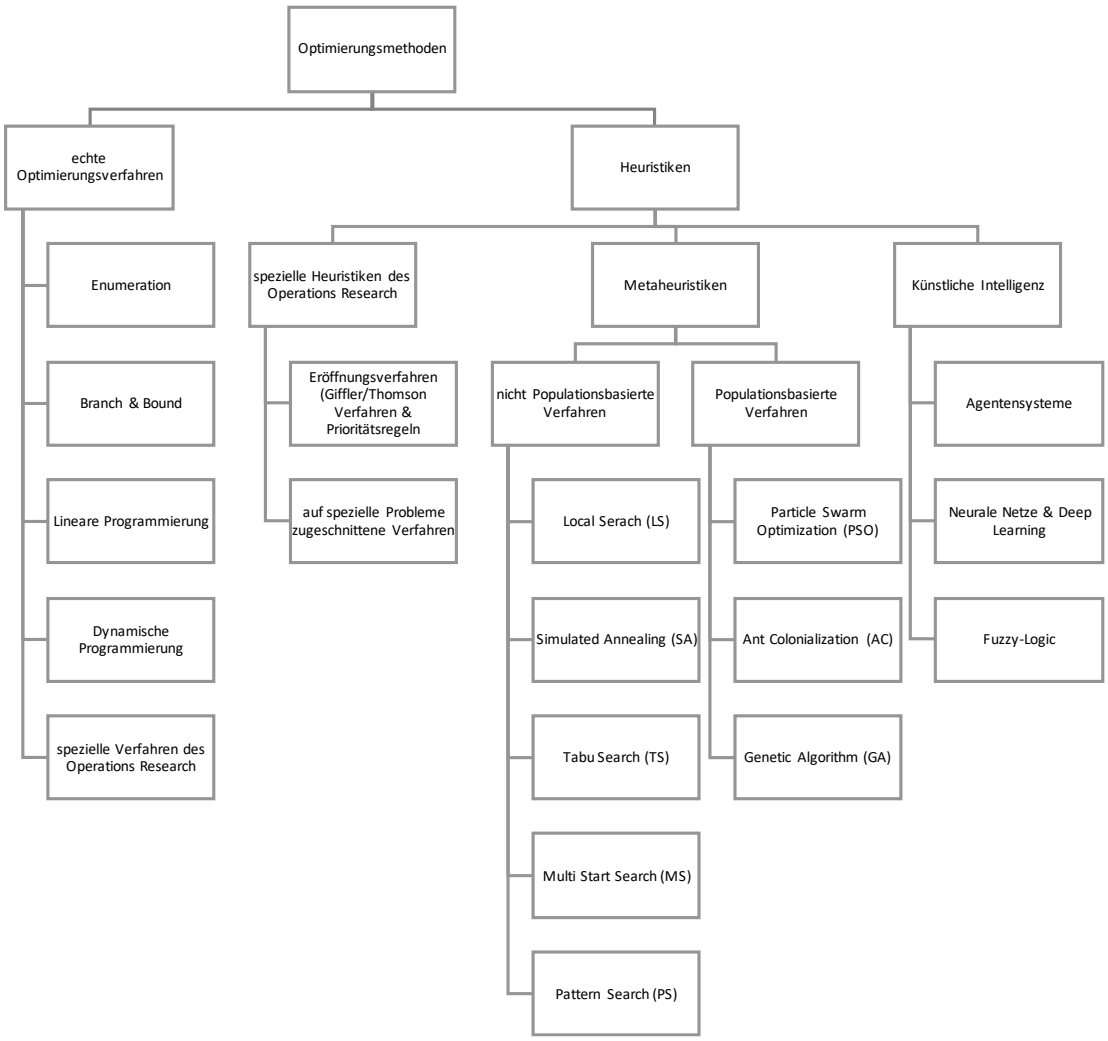


Abbildung 24: Übersicht Optimierungsmethoden – Darstellung auf Grundlage von (Evers 2002; Junge 2007; Sivanandam, Deepa 2007)

Die erste Gruppe der Optimierungsmethoden sind die echten Optimierungsverfahren. Als solche werden mathematische Methoden bezeichnet, die ein Optimum für die Lösung des Problems ermitteln, also eine Lösung, die nicht weiter verbessert werden kann. Die Verfahren basieren entweder auf Varianten der Enumeration, bei der alle möglichen Lösungen eines Optimierungsproblems miteinander verglichen werden, oder Branch-and-Bound-Verfahren, bei der ein Lösungsraum in Teilbereiche zerlegt wird und sukzessive die Teilbereiche ausgeschlossen werden, die keine optimale Lösung enthalten können. Die letzte Variante ist die Lineare Programmierung (vgl. Evers 2002, S. 26) – hierbei wird das System in einer Zielfunktion sowie linearen Nebenbedingungen formuliert und die Zielfunktion maximiert oder minimiert. Alle echten Optimierungsverfahren sind sehr rechenintensiv und daher nur für eine begrenzte Systemkomplexität geeignet. Schon Maschinenbelegungsprobleme der Praxis werden in der Literatur als zu komplex für die Lösung mittels echter Optimierung betrachtet (vgl. Kantorovič 1960) (vgl. Junge 2007, S. 27). Da die Rechenzeit für diese Probleme stark mit zunehmender Systemkomplexität zunimmt und für die in der Praxis benötigte Komplexität groß ist (vgl. Rager 2008, S. 6), spricht man von NP-vollständigen oder NP-schweren Problemen, wobei NP für nicht polynomiellen Aufwand steht (vgl. März et al. 2011, S. 39). Obwohl die Ergebnisse der Literaturauswertung zu Optimierungsverfahren eine mögliche Lösung der Optimierungsaufgabe der vorliegenden Arbeit mittels echter Optimierung als unwahrscheinlich erscheinen lassen, werden in der Evaluierung der State-of-the-Art Methoden für die Energieeffizienzsteigerung durch Produktionsplanung (Abschnitt 4) auch einige Methoden berücksichtigt, die versuchen, das Problem über eine (echte) Optimierung zu lösen.

Die verbleibenden Verfahren im Bereich Optimierung sind nicht exakte Lösungsverfahren, die nur eine Näherungslösung beziehungsweise gute Lösungen ohne Kenntnis des Optimums ermitteln können (vgl. Zäpfel, Braune 2005, S. 21). Diese als Heuristiken bezeichnete Gruppe teilt sich noch einmal auf in Verfahren, die im Operations Research speziell auf das Problem zugeschnitten sind und in der Regel Wissen über das Modellverhalten beinhalten (vgl. Banks 1998, 693 ff.), und allgemeine Suchverfahren, die Metaheuristiken, die universell zur Lösung einer Vielzahl von Optimierungsproblemen genutzt werden können (vgl. Rager 2008, S. 61). Für die in der Arbeit vorliegende Problemstellung einer Maschinenbelegungsplanung mit zusätzlicher Berücksichtigung des Energiesystems gibt es keine im Operations Research beschriebenen speziellen Heuristiken (vgl. Rager 2008, S. 4), weshalb in der Entwicklung der Optimierung für die Methode dieser Arbeit den Metaheuristiken die größte Bedeutung zukommen wird. Diese Gruppe wird im Folgenden kurz beleuchtet.

2.4.3 Metaheuristiken

Metaheuristiken sind die Universalwerkzeuge unter den Optimierungsverfahren, bei denen eine übergeordnete Suchstrategie Algorithmen ansteuert, um eine Lösung zu finden (vgl. Zäpfel, Braune 2005, S. 24). Eine Zielfunktion gibt diesen Verfahren eine Bewertungsmöglichkeit für jede Zwischenlösung, auf deren Basis die nächsten Zwischenlösungen erstellt werden. Grundsätzlich können die Metaheuristiken in populationsbasierte und nicht populationsbasierte Verfahren unterschieden werden (vgl. Hertz, Widmer 2003). In den populationsbasierten Verfahren wird parallel eine Mehrzahl von Lösungen simultan weiterentwickelt, während in der anderen Gruppe nur eine Lösung verändert und sukzessive verbessert wird.

Zur Gruppe der **nicht populationsbasierten Verfahren** zählt die Local Search (LS). Ausgehend von einer Startlösung werden nach Transformationsvorschriften Nachbarlösungen in der Umgebung der Startlösung gesucht. Dieser Prozess wird iterativ wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist. Die lokale Suche ist in ihrer Grundform nicht für Fitnesslandschaften mit lokalen Optima geeignet – multimodal genannt –, da sie diese nicht überwinden und bis zu einem globalen Optimum vorstoßen können. Als Fitnesslandschaft wird dabei die Menge aller möglichen Lösungen eines Modells verstanden. Diese ist je nach Stellgrößen mehrdimensional und komplex, wie im Optimierungsproblem der vorliegenden Arbeit, und kann nicht exakt ermittelt werden, da die Problemkategorie NP-schwer ist. Um LS auch für Optimierungsprobleme mit diesen multimodalen Fitnesslandschaften einsetzen zu können, müssen die Algorithmen mit einer Funktion ausgestattet werden, die das Überwinden lokaler Optima ermöglicht. Im Folgenden werden die wichtigsten Vertreter dieser Verfahren kurz vorgestellt (vgl. Voß et al. 2012, S. 63). Das Simulated Annealing (SA) ist eine Nachbildung des thermischen Prozesses beim Härten von Feststoffen, wobei durch kontrolliertes Abkühlen ein Zustand minimaler Energie erreicht wird. Beim Abkühlen ist das Erreichen des nächsten Temperaturzustandes stochastisch verteilt und somit werden auch zwischenzeitlich höhere Energieniveaus akzeptiert. Dadurch können, übertragen auf die Optimierung, auch lokale Minima überwunden werden – im Falle eines Minimierungs-Problems (vgl. Kirkpatrick 1984). Das Verfahren Tabu Search (TS) ist, im Wesentlichen und vereinfacht beschrieben, eine Erweiterung des Simulated Annealing, in der zusätzlich bereits ermittelte Lösungen im weiteren Verlauf als "tabu" gesetzt und nicht mehr bewertet werden. Dadurch kann das Verfahren schneller zu einer Lösung gelangen (vgl. Glover 1986).

Die Gruppe der **populationsbasierten Verfahren** charakterisiert, dass parallel eine Mehrzahl von Zwischenlösungen weiterentwickelt werden. Dadurch ergibt sich eine

Robustheit gegenüber dem Festsetzen in lokalen Optima, eine Eigenschaft, die besonders in komplexen Lösungsräumen vorteilhaft ist. Die Weiterentwicklung der Zwischenlösungen erfolgt über unterschiedliche Transitionsfunktionen, die zumeist nicht deterministisch, sondern stochastisch basiert sind, das heißt Änderungen werden mit einem Anteil von Zufall erzeugt. Die meisten Verfahren sind Prozessen nachempfunden, die in der Natur zu beobachten sind; einige wichtige Verfahren und ihre Funktionsprinzipien sollen nachfolgend kurz charakterisiert werden. Die Particle Swarm Optimization (PSO) ist dem Schwarmverhalten von Tieren nachempfunden. Die Geschwindigkeit und der Positionsvektor der Individuen werden als Stellgrößen verändert. Das beste Individuum gibt seine Information an alle anderen weiter (vgl. Zeugmann et al. 2011). Die Ant Colonization (AC) imitiert das Verhalten eines Ameisenstammes. Alle Individuen konstruieren sich ihre Wege neu und eine virtuelle Pheromonspur sorgt für indirekten Informationsaustausch zwischen den Individuen (vgl. Petri 2007). Der Genetic Algorithm (GA) ist dem biologischen Prozess der Evolution nachempfunden. Veränderungen der Individuen durch Mutation und Rekombination von Merkmalen mehrerer Individuen einer Population werden erzeugt und ein Selektionsmechanismus sorgt für eine sukzessive Verbesserung des Ergebnisses, das mittels Fitness – Erfüllungsgrad der Zielfunktion – bewertet wird (vgl. Goldberg, Holland 1988). Den GA gibt es in verschiedenen Variationen und Gestaltungsvarianten und er gilt als eines der leistungsfähigsten heuristischen Verfahren, das sehr robust ist und zugleich auf eine Vielzahl verschiedener Probleme adaptiert werden kann (vgl. Michalewicz 1994). Der Grundsätzliche Ablauf des GA ist folgender (vgl. Sivanandam, Deepa 2007, S. 30):

- 1. Auswahl: Bestimmen der zur Reproduktion genutzten Individuen (Lösungen), basierend auf deren Fitnesswerten
- 2. Reproduktion: Nachkommen der Individuen der Elterngeneration von Lösungen werden erstellt, dabei werden stochastisch Merkmalsänderungen durch Rekombination von Merkmalen der Elterngeneration und durch Mutation, also durch die Veränderung von Einzelmerkmalen von Individuen, erzeugt.
- 3. Bewertung: die Fitness der neuen Individuen wird bestimmt, eine Selektion erfolgt
- 4. Ersetzen: Die Individuen der Elterngeneration werden eliminiert und durch die der Nachfolgegeneration ersetzt.

2.4.4 Künstliche Intelligenz

In der Literatur wird die Gruppe der Verfahren künstlicher Intelligenz (KI) teilweise als ganz eigene Gruppe beschrieben. Allerdings verhalten sich die Verfahren aus Anwendungssicht grundsätzlich wie eine Heuristik, in einigen Belangen sogar wie eine Metaheuristik: Ohne auf ein spezielles Problem zugeschnitten zu sein, finden die Verfahren gute Lösungen für komplexe Optimierungsaufgaben, ohne, dass ein echtes Optimum gefunden wird. Zu den Verfahren der KI werden beispielsweise Multiagentensysteme (MAS) gezählt, die als ein System aus autonom handelnden Softwareagenten funktionieren. Vereinzelte Anwendungen in der Fertigungssteuerung werden erforscht. Gerade in jüngster Zeit ist das KI-Verfahren der künstlichen neuronalen Netze (KNN) zu Bekanntheit gelangt, nicht zuletzt durch Demonstrationsprojekte von Google-Deepmind. Die Verfahren versuchen, die Wirkungsweise des Menschlichen Gehirns und seiner Neuronennetze zu imitieren. Sie basieren auf überwachtem oder nicht überwachtem Lernen und können das Verhalten von realen Systemen nach einer Lernphase nachbilden (vgl. Bracht et al. 2011, 127 ff.). Verfahren der künstlichen Intelligenz befinden sich für die Anwendung von Maschinenbelegungsproblemen noch im Forschungsstadium (vgl. Junge 2007, S. 32).

2.4.5 Zielfunktion

Wesentlich für eine effiziente Optimierung ist das Aufstellen einer geeigneten Zielfunktion. In der Methode der vorliegenden Arbeit soll ein komplexes Zielsystem verfolgt werden, das klassische Wirtschaftlichkeitsziele der Produktion mit Energieeffizienzzielen verbindet. Bezüglich der Wirtschaftlichkeitsziele der Produktion sind für die Methode insbesondere die Ziele der PPS relevant, da die Methode wesentliche Aufgaben der PPS erfüllt, wie in Abschnitt 2.2 festgehalten. Die klassischen Ziele der PPS, dargestellt in Abbildung 19, umfassen teils antagonistische Ziele, wie beispielsweise die möglichst hohe Auslastung der Produktionskapazität, eine kurze Auftragsdurchlaufzeit sowie niedrige Bestände, eine hohe Termintreue und insgesamt niedrige Produktionskosten. Teilweise sind Energieziele komplementär zu den wirtschaftlichen Effizienzgrößen, so ist beispielsweise das Kostenkriterium grundsätzlich komplementär zum niedrigen Energieeinsatz. Allerdings sind die Ziele des Energiesystems komplexer, denn beispielsweise können sich die CO_2 Emissionen als Zielgröße bei gleichen Energiekosten deutlich unterscheiden, um nur ein Beispiel zu geben. Das Zielsystem für die Methode muss daher verschiedene Zielbestandteile erfassen. Bei mehr als einem Ziel, werden diese für eine Optimierung in einen Zielvektor zusammengefasst, ggf. mit einer Gewichtung der einzelnen Bestandteile. Der Vorteil liegt in der

einfachen Anwendbarkeit der Algorithmen, der Nachteil in der Subjektivität der Zielfunktionszusammensetzung, bedingt durch die Wahl der Gewichtungen der Teil-Ziele (vgl. März et al. 2011, S. 32). Damit unterschiedliche Werteausprägungen der Zielwerte die Bewertung der Gesamtzielerreichung nicht verfälschen, müssen die Zielfunktionsbestandteile normiert werden. Eine exakte Normierung ist Prinzip bedingt während der Optimierung nicht möglich, da mindestens einer der dafür benötigten Werte (maximaler oder minimaler Ergebniswert) unbekannt ist. Diese Werte müssen daher sinnvoll abgeschätzt werden, beispielsweise durch mehrfaches initiales Ausführen der Simulation vor dem Start der Optimierung (vgl. März et al. 2011, S. 34).

Die Zielfunktion der in dieser Arbeit entwickelten Methode wird im Kapitel 6 entwickelt. An dieser Stelle sollen wesentliche in der Literatur identifizierte mögliche Zielfunktionsbestandteile zusammengefasst werden. Banks nennt drei wesentliche Möglichkeiten der Gestaltung des Zielsystems: Die Zielbewertung auf Basis der Leistung des Produktionssystems (z.B. Bestände, Auslastung, fertig gestellte Teile, Wartezeiten vor bestimmten Prozessen), auf Basis der Fertigstellung-/Lieferdaten oder auf Basis der Kosten (vgl. Banks 1998, 681 ff.). Hinsichtlich der Kosten führt Kurbel wesentliche durch die PPS beeinflussbare Kosten auf (vgl. Kurbel 1998, S. 19):

- Einrichtungs- und Rüstkosten der Produktionsanlagen
- Leer-/Stillstandskosten der Produktionsanlagen
- Lagerhaltungskosten von Rohmaterial und Vor-, Zwischen- und Endprodukten
- Kosten durch Nichteinhaltung von Lieferterminen
- Kosten durch Vermeidung von Terminüberschreitungen (z.B. Überstunden)

Als mögliche Zielfunktionsbestandteile in Bezug auf Energieeffizienz und das Energiesystem der Produktion nennt Haag Nutzungsgrade von Energie oder den spezifischen Energieeinsatz von Anlagengruppen (Haag 2013, S. 39). Diese Bestandteile sollen nur mögliche Zielfunktionsbestandteile darstellen – in der Methode sollen Unternehmen letztlich ihre eigenen fallspezifischen Zielfunktionsbestandteile definieren. Wesentliche Kategorien der Zielfunktion werden im Methodenkapitel zur Entwicklung des Optimierungsmoduls in Abschnitt 6.3.2 aufgestellt und eine Beispielausprägung einer mit einem Anwendungsunternehmen entwickelten vollständigen Zielfunktion für eine Praxisanwendung wird in Kapitel 7 präsentiert. Das Zielsystem soll von Kosten bis hin zu eher technischen Parametern eine Vielzahl verschiedener Bestandteile aufnehmen können. Wichtig ist, dass bei der Aufstellung der Zielfunktionen beachtet wird, dass möglichst wenig Redundanz zwischen Bestandteilen bestehen sollte, da diese zu unbeabsichtigter Über-

Gewichtung führen kann. Außerdem kommt der sorgfältigen Gewichtung und Normierung der Zielfunktionsbestandteile eine wichtige Bedeutung zu, damit die Zielfunktion das reale Zielsystem eines Unternehmens widerspiegelt und die Planungsergebnisse somit praxisrelevant und vertrauenswürdig sind.

3 Anforderungen an ein Planungswerkzeug für Energieeffizienz

Die Anforderungen an die in dieser Arbeit zu entwickelnde Planungsmethode kommen, ebenso wie die zugrundeliegende Problemstellung, aus der Unternehmenspraxis. Allerdings sind einige Anforderungen für derartige Planungsmethoden teilweise schon erforscht und veröffentlicht – daher steht am Beginn dieser Anforderungsaufnahme zunächst eine Literaturauswertung, bevor die Ergebnisse daraus mit Erkenntnissen aus Expertengesprächen mit Unternehmensvertretern aus einem Forschungsprojekt, in das diese Arbeit eingebettet ist, ergänzt werden.

Herrmann stellt fest, dass planerische Lösungen für eine Erhöhung der Energieeffizienz alle relevanten Energieströme im Zeitverlauf, inklusive die der TGA, erfassen müssen sowie die gegenseitige Beeinflussung der Systembestandteile abbilden und dabei Energieziele mit klassischen Zielen, wie Qualität, Zeit und Kosten, verbinden sollten. Außerdem braucht es realistische Kostenmodelle, unter Berücksichtigung von Spitzenlast-Zusatzkosten, Umweltauswirkungen, etc., für eine realistische Bewertung von Planungsmaßnahmen (vgl. Herrmann et al. 2011).

Li definiert die Anforderungen an Modelle für die Simulation des Energieeinsatzes als: generisch anwendbar, zuverlässig und anwendungsspezifische Aussagen ermöglichend (vgl. Li 2015, S. 2).

Ähnlich zu Li und Herrmann, zählt Thiede (vgl. Thiede 2012, S. 7) Anforderungen an Methoden zur Energieeffizienzsteigerung auf:

- generisch anwendbar und anzupassen an viele verschiedene Einsatzumgebungen
- berücksichtigen alle relevanten Energieflüsse und ihre Wirkungsbeziehungen untereinander
- sind auch für KMU (kleine und mittlere Unternehmen) nutzbar
- können Maßnahmen bewerten und empfehlen

Spezifischer, bezüglich Industrieanforderungen für Support-Tools im Bereich Energieeffizienz, stellt Thiede (vgl. Thiede 2012, S. 36) weiterhin folgende Merkmals-Anforderungen beziehungsweise auf:

- verfolgen einen integrativen Ansatz: Energieeffizienz gemeinsam mit Zeit, Kosten, Qualität betrachten
- bieten einfach zu bedienendes Werkzeug für die komplexe Aufgabe
- bieten die Möglichkeit, Haupttreiber des Energieeinsatzes zu identifizieren

- können Energieeffizienz-Steigerungsmaßnahmen auf verschiedenen Ebenen ergreifen
- ermöglichen realistische und zuverlässige Berechnung relevanter Kenngrößen

Bunse (vgl. Bunse et al. 2011) fasst eine Anforderungsanalyse zusammen, die im Rahmen eines großen EU-Forschungsprojektes, mit 106 Experten, darunter Produktionsmanager aus der EU, den USA, Korea und Japan, ermittelt wurde. Demnach muss Energieeffizienz gleichzeitig mit klassischen wirtschaftlichen Zielgrößen verfolgt werden – Kosten, Flexibilität, Liefertermintreue und Qualität. Besonders für die Anwendung im nicht-energieintensiven Sektor stehen bislang kaum Werkzeuge zur Hand und werden benötigt. Weiterhin ist besonders eine Eignung der Methoden, Werkzeuge und Vorgehensweisen für kleine und mittlere Unternehmen erforderlich, die 99% der Unternehmen und 58% der Wertschöpfung im betrachteten Wirtschaftsraum ausmachen. Methodisch wird das größte Potential in Systemen für das Management und die Kontrolle des Energieeinsatzes in der Produktion gesehen, insbesondere Informations- und Kommunikationssysteme (ICT) in Unternehmen, wie das Enterprise Ressource Planung (ERP), Manufacturing Execution Systems (MES) oder Advanced Planning Systems (APS). Die auf Energieeffizienz bezogenen Systeme in diesem Bereich sind demnach bislang ungenügend im Funktionsumfang und nicht praxisbereit. Im Bereich der ICT werden folgende Methoden und Werkzeuge genannt, für die hoher Bedarf besteht:

- MES, die CO_2-Footprinting ermöglichen und Energieeinsatz erfassen
- Software, die Energieeffizienz von Produktionsprozessen bewertet
- detaillierte Simulations-Modelle, die Energieeinsatzverhalten und Änderungen in der Energieeffizienz abbilden können

Die Expertengespräche mit den sechs Anwendungspartner-Unternehmen im Forschungsprojekt bestätigen die Ergebnisse der Literaturauswertung. Während die Unternehmen die bislang ungenutzten Potentiale durch eine Energieeffizienz berücksichtigende Planung der Produktion und der gesamten Peripherie erkennen und dringend erschließen wollen, fehlen aktuell praxisbereite Planungswerkzeuge dafür. Die Methode soll möglichst modular aufgebaut sein und sich flexibel an verschiedene Anwendungsbereiche anpassen können aber auch für Änderungen einen nur möglichst kleinen Modellierungs- und Pflege-Aufwand der Planung sicherstellen. Um in der täglichen Planungspraxis von den dort arbeitenden Mitarbeitern nachhaltig akzeptiert zu werden, muss sich die Methodenanwendung in den bestehenden Planungsmodus einfügen und die Planungsmethode selbst einfach auszuführen sein.

Es folgt die Aufzählung der Anforderungen an die zu entwickelnde Methode, zusammengesetzt aus den Ergebnissen der Literaturauswertung und Expertengesprächen mit den Anwendungsunternehmen im Forschungsprojekt:

- **Anforderung 1:** Die Methode muss alle wesentlichen in der Produktion relevanten Material- und Energieflüsse sowie die Operationen der Fertigung und Logistik erfassen, das umfasst: die Produktionsanlagen, die Anlagen in der Peripherie der Produktion, inklusive der TGA und des Gebäudes, und auch das Logistiksystem.
- **Anforderung 2:** Die Wirkbeziehungen aller am Material- und Energiefluss beteiligten Systembestandteile der Produktion untereinander müssen in der Modell-Abbildung des Produktionssystems für die Planung integriert abgebildet werden. Unter dem Materialfluss ist hier und im Folgenden nicht nur der reine Transportprozess gemeint, sondern auch die Operationen der Fertigung und Logistik, die in der Regel die Materialbewegung auslösen.
- **Anforderung 3:** Die Planung mit der entwickelten Methode muss ähnlich der Planungsfunktion eines MES bzw. APS erfolgen, damit die Methode in der Planungspraxis leicht integriert werden kann und von Unternehmen akzeptiert wird.
- **Anforderung 4:** Die Systeme müssen das komplexe Systemverhalten eines Produktionssystems abbilden, die komplexe Planungsaufgabe – für einen optimalen Betrieb des Systems – unterstützen, den menschlichen Planern Unterstützung leisten und dabei einfach zu bedienen sein, um in der Planungspraxis der Unternehmen kein Hemmnis zu sein.
- **Anforderung 5:** Die Methode und ihre Umsetzung in ein IT-Planungswerkzeug sollte modular aufgebaut sein und sich leicht auf verschiedene Anwendungsbereiche der Praxis anpassen lassen.

Als zusätzliche, weniger priorisierte Anforderung wird von den Unternehmen eine Unterstützung bei der gezielten Anpassung der Produktion an Energiemärkte mit volatilem Angebot, vor allem induziert durch die Energiewende, genannt. Dieses soll daher im Zielsystem des Planungstools mitberücksichtigt werden und eine Input-Schnittstelle zu Daten der Energiemärkte wird integriert werden.

4 Bestehende Ansätze und Methoden und ihre Eignung für die Planungspraxis

Während im Kapitel 2 Grundlagen und Methoden aus dem Themenfeld der in der vorliegenden Arbeit entwickelten Planungsmethode vorgestellt und auf die Eignung untersucht wurden, soll in diesem Kapitel, nach der Aufnahme detaillierter Anforderungen im Kapitel 3, eine Analyse des aktuellen Standes der Forschung und Entwicklung, in Bezug auf die beschriebenen Anforderungen, erfolgen. Dazu sollen zunächst klassische Energieeffizienzmaßnahmen betrachtet werden, gefolgt von den leistungsfähigeren aber auch in der Anwendung aufwändigeren Planungsmethoden Simulation und Optimierung.

4.1 „Klassische“ Energieeffizienzmaßnahmen in der Produktion

Als klassische Energieeffizienzmaßnahmen dieses Kapitels 4.1 werden hierbei Maßnahmen und Methoden verstanden, die nicht auf den Methoden Simulation und Optimierung basieren, die in den zwei darauffolgenden Kapiteln 4.2 und 4.3 vorgestellt werden. Dazu zählen in der Regel weniger komplexe und einfacher anzuwendende Methoden, die zudem schon länger in der Unternehmenspraxis in Bezug auf Energieeffizienzsteigerung im Einsatz sind. Vorweg sei gesagt, dass diese Methoden die ermittelten Anforderungen aus Kapitel 3 nicht erfüllen beziehungsweise auf einer anderen Planungsebene angesiedelt sind. Während die Anforderungen auf eine Methode zur Unterstützung der operativen Planung im Sinne der PPS bzw. APS abzielen, ergänzt um die Steuerung der gesamten Peripherie, sind die klassischen Methoden entweder technisch-technologische Maßnahmen oder Managementsysteme und damit eher in der strategischen und projektbasierten Planung angesiedelt. Dennoch haben auch die klassischen Methoden und Maßnahmen Relevanz für die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Methode, da auch diese Maßnahmen in der entwickelten Planungsmethode abgebildet werden können – nicht über die Planungsstellgrößen, sondern im Modellaufbau und der Definition der Rahmenbedingungen. Daher werden sie in den folgenden Unterkapiteln kurz analysiert.

4.1.1 Energiemanagementsysteme

Die erste Energieeffizienzsteigerungsmethode ist ein Managementsystem, das, ähnlich beispielsweise den Qualitätsmanagementsystemen (QM), zum Ziel hat, unternehmerisches Handeln zielgerichtet auszurichten, Beschäftigung mit Energieeffizienz organisatorisch zu verankern und methodisch zu unterstützen. In Form der ISO 50.001 ist das Energiemanagementsystem von der International

Organization for Standardization (ISO) als international gültige Norm standardisiert worden (vgl. Kals 2015). Die Hauptelemente eines Energiemanagementsystems sind: die Verantwortung des Managements für das Energiemanagement, das Festlegen einer Energiepolitik, die Energieplanung, die Einführung und Umsetzung von Maßnahmen sowie die Überprüfung und Managementbewertung (vgl. Neugebauer 2014, S. 32). Ähnlich dem Qualitätsmanagementsystem, liegt auch dem Energiemanagementsystem ein iterativer Verbesserungsprozess in Form des Plan-Do-Check-Act Kreislaufes zugrunde. Innerhalb des Energiemanagements sind zum einen das Vorgehen und die Werkzeuge relevant, beispielsweise das Vorgehen von der Priorisierung von Handlungsfeldern – die Identifikation energieintensiver Anlagen und Prozesse –, das Untersuchen von Verbesserungsmöglichkeiten und die Ableitung von Maßnahmenplänen, zum anderen wird aber auch die organisatorische Verankerung des Energiemanagements betont, vor allem durch die Bestimmung eines Energiemanagers, das Festlegen von Verantwortlichkeit für Maßnahmen und die Unterstützung durch das Management. Wie im Kapitel 2.1.4 zu Normen angeführt, ist die Einführung eines Energiemanagementsystems in die Energieeffizienzgesetze der Europäischen Länder, zurückgehend auf die entsprechenden EU-Richtlinien (Richtlinie 2012/27/EU zur Energieeffizienz), aufgenommen. Die Einführung der ISO 50.001 ist demnach eine Möglichkeit, die Auflagen der Energieeffizienzgesetze zu erfüllen. In Deutschland wird zudem der Anreiz gesetzt, Vergünstigungen bei der EEG-Stromkostenzulage zu erlangen.

Ebenfalls in den Bereich des Energiemanagements fällt das Total Energy Efficiency Management (TEEM), obwohl es eher ein darüberliegendes Konzept darstellt, das das Energiemanagement als eines seiner Elemente beinhaltet. Auch hier gibt es ein Managementkonzept der Produktion als Entsprechung: das Total Productive Maintenance (TPM) beziehungsweise erweitert auch als Total Productive Management ist als umfassendes Produktionssystem konzipiert. Analog dazu stellt das TEEM ein umfassendes Konzept zur Steigerung der Energieeffizienz in Unternehmen dar. Die Säulen sind hierbei das Energiemanagementsystem, die Energieeffizienzsteigerungs-Methode Energiewertstrom (vgl. Kapitel 4.1.2), ein Messkonzept zur Datenerhebung des Energieeinsatzes sowie geeignete Visualisierung und Transparenz über bezüglich des Energieeinsatzes getroffene Maßnahmen.

Verglichen mit den Anforderungen, sind das Energiemanagementsystem und das TEEM zwar auf das gleiche Ziel ausgerichtet, allerdings sind beide zu wenig methodisch detailliert, um ein geeignetes Werkzeug zu sein. Vielmehr können sie den Rahmen definieren, innerhalb dessen Planungswerkzeuge, wie das dieser Arbeit, eingesetzt werden können.

4.1.2 Energiewertstrom

Die zweite vorgestellte Methode ist der Energiewertstrom (EWS) von Erlach (vgl. Erlach, Westkämper 2009). Auch diese Methode ist von einer Managementmethode aus dem Bereich des Lean Management – hierzu zählen auch TPM und QM – abgeleitet: der Wertstrommethode. In der Wertstrommethode wird versucht, eine Produktion hinsichtlich der Wertschöpfung zu optimieren, alle Aktivität auf die Verkäufe, den Kunden, abzustimmen und alles dafür nicht Nötige soweit wie möglich als „Verschwendung“ zu eliminieren. Im Wertstromdesign (WSD) erfolgt dies über definierte Gestaltungsregeln. Der zweite Hauptgedanke ist die ständige Verbesserung (KVP), wofür eine vorherige Standardisierung der Prozesse erforderlich ist (vgl. Ōno et al. 1993). Diese Hauptgedanken finden sich auch im Energiewertstrom wieder, der eine Erweiterung des klassischen Wertstroms ist. Die Entsprechung der Verschwendungsvermeidung des WSD im EWS ist die Vermeidung von Energieverschwendung.

Diese Verschwendungen gilt es bei der Methodenanwendung zu minimieren. Für die Energieeffizienzsteigerung durch operative Planung – dem Ziel der vorliegenden Arbeit – sind vor allem die „Verluste durch Betriebspraxis“ relevant. Im Ablauf der Energiewertstrommethode wird zunächst der Kundentakt als Referenzwert bestimmt, er entspricht der Verkaufsrate, mit der Produkte von Kunden abgenommen werden. Danach erfolgt eine standardisierte Prozessaufnahme und die Messung des Energieeinsatzes an den beteiligten Anlagen. Es folgt die Bewertung des Energieeinsatzes über die Berechnung von Kennzahlen (vgl. Neugebauer 2014, S. 48):

- Energieintensität (EI), ein produktspezifischer Energieeinsatz
- Effizienzgrad, setzt EI in Bezug zu einem Industrie-Referenzwert und ist ein Indikator für Verbesserungspotential

Daraufhin folgt die energetische Optimierung des Prozesses anhand von acht Gestaltungsrichtlinien (vgl. Neugebauer 2014, S. 54) – die für diese Arbeit relevanten Richtlinien sind gekennzeichnet – relevant bedeutet, dass die entwickelte Methode diese Maßnahmen als Stellgrößen ergreifen kann:

- Dimensionierung der Betriebsmittel auf den optimalen Betriebspunkt, also Ausrichtung auf den Kundentakt
- Effizienzsteigerung durch Reduktion des Energiebedarfes im Normalbetrieb, über technische Verbesserungen
- Minimierung des Energieeinsatzes bei Produktionsunterbrechung durch bedarfsgerechte Ansteuerung von Anlagenkomponenten (ist eine Planungsstellgröße und für die vorliegende Arbeit relevant)

- Eliminierung des Energieeinsatzes im Standby-Betrieb sowie beim An- und Abschalten, durch technische Maßnahmen aber auch planerische, wie das Bündeln von Produktionsaufträgen (ist eine Planungsstellgröße und für die vorliegende Arbeit relevant)
- Energierückgewinnung und dadurch Mehrfachnutzung des Energieeinsatzes bzw. Verlustminimierung (durch die Simulation in der Methode bewertbar aber nicht Stellgröße der automatischen Planungsoptimierung)
- Lastspitzenvermeidung durch Ausgleich zwischen den Lastverläufen verschiedener Betriebsmittel (ist eine Planungsstellgröße und für die vorliegende Arbeit relevant)
- Festlegen energieoptimaler Produktionsreihenfolgen, z.B. durch Reduktion der Energieverluste beim Umrüsten an energieintensiven Prozessen (ist eine Planungsstellgröße und für die vorliegende Arbeit relevant)
- Abstimmung von Energiebereitstellung und Verbrauch, also durch bedarfsgerechte Energiebereitstellung Verluste vermeiden (ist eine Planungsstellgröße und für die vorliegende Arbeit relevant)

Die Methode EWS erfüllt, insbesondere mit den soeben gekennzeichneten Gestaltungsrichtlinien, grundsätzlich die Anforderungen an ein Planungswerkezug, allerdings bedarf die Planung selbst einer computergestützten Methode – wie die hierin entwickelte –, die diese Gestaltungsrichtlinien befolgen und die dem Planer eine geeignete Unterstützung für Verbesserungen in der operativen Planung geben kann.

4.2 Simulationsbasierte Ansätze

Unter den hier untersuchten Methoden für die Planung der Produktionsplanung sowie der Planung und Steuerung der Peripherie ist die Simulation die aktuell vielversprechendste Lösungsoption (vgl. Kapitel 1.2). Sie eignet sich zur detaillierten Abbildung komplexer Systeme, zu denen das vorliegende Planungsproblem eines komplexen Produktionsstandortes mit seinen Systembestandteilen und deren Interaktion zählt. Im Vergleich zu den oben vorgestellten „klassischen“ Energieeffizienzmaßnahmen, die entweder zur Findung technischer Maßnahmen geeignet sind, oder, wie der Energiewertstrom, zur Bestimmung des grundsätzlichen Verbesserungspotentials auf Basis von Referenzwerten und Performance-Indikatoren, kann die Simulation nicht nur detailliert ein Potential ausweisen, sondern auch zur Maßnahmenplanung und deren Wirkungsabschätzung genutzt werden. In Kombination mit der im Abschnitt 2.7 beschriebenen, simulationsgestützten Optimierung kann die Simulation zusätzlich auch für die automatisierte Planungsoptimierung genutzt werden. Damit erfüllen die simulationsbasierten

Ansätze potentiell sowohl die Anforderungen, die sich aus der übergeordneten Forschungsfrage der vorliegenden Arbeit ergeben – das Finden einer geeigneten Planungsmethode – und gleichzeitig auch die in Kapitel 3 ermittelten Detailanforderungen an die Planungsmethoden, nämlich das realistische Abbilden des Gesamtsystems Produktion, inklusive der Wechselwirkungen zwischen den Systembestandteilen. Wie im Abschnitt 2.6 zur Simulation festgehalten, müssen zur Abbildung des Gesamtsystems zwei wesentliche Arten von Systemverhalten erfasst werden: die des Energiesystems und die des Materialfluss- und Auftragsablaufs. Auf die Simulation übertragen bedeutet das, kontinuierliches und diskretes Simulationsverhalten integriert abzubilden.

Auch in der Literatur wird die Simulation als am besten geeignete Methode im Bereich der Planung von Energieeffizienzmaßnahmen gesehen, besonders im über die Maschinen-Ebene hinausgehenden Bereich (vgl. Herrmann et al. 2011). Herrmann sieht die Simulation gegenüber statischen Rechnungen, künstlichen neuronale Netzen und Fuzzy Logic im Vorteil. Darüber hinaus zählt der Einsatz für die Planung im Produktionsbereich zu den Hauptanwendungsgebieten der Diskreten Eventsimulation (vgl. Johansson et al.).

Im Folgenden werden verschiedenartige simulationsbasierte Ansätze vorgestellt, die ein der vorliegenden Arbeit grundsätzlich ähnliches Ziel der Abbildung und Planung von Produktion und Energiesystem verfolgen. Die Mehrheit der Ansätze basiert auf DES, aber auch Co-Simulation, also die Verknüpfung von mehr als einem Simulationsmodell, ist in unterschiedlicher Ausprägung vertreten, wie auch Ansätze, die versuchen, das Systemverhalten aus Sicht der kontinuierlichen Simulation abzubilden. Die Ansätze werden jeweils kurz bezüglich relevanter Merkmale und Funktionsweise beschrieben und jeweils mit den in Abschnitt 3 erhobenen Anforderungen verglichen. Die Beschreibung beginnt mit den zwei dieser Arbeit methodisch ähnlichsten Ansätzen und diskutiert diese besonders detailliert. Diese zwei Ansätze sind jeweils Co-Simulationen, die ihren Schwerpunkt in der diskreten Simulation haben und kontinuierliches Verhalten über das Koppeln an weitere Simulatoren abzubilden versuchen. Nach der Vorstellung der simulationsbasierten Ansätze erfolgt zudem eine vergleichende tabellarische Bewertung der Ansätze in Bezug auf die in Kapitel 3 ermittelten Anforderungen.

4.2.1 Thiede – eine simulationsbasierte Methode zur Vergrößerung der Energieeffizienz in produzierenden Unternehmen

Das Konzept von Thiede und Herrmann (Herrmann et al. 2011; Herrmann, Thiede 2009; Thiede 2012; Thiede et al. 2011; Thiede et al. 2013) basiert auf einer diskreten

Eventsimulation, die um eine vereinfachte Darstellung des Energiesystems erweitert und an ein Bewertungsmodul gekoppelt wird. Die Simulation des Energieeinsatzes auf Maschinenebene erfolgt statusbasiert, d.h., die Betriebszustände jeder Anlage werden jeweils mit Leistungsniveaus verknüpft – für bearbeitete Produkte wird dann ein Programm hinterlegt, das die Zustände im Zeitverlauf aufruft und den Energieeinsatz in der Simulation über die Leistungsabnahme im Zeitverlauf akkumuliert. Zur Auswahl und Priorisierung der zu betrachtenden Anlagen und Handlungsfelder, stellt Thiede ein Energieportfolio auf, für das Energiemessungen, oder zunächst auch Nominalleistungen der Anlagen laut Datenblättern, mit Jahreslaufleistungen der Anlagen gegenübergestellt werden. Für jeden Sektor im Portfolio wird eine grundsätzliche Handlungsstrategie aufgestellt. Wenige Verbraucher sind für den Großteil des Energieeinsatzes verantwortlich und sollten bei der Planung von Effizienzmaßnahmen priorisiert werden.

Die äußere Simulationsstruktur besteht aus Input-Daten, die über MS Excel importiert werden, der eigentlichen Simulation mit dem kommerziellen Simulator AnyLogic® und Java-Zusatzprogrammierung sowie einem Output von Simulationsergebnissen über MS Excel und die Software e!sankey. Der Aufbau der Simulation selbst umfasst die Simulation der Maschinen und Anlagen in Prozess-Modulen, ein TGA-Modul (Technische Gebäudeausstattung), jeweils in AnyLogic® implementiert, ein in MS Excel implementiertes, manuell zu bedienendes PPS-Modul sowie ein Bewertungsmodul für das Simulationsergebnis. Die Simulationsmodule werden über Input-Parameter Files initialisiert. Im TGA-Modul wird das kontinuierliche Verhalten der Systeme abgebildet. Beschrieben wird beispielhaft die Dampferzeugung mittels einer DES, in deren Ausführung algebraische Gleichungen gelöst werden. Differentialgleichungssysteme und ihre Lösung in ODE-Solvern ist nicht beschrieben, so dass bspw. eine Aufheizphase eines Ofens oder eine Abkühlphase eines Kühlers nicht über ein detailliertes physikalisches Modell abgebildet würde. Energieverbräuche werden über Leistungsniveaus und Zeiträume gerechnet. Diese Beschreibung über nur eine Zustandsgröße ermöglicht nur den vereinfachten Austausch von thermischer Energie zwischen Simulationsmodulen, der vollständig über Wärmestrom und Temperatur beschrieben würde.

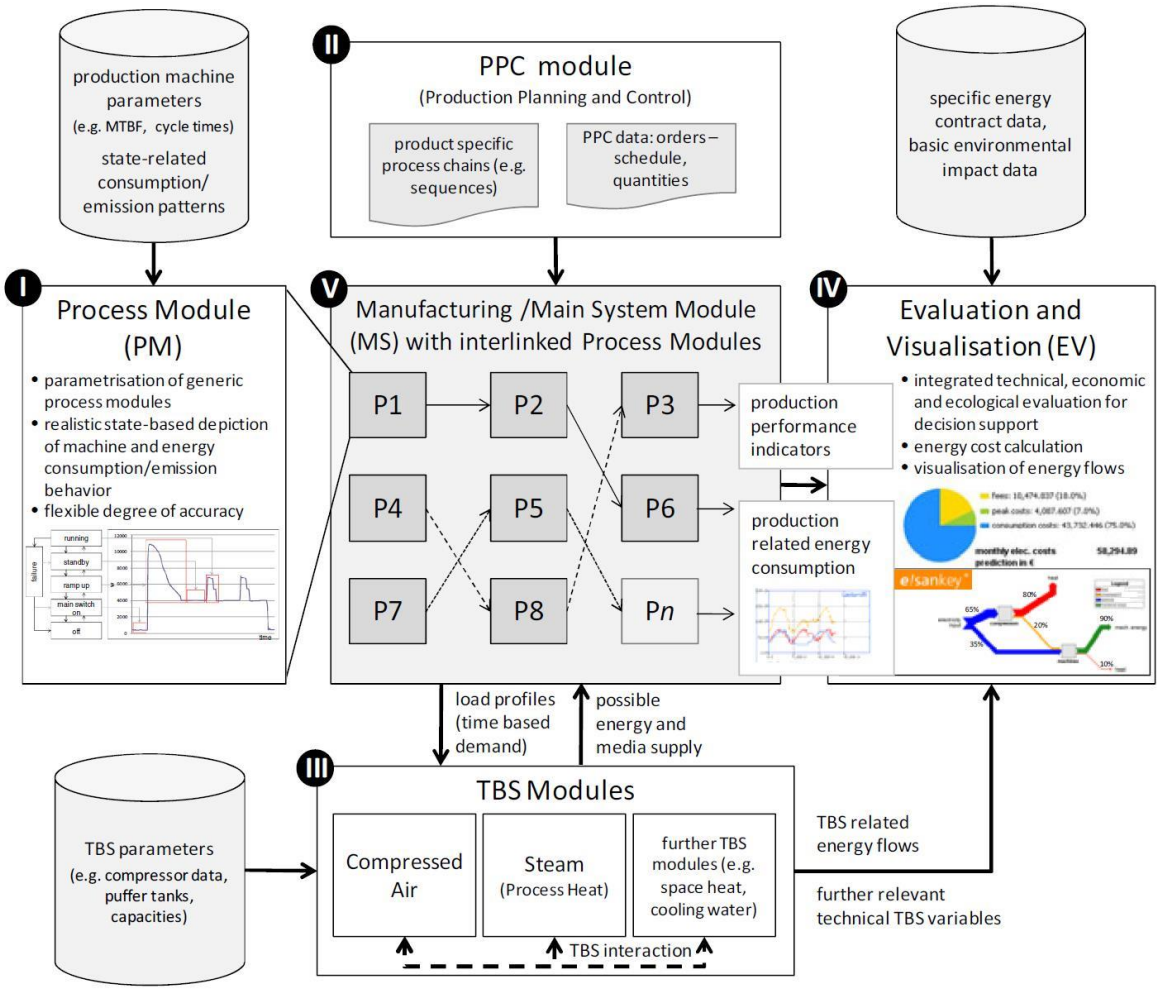


Abbildung 25: Konzept und Simulationsansatz (Thiede 2012, S. 97)

Alle Module wurden über Messungen zu ~98% Genauigkeit validiert (vgl. Thiede 2012, S. 100). Im Ansatz enthalten ist weiterhin ein Vorgehensmodell zum Einsatz der Methode, die im Wesentlichen dem klassischen Ablauf einer Simulationsstudie folgt. Zu Beginn wird das System definiert, Daten erhoben, gefolgt von der Modellierung, der Validierung des Modells, dem Aufstellen von Simulationsszenarien, der Simulation mit Auswertung sowie einem manuellen Planungsoptimierungs-Loop und wird mit der Umsetzungsphase abgeschlossen. Die Planung wird manuell erstellt, über MS Excel importiert und in den Optimierungsläufen verändert, eine Kopplung an das ERP oder MES System von Unternehmen scheint nicht vorgesehen zu sein. Damit ist das Tool für eine szenariobasierte Planungsoptimierung ausgelegt und nicht auf den operativen Planungseinsatz im Rahmen der PPS. Das Konzept wird an Anwendungsfällen getestet, und zwar im Aluminumguss, in der Textilproduktion und in der Leiterplattenfertigung. In den Szenarien können Energieeffizienzsteigerungen von bis zu 50% ausgewiesen werden, erreicht über eine Kombination von Maßnahmen der PPS (z.B. Losgrößenoptimierung – ermittelt

außerhalb des Tools), der Anlagensteuerung, der Energieliefervertragsanpassung und technische Maßnahmen, wie die Umsetzung einer Wärmerückgewinnung. Als letzte Entwicklung des Ansatzes wurde die Methode um eine Gebäudesimulation und eine technisch-physikalische kontinuierliche Simulation von Anlagen, im Rahmen einer Multilevel-Simulation bzw. Co-Simulation[5], erweitert (Schönemann et al. 2016). Die folgende Abbildung zeigt den daraus folgenden Simulationsaufbau.

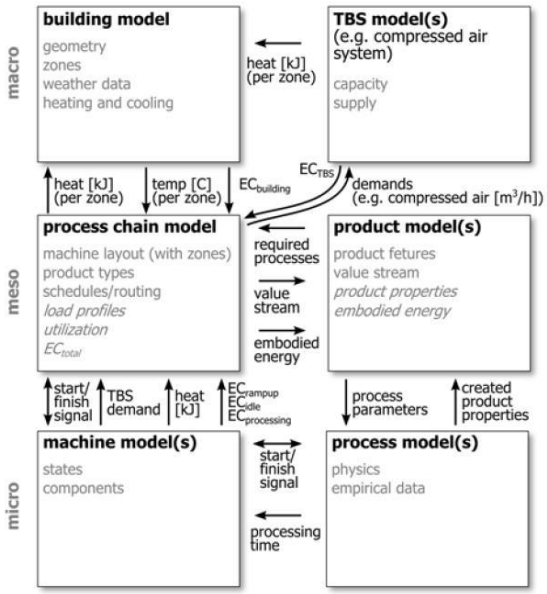


Abbildung 26: Multilevel-Simulation zur Integration des Gebäudeverhaltens (Schönemann et al. 2016)

Die Prozessmodule der Simulation sind weiterhin in AnyLogic® implementiert, die technisch-physikalische Simulation von Anlagen erfolgt in einem MATLAB®/Simulink® Modell – mit MATLAB® als eine der klassischen Modellierungsumgebungen für kontinuierliche Modelle. In einer Weiterentwicklung des Ansatzes wurde eine Kopplung an ein Simulationsmodell des Gebäudes mittels der Software EnergyPlus® umgesetzt (Thiede 5/28/2015). Das Grundprinzip der Co-Simulation oder Multilevel-Simulation ist: alle Simulationsumgebungen laufen parallel und tauschen zu bestimmten Zeitpunkten Informationen untereinander aus. Thiede beschreibt in aktuellen Veröffentlichungen ein Rahmenkonzept für die Anwendung einer Co-Simulation für Planungszwecke im Feld der Produktionsplanung und Energie- und Ressourceneffizienz (Thiede et al. 2016). Aus Gründen der Rechenperformance dürfen diese Intervalle nicht zu klein gewählt und dadurch der Austausch zwischen den Simulationsdomänen begrenzt werden. Das beschränkt die

[5] In dieser Arbeit wird der Begriff Co-Simulation für gekoppelte und Multilevel Simulation verwendet

mögliche Abbildung der gegenseitigen Beeinflussung der Simulationsdomänen und damit die Realitätsnähe der Abbildung des realen Systems Fabrik. Der Rechenzeitnachteil einer Co-Simulation würde beim Einsatz der Methode für die operative Planung ein potentielles Hindernis darstellen. Eine weitere wesentliche Beschränkung beim Einsatz einer Co-Simulation ist die eingeschränkte Wiederverwendbarkeit eines Modells für neue Anwendungsfälle: Die Kopplung und alle Einzelmodelle müssen für jeden Anwendungsfall neu aufgesetzt und aufeinander angepasst werden. Das wirkt der zunächst modular aufgebauten Struktur des Thiede Ansatzes entgegen.

4.2.2 Junge – Simulation und Optimierung der Produktion unter Berücksichtigung des Energieaspekts für den Anwendungsfall der Spritzgussfertigung

Der Ansatz von Junge (Junge 2007) ist ein weiteres Beispiel für eine auf Co-Simulation basierende Lösung. Dabei werden Simulationsmodelle für den Materialfluss, für den Stoff- und Energiefluss sowie für das Gebäude in verschiedenen Simulationsumgebungen modelliert und über ein Framework gekoppelt. Die Materialflusssimulation erfolgt in SIMFLEX/3d, einem an der Uni Kassel entwickelten Simulator, grundsätzlich soll das Konzept aber unabhängig von den verwendeten Simulatoren Gültigkeit besitzen (vgl. Junge 2007, S. 72). Die technisch physikalische Simulation der Anlagen ist noch nicht umgesetzt, daher wird auf ein vereinfachtes Modell mit Nutzung von Messdaten, die zur Reduktion des Rechenaufwands in Zeitabschnitten linerarisiert werden, zurückgegriffen und ins DES Modell integriert (vgl. Junge 2007, S. 76). Daher können das physikalische Verhalten der Maschinen sowie die thermische Interaktion mit der Umgebung – bspw. Abwärme an das Gebäude – nicht in der Simulation berücksichtigt werden, bzw. wird dieses über deterministisches Verhalten hinterlegt. In der Gebäudesimulation werden Wärmelasten und Emissionen aus der Stoff- und Energieflusssimulation berücksichtigt. Die benötigte Heiz- und Kühlenergie wird berechnet, die Stellgröße Steuerung des Lüftungssystems ist vorhanden. Auch hier soll das Konzept vom Simulator unabhängig gültig sein, in der Pilotimplementierung verwendet Junge das kommerzielle Simulationstool TRNSYS (vgl. Junge 2007, S. 77).

Die Kopplung der Simulationsumgebungen erfolgt über eine selbst entwickelte, Lösung. Damit wurde eine blockierende bzw. wartende Kopplung umgesetzt und keine Zeitsteuerung implementiert, wie bspw. durch die High Level Architecture (HLA) oder die Common Object Request Broker Architecture (CORBA) – die Zeitsteuerung ist aufgrund der relativ geringen Rechenzeiten der Simulatoren möglich (vgl. Junge 2007, S. 79).

Das zeitliche Verhalten der Co-Simulation ist in der Abbildung 27 skizziert: Die mittels DES abgebildete Materialflusssimulation steuert zu bestimmten Ereignissen die Stoff- und Energieflusssimulation an, die für die inzwischen vergangene simulierte Zeit das physikalische Verhalten der Anlagen abbildet und am Ende wird für größere Zeiträume das thermische Gebäudeverhalten ermittelt.

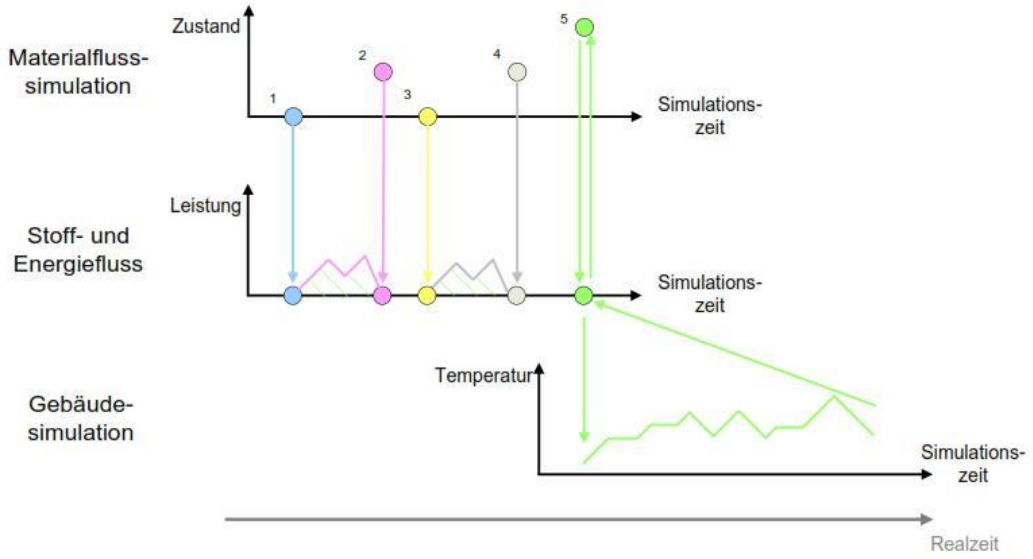


Abbildung 27: Zeitliches Verhalten der Co-Simulation (Junge 2007, S. 82)

Eine Rückkopplung der Gebäudesimulation auf die Stoff- und Energieflusssimulation und von dieser auf die DES ist demnach nicht implementiert. Die Interaktion der Systembestandteile ist folglich nur stark vereinfacht abgebildet – bspw. könnte eine längere oder kürzere Aufheizphase eines Ofens nicht den Fortgang der Materialflusssimulation rück-beeinflussen.

Bezüglich der Planung verfügt der Ansatz über folgende Stellgrößen:

- Zuordnung von Auftrag zu Maschine
- Reihenfolge der Aufträge auf der Maschine
- Variation der Losgröße
- Terminierung (vorwärts oder rückwärts)

Die Produktionssteuerung ist als DLL-Datei (Dynamic-Link Library – eine dynamische Programmbibliothek) ausgeführt, sie legt die Zuordnung von Aufträgen zu Maschinen fest und definiert die Auftragsreihenfolge – ein Folgeauftrag kann immer dann ausgelöst werden, sobald der vorherige ausgeführt wurde. (vgl. Junge 2007, S. 85). Die Optimierung im Rahmen der Produktionsplanung erfolgt über mehrere Optimierungsansätze, mit dem grundsätzlichen Ziel der Produktionsoptimierung unter Berücksichtigung der Energieeffizienz:

- Ansatz Temperaturtrend: Emissionsreiche Produkte bei sinkenden Außentemperaturen zuerst einplanen und umgekehrt
- Ansatz: Tag/Nacht Unterscheidung: unter der Annahme kälterer Nachttemperaturen, emissionsreiche Aufträge nachts terminieren
- Ansatz Lüftungs-/Wärmeverluste: Aufträge/Produktionslose anhand der Temperaturdifferenz und Luftwechselrate priorisieren und anhand eines Grenzwertes Aufträge auswählen

Dabei sind die Losgröße und der Grenzwert kritisch für das Ergebnis und werden über eine Parameter-Optimierung bestimmt, hierfür wird die an der Universität Kassel entwickelte Optimierungsumgebung OptiS eingesetzt. Optis beinhaltet folgende Optimierungsverfahren, die in Kombination verwendet werden: Evolutionsstrategien, Simulated Annealing, Axial Iteration, Simplex Strategie und Zufallszahlen. Die Optimierungsumgebung ermittelt einen Parametersatz, übergibt diesen an die Simulation, die wiederum erfüllte Zielgrößen an die Optimierungsumgebung als Ergebnis der Simulation zurücksendet. (vgl. Junge 2007, S. 86). Da nur zwei Größen von der Optimierung ermittelt werden müssen, ist die Komplexität der Optimierungsaufgabe begrenzt, ebenso aber auch der Einfluss der Optimierung und damit das Optimierungspotential. Der Simplex-Algorithmus hat sich als der leistungsfähigste erwiesen. Anhand eines vereinfachten Anwendungsbeispiels in der Kunststoffspritzgussfertigung (fünf baugleiche Maschinen, über Förderbänder automatisch verknüpft, vier Produkte, drei Schichten pro Arbeitstag, vier Wochen Zeitraum) wird das Verfahren getestet. Die Ergebnisse zeigen für bestimmte Strategien eine mögliche Reduktion des Heizenergieeinsatzes.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin eine mögliche Energiekosteneinsparung bis zu 26,5 %, haben in dem Fall aber negative Auswirkungen auf klassische Ziele der PPS, welche die energieseitigen Einsparungen überkompensieren (vgl. Junge 2007, S. 132).

Das Verfahren von Junge hat gegenüber den in Abschnitt 3 aufgestellten Anforderungen folgende Defizite:

- die Co-Simulation ermöglicht keine umfassende Abbildung der komplexen Wirkbeziehungen zwischen Materialfluss und Energiesystem und zwischen Produktion, TGA und Gebäude
- die Co-Simulation hat einen erheblichen Rechenzeitnachteil gegenüber einer einzelnen Simulation – ungünstig für den Einsatz in der operativen Planung
- die Co-Simulation muss für neue Anwendungsfälle in ihren Bestandteilen neu modelliert, die Bestandteile auf einander abgestimmt und die Kopplung neu aufgesetzt werden – dies erfordert erheblichen Aufwand und Wissen

- die (bislang noch) fehlende Umsetzung der kontinuierlichen physikalisch-thermischen Simulation der Anlagen
- die Optimierung beeinflusst nur ein sehr eingeschränktes Parameterset, sodass die Optimierung aufgrund von Szenarien und einer zu wählenden Strategie erfolgt – eine globale Optimierung der Planung findet nicht statt

4.2.3 Martin - Energieeffizienz durch Abstimmung zwischen Produktion und TGA

Das Konzept von Martin (Martin et al. 2008) baut auf den vorherig vorgestellten Ansatz von Junge auf und ist dem davor vorgestellten Ansatz der Co-Simulation von Thiede, der chronologisch danach entwickelt wurde, sehr ähnlich. Wie bei Thiede werden Simulatoren verknüpft – in diesem Fall drei, für Gebäude, TGA und Produktion – und an ein Bewertungsmodul gekoppelt. Ähnlich dem Konzept von Junge, sollen Steuerungsvarianten der Produktion auf ihre energetische Wirkung auf das Gesamtsystem untersucht werden. Die Validierung anhand von Fallstudien im Bereich Schokoladenherstellung und Herstellung von Infusionslösungen werden nicht über die Konzeptphase hinaus dargestellt (vgl. Martin et al. 2008). Der Kopplungsmechanismus entspricht der im Ansatz von Junge beschriebenen Kopplung.

Aufgrund der genutzten Co-Simulation, treffen auf den Ansatz die für die anderen Co-Simulationsansätze beschriebenen Beschränkungen dieser Simulationsmethode zu: Ein schwer skalierbares Modell, da das Gesamtsystem jeweils in verschiedenen Sim-Programmen teilweise redundant hinterlegt ist und bei Änderungen immer alle Teilmodelle auf Kompatibilität mit Änderungen überprüft werden müssten. Die Optimierung ist nicht näher ausgeführt, ebenso wie die Pilotumsetzung – das später von Thiede entwickelte Konzept ist daher vermutlich die weiterentwickelte und ausgereiftere Version dieses Ansatzes.

4.2.4 Leobner – Szenario basierte, energetische Produktionsoptimierung auf Basis von Co-Simulation

In diesem Ansatz wird ein Fabriksystem über eine Co-Simulation bezüglich der Produktion, Technischer Gebäudeausstattung (TGA) und Gebäudesimulation abgebildet (Leobner et al. 2013; Heinzl et al.).

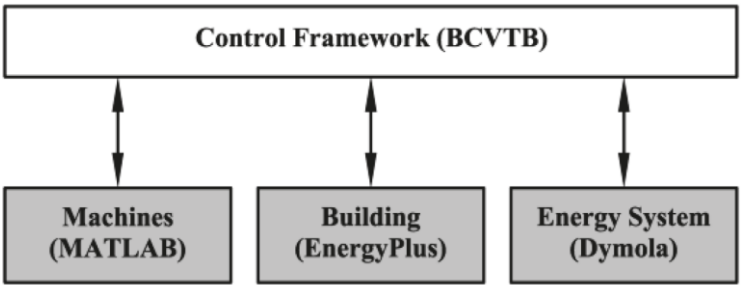


Abbildung 28 Co-Simulationsframework implementiert über das Building Controls Virtual Testbed (BCVTB) (Heinzl et al.)

Folgende Simulatoren wurden für die Co-Simulation gekoppelt: Matlab® (Produktion), Dymola® (TGA) und EnergyPlus® (Gebäude), gekoppelt über die Software Framework "Building Controls Virtual Test Bed" (BCVTB). Die Optimierung wurde Szenario basiert durchgeführt, indem zwei Ausgestaltungsvarianten der Technischen Gebäudeausstattung für drei verschiedene Produktionsstandorte – Wien, Kairo und Moskau – für ein gegebenes Produktionsprogramm hinsichtlich der Wirkung auf Wirtschaftlichkeit und Energieeinsatz überprüft wurden. Die Standorte haben dabei die Klimabedingungen vorgegeben, das Gebäude und die sonstige Fabrik wurden an allen drei Standorten gleich modelliert. Die folgende Abbildung zeigt den grundsätzlichen Aufbau der Simulation und des Szenarien-Vergleichs.

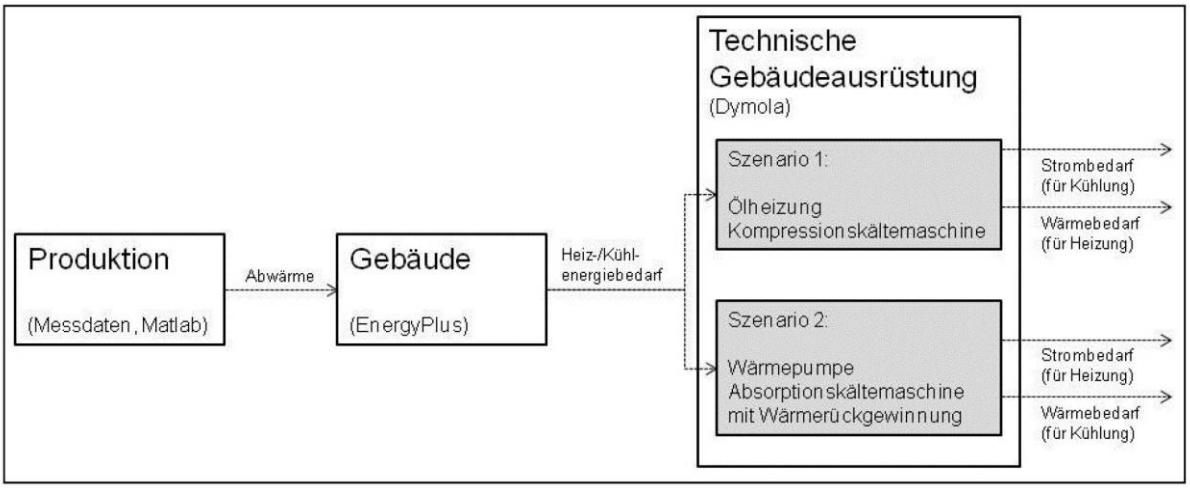


Abbildung 29: Schema des Simulationsablaufes (Leobner et al. 2013)

Im Ergebnis wurde das Szenario 2 mit Wärmepumpe und Wärmerückgewinnung an kalten Standorten besser bewertet, und bei höherer Produktionsauslastung hat sich das relative Ergebnis für Szenario 2 weiter verbessert – begründet wesentlich durch den bei höherer Auslastung relativ geringeren externen Wärmebedarf, durch vorhandene Abwärme als Alternativ-Wärmequelle. Durch die Co-Simulation ist für die

Nutzung des Ansatzes ein hoher Aufwand und Expertenwissen mehrerer Simulations- und Planungsdomänen notwendig (vgl. Leobner et al. 2013).

Hinsichtlich der aufgestellten Anforderungen sind, wie auch bei den zwei vorherigen auf Co-Simulation basierten Ansätzen, die Nachteile der Co-Simulation für eine Planung zu nennen – das Rechenzeitproblem und hoher Aufwand der Modellerstellung sowie ungenügende Abbildung der Simulationsbestandteile und die daraus folgende eingeschränkte Praxisanwendbarkeit. Da dieser Ansatz nur Szenario basiert längere Zeiträume simuliert, demnach für die strategische Planung konzipiert ist, ist auch die Nutzung für die PPS nicht gegeben; der Ablauf der Produktion im Detail wird nicht simuliert. Weiterhin ist keine Optimierung implementiert, lediglich ein Bewertungssystem für vom Planer erstellte Gesamtszenarien ist als Entscheidungsunterstützung vorhanden.

An dieser Stelle, der Bewertung des letzten Co-Simulations-Ansatzes, sei noch zusätzlich auf Beschränkungen der Co-Simulation im Detail verwiesen: Die Kopplung bedeutet Komplexität in der Modellierung, daher sind diese Ansätze oft stark auf bestimmte spezielle Anwendung zugeschnitten. Neben den vorgestellten, gibt es einige Co-Simulations-Ansätze auf Basis des Simulators Modelica – da dieser allerdings primär für die Modellierung im kontinuierlichen Bereich ausgelegt ist, eignet sich der Simulator nur bedingt für komplexes diskretes Verhalten, das aber bei großen Systemen, wie Produktionsstandorten, gegeben ist. Co-Simulations-Ansätze der Modelica-Community versuchen, das Functional Mock-Up Interface (FMI) als Standard zu etablieren – allerdings ist diese eher für kontinuierlich dominiertes Verhalten geeignet und kann komplexes Materialflussverhalten nicht bzw. nur mit übermäßigem Aufwand abbilden. Außerdem ermöglichen diese Ansätze nur wenig Flexibilität in der Verbindung von ODE Solvern mit der DES, mit daraus resultierend schlechterer Rechen-Performance (vgl. Raich et al.).

4.2.5 Rager – Energieorientierte Produktionsplanung

Das Konzept von Rager (Rager 2008) beschreibt einen Ansatz mit dem Fokus auf der Planungsoptimierung – auch hier wird eine Simulation als Bewertungsfunktion genutzt, allerdings nur in Form einer DES. Das Ziel ist eine energieorientierte Maschinenbelegungsplanung für die Werkstattfertigung mit identischen parallelen Maschinen, ohne die Berücksichtigung reihenfolgeabhängiger Rüstkosten, oder Reihenfolgebeziehungen der Aufträge untereinander (vgl. Rager 2008, S. 1).

Das Optimierungsproblem wird als NP-schwere Maschinenbelegungsplanung eingeordnet, im Bereich des Operations Management als $P \mid d \mid k$ Problem beschrieben, und entspricht damit dem in der Literatur verbreiteten eindimensionalen

Bin-Packing-Problem. Allerdings wird es aufgrund der Energiebetrachtung um zwei Erweiterungen ergänzt: Die modellbedingt notwendige Aufteilung der Produktionsaufträge in einzelne Operationen und eine neue nichtlineare Zielfunktion. Daraus ergibt sich, dass auch die Lösung des energieorientierten Maschinenbelegungsproblems ein NP-hartes Problem ist (vgl. Rager 2008, S. 43) und somit nicht durch klassische Optimierung sondern durch Heuristiken zu bewältigen ist.

Bei der Suche nach vorhandenen Ansätzen zur Umsetzung des Verbesserungsverfahrens wird die Einordnung des vorliegenden Optimierungsproblems in die Kategorien „Resource Constraint Project Scheduling Problem“ und „General Recource Levelling Problem“ erwogen und letztendlich als Spezialfall des General Recource Levelling Problem eingeordnet. Allerdings stellt sich heraus, dass gängige Lösungsverfahren für die Problemklasse durch eine Besonderheit der Auftragsreihenfolgeplanung nicht geeignet sind. Daher wird auf die Untersuchung allgemeingültiger heuristischer Lösungsansätze gesetzt, die Metaheuristiken (vgl. Rager 2008, S. 44). Innerhalb der Metaheuristiken wird der Genetic Algorithm (Vergleich Kapitel 2.4.3) als am besten geeignet identifiziert. Dieser wird noch angepasst, durch eine fitnessproportionale Selektionsmethode sowie eine Hybridisierung durch einen Lokal Search Algorithmus, der in den Ablauf des GA implementiert wird.

In einer Case-Study im Bereich Textilveredelung wird der Ansatz pilotimplementiert. Dabei erfolgt die Umsetzung der Simulation über ein PlantSimulation Modell (DES) der Produktion, das heißt, der Energiebedarf ist demnach deterministisch hinterlegt und der Verbrauch wird in der Simulation kumuliert. Für die Optimierung wird zunächst ein Abbruch nach Erreichen eines Konvergenzkriteriums festgelegt und etwa nach 9 h Rechenzeit erreicht. Aus Gründen der Anwendbarkeit und aus Nutzen-zu-Aufwand-Relation wird daraufhin ein Abbruch nach 2 h Simulationszeit festgelegt. Populationstests ergaben bei 300 Individuen einen "optimalen" Kompromiss aus Schnelligkeit der Konvergenz und Güte der Lösung (vgl. Rager 2008, S. 101). Die Startlösung kann zufällig gewählt werden, da eine "gute" Startlösung schon nach wenigen Generationen erreicht wird, eine durch heuristisches Modellwissen extra generierte Startlösung also keinen praktischen Vorteil ergäbe. Die Hybridisierung über das LS Verfahren sorgt für eine lokale Optimierung der Pausenzeiten zwischen Produktionsaufträgen bei unverändert bleibender Sequenzierung (vgl. Rager 2008, S. 120) und damit für eine schnellere Konvergenz bei gleichzeitig verbesserter Lösungsgüte.

Die Auswertung ergibt eine mögliche Reduktion der CO_2 Emissionen und Kosteneinsparung von 13% sowie Lastspitzenreduktion von 31%.

Der Ansatz ist der einzige, der eine ausgereifte Planungsoptimierung konzipiert und erfüllt demnach dieses Anforderungskriterium am besten, unter den vorgestellten simulationsbasierten Ansätzen. Allerdings ist die Simulation als reine DES ausgeführt und kann somit das Energiesystem, insbesondere das der Peripherie und der TGA sowie des Gebäudes, nur stark vereinfacht abbilden – Wirkbeziehungen und thermisch-physikalisches Verhalten ist nur determiniert und stark vereinfacht darzustellen. Das somit stark vereinfachte Simulationsmodell wiederum vereinfacht auch die Optimierungsaufgabe, so dass die entwickelte Optimierung nicht für die in dieser Arbeit entwickelte Methode übernommen werden kann. Die Simulation ist darüber hinaus auf den vereinfachten Fall identischer paralleler Anlagen zugeschnitten und bezüglich der Auftragsreihenfolgeplanung beschränkt. Die Verwendung der Methode für die operative Planung ist zwar grundsätzlich gegeben, allerdings durch den Zuschnitt auf den betrachteten Pilot Use-Case zunächst beschränkt und müsste für andere Anwendungsfälle deutlich angepasst werden.

4.2.6 Wohlgemuth – DES und Materialflussanalyse für industriellen Umweltschutz

Im Konzept von Wohlgemuth (Wohlgemuth et al. 2006; Page, Wohlgemuth 2010) werden die im Energiemanagement verbreiteten Werkzeuge der Öko-Bilanz und der Environmental Management Information Systems (EMIS) mit einer DES verbunden. Das Ziel ist die Wirkungsabschätzung ökonomischer und ökologischer Auswirkungen von Unternehmensentscheidungen. In der Auswertung wird die DES mit einer Materialflussanalyse in Form von Petri-Netzen kombiniert, um szenariobasiert Planungsvarianten zu überprüfen. Die Struktur des Planungswerkzeugs ist komponentenbasiert und als Zusammenführung mehrerer Simulationsbausteine ausgelegt (vgl. Page, Wohlgemuth 2010).

Der Ansatz ist eine der wenigen, die den Transport von Energie und Material sowie den damit verbundenen Aufwand erfassen; somit ist auch, wenn auch nur rudimentär, das Logistiksystem abgebildet, eine der in Kapitel 3 ermittelten Anforderungen besser als die meisten anderen untersuchten Ansätze erfüllend. Die Schwächen liegen in der im Vergleich zu den vorig vorgestellten Ansätzen deutlich weniger detaillierten Simulation. Es erfolgt keine Simulation des Produktionsprogramms. Die Ermittlung günstiger Produktionsprogramme erfolgt Szenario basiert und ist damit wenig flexibel. Eine Berücksichtigung von Gebäude und TGA sowie eine Abbildung des thermisch-physikalischen Anlagenverhaltens

erfolgt nicht. Somit sind Wechselwirkungen des Energiesystems und der Produktion nicht ausreichend modelliert. Für die operative Planung eignet sich der Ansatz nicht.

4.2.7 Solding – Simulation für nachhaltige Produktionssysteme

Das Konzept von Solding (Solding et al. 2009) umfasst eine Szenario basierte Planung und Bewertung für Produktionssysteme und nutzt dafür eine DES der Produktion. Der Energieeinsatz wird statusbasiert hinterlegt, das heißt, verschiedenen Betriebszuständen der Anlagen werden Leistungsniveaus zugewiesen und im Simulationsverlauf abgerufen. Die TGA und das Gebäude sowie sonstige Peripherie der Produktion werden in der Simulation nicht abgebildet. Die Planungsverbesserung erfolgt nur auf Basis von vom Planer definierten Szenarien, es findet keine automatische Planungsoptimierung statt. Das Konzept wird anhand einer Case Study in einer Schwedischen Gießerei pilotimplementiert. Die Simulation ist weniger detailliert und komplex als in den eingangs vorgestellten Ansätzen, die Abbildung des realen Systems erfolgt daher stark vereinfacht.

4.2.8 Heilala – Simulationsbasiertes Design für Produktionssysteme

Im Konzept von Heilala wird die Produktion als DES modelliert, mit einem MS Excel basierten Sub-Modell, das Umwelteinflüsse, wie die Außentemperatur, abbildet und durch eine Datenbank gespeist wird (vgl. Abbildung 30)

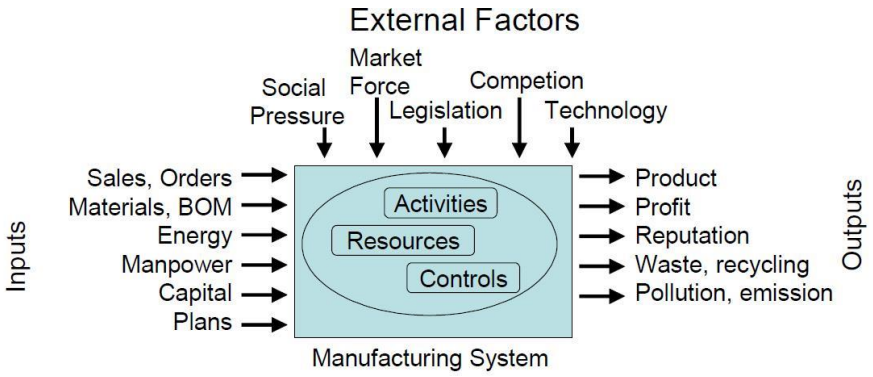


Abbildung 30: Systembeschreibung nach Heilala (Heilala et al. 2008)

Der Energieeinsatz der Anlagen wird über die Nennleistung der Anlagen aus der Anlagendokumentation hinterlegt und ist damit stärker vereinfacht als in den vorherig vorgestellten Ansätzen, die statusbasierte und auf Messungen beruhende Leistungsprofile beinhalten. Es wird ein Test-Case vorgestellt, der ein stark vereinfachtes Fabrikmodell beinhaltet und damit nur zur Prinzip-Demonstration geeignet ist. Während die Simulation und die Hilfsmittel zur Planungsoptimierung deutlich weniger detailliert als die der meisten anderen vorherig vorgestellten Ansätze ausgeführt sind, enthält das Heilala Konzept mit der Verknüpfung mit

Umgebungsbedingungen einen aus Sicht der Anforderungen interessanten Aspekt, da es grundsätzlich eine Abstimmung der Planung auf Umweltbedingungen ermöglicht, ein wesentliches Element der für die vorliegende Arbeit beabsichtigten integrierten Abbildung des Systems Fabrik.

4.2.9 Michaloski – Simulation der Produktion und des Gebäudes für eine nachhaltige Produktion

Das Konzept (Michaloski et al. 2011) versucht, die Produktion inklusive der Peripherie, mit dem Gebäude und der TGA in einer DES abzubilden, mit dem Ziel Produktionssysteme energetisch zu optimieren. Das Grundkonzept beinhaltet also alle wesentlichen Systembestandteile der Fabrik sowie einige Wirkbeziehungen zwischen den Systembestandteilen. Das Energieverhalten wird über eine Energy Management System (EMS) Modellierung abgebildet, das MES wird modelliert, um den Materialfluss und die Auftragsbearbeitung abzubilden. Während das Konzept sehr umfassend ist und bezüglich der Systembestandteile alle wesentlichen Komponenten einer Fabrik enthält, ist das Simulationskonzept und insbesondere die Implementierung nur rudimentär ausgeführt. Das gesamte Systemverhalten wird nur diskret, also über DES modelliert und muss daher auf determiniertes energetisches Verhalten zurückgreifen. Die Simulationsimplementierung am Beispiel einer Fertigung mit Sandformen-Guss ist nur stark vereinfacht ausgeführt. Eine quantitative Auswertung erfolgt nicht. Eine Planungsfunktion wird nicht beschrieben, auch Optimierungsfunktionen gibt es keine.

Die Stärken des Ansatzes liegen in der Konzeptbeschreibung und der Grobmodellierung – hier werden alle wesentlichen in Kapitel 3 aufgestellten Anforderungen an das Modell erfüllt. Die Schwäche liegt in der Ausführung des Konzeptes: Die Simulation ist nicht konzipiert, die Implementierung erfolgt nur sehr vereinfacht und die Test-Anwendung des Konzeptes sowie die Auswertung des Tests sind wenig detailliert.

4.2.10 Weinert – Methode für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme

Das Konzept von Weinert (Weinert et al. 2011; Weinert, Seliger 2010) ist ein weiteres Beispiel für eine auf DES beruhende Methode. Die Besonderheit besteht in der detaillierten Beschreibung des Systems statusbasierter Leistungsniveaus von Anlagen. Hierfür wird die Energie-Blockmethode genutzt, die in Abbildung 31 in einer Übersicht dargestellt ist.

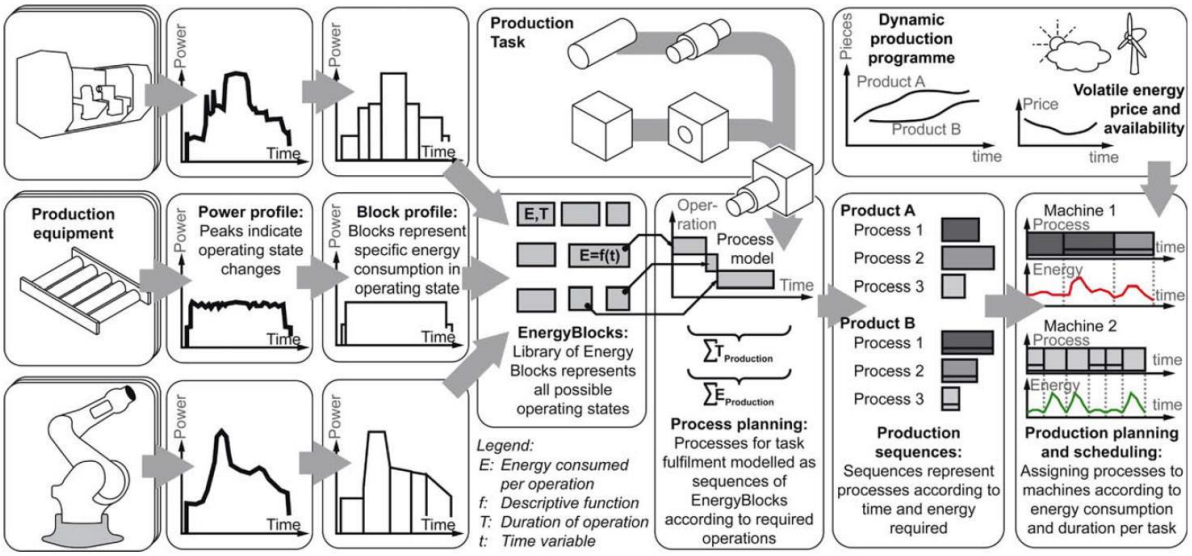


Fig. 1. EnergyBlocks methodology.

Abbildung 31: Energie-Block Methode, Übersicht (Weinert et al. 2011)

In der Energieblockmethode werden Energieblöcke für jeden Maschinentyp und Prozess in Datenbanken hinterlegt und dann in der Prozessmodellierung aneinandergesetzt, um den Gesamtenergiebedarf zu erhalten. Auch Sekundärverbraucher und Hilfsequipment (z.B. Luftdruck, Heizung, Belüftung und Klimatisierung, also viele der Elemente des Systems Fabrik, die in den Anforderungen in Kapitel 3 genannt werden, sollen über die Block-Modellierung erfasst werden. Allerdings kann deren Verhalten somit nur deterministisch abgebildet werden und Wechselwirkungen sind nicht umfassend darstellbar (vgl. Weinert et al. 2011). Ein Test-Case für das Konzept wird in Form einer vereinfachten Abbildung der Produktion eines komplexen mechanischen Bauteils gegeben. Hierfür wird nur der eigentliche Produktionsprozess in Form von vier Anlagen der mechanischen Bearbeitung modelliert, die gesamte Peripherie bleibt außerhalb der Modellgrenzen. Die Ergebnisse des Test-Cases zeigen, für eine szenario- bzw. strategiebasierte manuelle Optimierung, mögliche Einsparungen im Bereich der Durchlaufzeit und Energieeinsatz und –kosten.

Wie die anderen statusbasierten Energiemodelle, erfordert auch dieser Ansatz die detaillierte Aufbereitung von Energieprofilen in Form von Energieblöcken und dazu korrespondierenden Anlagenzuständen – diese müssen dann auch noch in einer Art Arbeitsplan für jedes Produkt erfasst werden. Das bedeutet erheblichen Aufwand, beispielsweise gegenüber dem Hinterlegen eines Leistungsabnahmeprofils im Zeitverlauf für jeden Auftrag, hat aber grundsätzlich den Vorteil der Flexibilität, da die Blöcke theoretisch für neue Produkte rekombiniert und weiterverwendet werden

können. Allerdings bleibt dies ein komplexes System der Datenaufbereitung und Handhabung.

4.2.11 Dietmayr – Energieeinsatzmodellierung und Optimierung für Produktionsanlagen

Der Ansatz von Dietmayr (Dietmair, Verl; Dietmair, Verl 2009) ist, wie der vorherig vorgestellte, ein Vertreter der DES basierten Methoden, die eine Modellierung des produkt- beziehungsweise teilespezifischen Energieeinsatzes über ein System vom Anlagenstatus abhängiger Leistungsniveaus vornehmen. Die Besonderheit dieses Modells diesbezüglich ist, dass auch die Statusübergänge energetisch bewertet werden – mittlerweile allerdings eine Standardfunktion, auch in kommerziellen DES Programmen wie Plant Simulation. Das Modell enthält eine Auswertung der Produktionssteuerung sowie ein Konzept für eine Funktion zur Abschätzung des durch Produktdesignmerkmale in der Produktion induzierten Energieeinsatzes. Im Sinne einer Lebenszyklus-Energiebetrachtung ist dies interessant, allerdings bleibt es hier im Wesentlichen bei einer Konzeptskizze. Die beschriebene Implementierung ist nur sehr vereinfacht ausgeführt. Die Ergebnisse einer sehr vereinfachten Case-Study für einen Bearbeitungsprozess werden nur sehr knapp und qualitativ ausgewertet.

4.2.12 Haag – Konzept für die Planung und Optimierung des Energieeinsatzes in Fabriken

Ein großangelegtes Forschungsprojekt des Fraunhofer IPA wird von Haag (Haag et al. 2012; Haag 2013) in ein Konzept zusammengeführt, das simulationsbasiert den Energiefluss aller Produktionsbereiche abbildet. Die Modellierung des spezifischen Energieeinsatzes erfolgt, analog zu den vorher vorgestellten Ansätzen, über ein System statusbasierter Leistungsniveaus, die in den Basisdaten der Simulation hinterlegt sind – das Konzept baut hier auf die Modelle von Dietmayr und Weinert auf. Neben den Hauptprozessen wird im Konzept auch die Peripherie betrachtet, wofür eine umfangreiche Klassifizierung der Peripherie und ihrer Schichten um den Hauptprozess herum erfolgt. Auch die Anlagen der Peripherie werden über statusbasierte Leistungsniveaus modelliert, also lediglich mit einem deterministischen energetischen Verhalten. Die Daten werden in der „Factory Energy Information Description Language“ (F-EIDL) in einer Datenbankstruktur abgelegt. Die Einzelwerte der Energiezustände der Anlagen werden zu Kennzahlen zusammengeführt. Die Kennzahlen werden zu Zielfunktionen verdichtet – die Zielfunktion und ihre Bestandteile werden über eine Nutzwertanalyse gewichtet (vgl. Haag 2013, S. 73).

Auch die Planungsoptimierung ist Bestandteil des Konzeptes – der Regelkreis der Planung ist in Abbildung 32 abgebildet. Die Optimierung wird allerdings nicht im Detail ausgeführt, ebenso wenig wie ihre Implementierung. Eine beispielhafte Umsetzung ist anhand eines vereinfachten Fertigungsbereiches mit zwei Produkten erfolgt. Die Implementierung der Simulation ist in einem vereinfachten Plant Simulation Modell, einem kommerziellen DES Programm, erfolgt. Über MS Excel werden verschiedene manuell generierte Parametersätze eingespielt, die Schnittprogrammalternativen (CNC Optimierung), Varianten der Maschinensteuerung (Standby Problematik) und eine Variation der Puffergröße bewirken. Die Implementierung der Optimierung wird in der Case-Study nicht ausgeführt. Haag stellt im Ergebnis der Case-Study einen antagonistischen Zusammenhang zwischen den Zielgrößen Energieeinsatz und Durchlaufzeit fest, bestätigt die grundsätzliche Eignung des Konzeptes für die Planung und vermutet Probleme in der Praxisanwendung aufgrund des erheblichen Aufwands in der Anwendung der Methode (vgl. Haag 2013, S. 121).

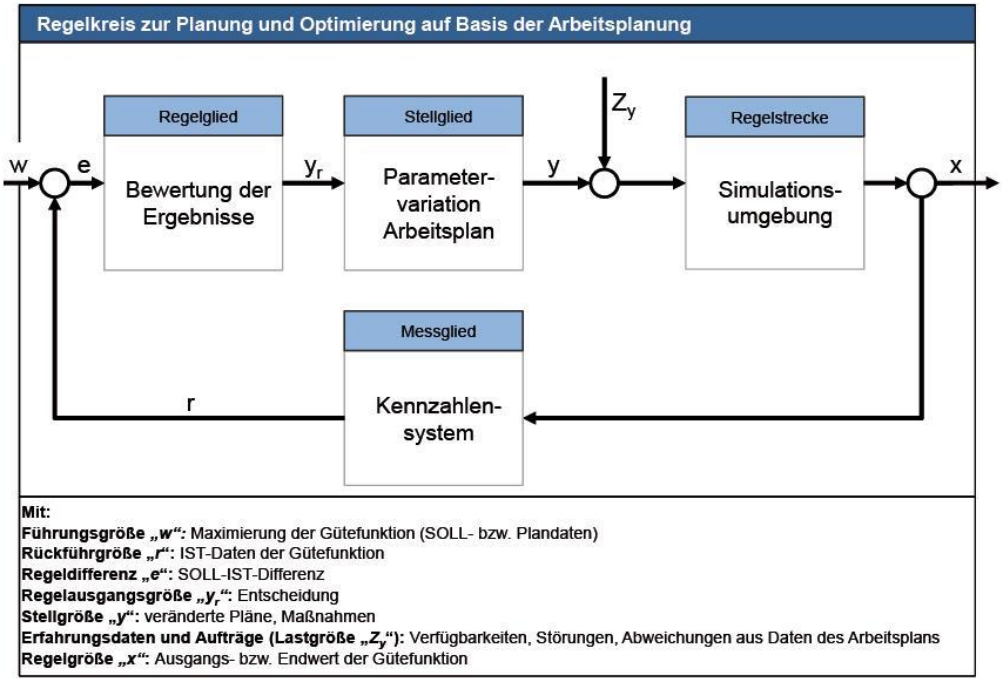


Abbildung 32: Optimierung und Simulation im Regelkreis (Haag 2013, S. 116)

Als Forschungsbedarf nennt Haag die (Haag 2013):

- Erweiterung um thermische Modelle zur Berücksichtigung des dynamischen thermischen Verhaltens des betrachteten Gesamtsystems, insbesondere bei der Entstehung von großen thermischen Energiemengen - hierbei ist allerdings zu beachten, dass dies Prinzip bedingt nur stark eingeschränkt in der DES möglich ist

- Erweiterung der Optimierungsmöglichkeiten um Optimierungsalgorithmen mit nichtlinearem Charakter
- Detaillierung der Modellierung der Hauptprozesse sowie der Peripherie

Zusätzlich dazu ist festzuhalten, dass der Ansatz von Haag konzeptionell bezüglich der Erfassung der Produktion und ihrer Peripherie umfassend ausgelegt ist und auch das grundsätzliche Optimierungskonzept mit einem Planungsregelkreis im Kern, abgebildet in Abbildung 32, erfüllt grundsätzlich die Anforderungen. Die Logistik wird nicht berücksichtigt. Hinsichtlich der Konzeptdetaillierung und insbesondere in der Implementierung ist stark vereinfach gearbeitet worden – hier könnten in der Ausführung erhebliche Hindernisse auftauchen. Insbesondere die Abbildung des Energiesystems ist in der aktuell berücksichtigten DES nur sehr vereinfacht möglich.

4.2.13 Rahimfarad – Energieeffiziente Produktionsprozesse durch Minimierung der „verkörperten/enthaltenen“ Energie der Produkte

Der Ansatz von Rahimfarad (Rahimifard et al. 2010; Seow, Rahimifard 2011) geht, ähnlich wie der bereits vorgestellte Ansatz von Wolgemuth, auf eine Lebenszyklusbetrachtung von Energie zurück, die dann durch eine Simulation, ausgeführt als DES, als Bewertungsfunktion ergänzt wird. Im Kern steht das Konzept der „Embodied Product Energy“, also der im Produkt verkörperten Energie, die aufgewendet werden muss, das Produkt zu erzeugen. Im Zuge von Life Cycle Assessments (LCA) wird ein System der Energieeinsatzbilanzierung entwickelt – dieses unterscheidet Energie in:

- Direkte Energie (DE): benötigte Prozessenergie, die sich zusammensetzt aus:
    - Theoretischer Energie (TE): theoretisch minimal für den eigentlichen Prozess benötigte Energie
    - Sonstige/Auxilliary Energy (AE): Energie für Unterstützungsaktivität (z.B. Pumpen, Kühlen...)
- Indirekte Energie (IE): Energieeinsatz für die Fertigungsumgebung und Infrastruktur, der über eine Zonenbilanzierung erfasst wird

Obwohl die Bilanzierung aus einem Lebenszyklusgedanken heraus entstanden ist, geht in die Bilanzierung der EPE nur die in der Produktion anfallende Energiemenge ein, die verkörperte Energie der Vorprodukte bleibt unbetrachtet. Bezüglich der Unterscheidung in TE und AE ist es nicht ganz eindeutig, ob mit TE nur die für die Wertschöpfung benötigte Energie gemeint ist – also im Falle einer zerspanenden Bearbeitung die näherungsweise zu berechnenden Schnittkräfte – oder die gesamte Energie der Aktorik des Hauptprozesses, also beispielsweise inklusive der

elektrischen Energie, die das System als Abwärme verlässt und die in der Regel im Bereich von 90% des Gesamtenergieinputs der Anlage liegt. In beiden Fällen müsste die gesamte Energie erfasst werden, z.B. über Messungen, da eine reine Berechnung wesentlicher Bestandteile des Energiebedarfs nicht möglich ist; die Relevanz der Unterscheidung aus Anwendungsperspektive ist daher fraglich. Da der Simulationsansatz auf DES basiert, ist keine oder nur eine stark vereinfachte Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen den Produktionsanlagen, der TGA und des Gebäudes möglich (vgl. Rahimifard et al. 2010). Die Implementierung der Simulation erfolgt pilotweise an einem vereinfachten Modell in der Simulationsumgebung Arena von Rockwell Automation, einem bekannten DES Programm. Eine Case-Study mit einem stark vereinfachten, dreistufigen Prozess – Gießen, Lackieren und Inspektion –, wird durchgeführt und eine generelle qualitative Auswertung erfolgt. Rahimfahrad nennt die Prozessoptimierung auf Basis der Simulation als mögliche Anwendung, schlägt aber selbst eher die Konzentration auf die Design-Phase von Produkten vor, da hier 90% der Lebenszykluskosten determiniert werden (vgl. Rahimifard et al. 2010).

Wie die vorher vorgestellten DES basierten Methoden teilt sich dieser Ansatz die Vor- und Nachteile in Bezug auf die gestellten Anforderungen. Die Bilanzierung auf Basis der Lebenszyklusbetrachtung und anhand der Kennzahlen ist interessant, allerdings umfasst die Detailausgestaltung nur den in der Produktion anfallenden Anteil und geht somit nicht über die bereits vorgestellten Konzepte hinaus. Das Konzept der Zonenbilanzierung indirekter Energie, also Energie der Peripherie, ist für die vorliegende Arbeit interessant. Die Abbildung des spezifischen Energieeinsatzes wird nicht näher ausgeführt, es kann von statusbasierten Energieeinsatzdaten ausgegangen werden. Eine Planungsoptimierungsfunktionalität wird nicht beschrieben.

4.2.14 Abele – simulationsgestützte Energieeinsatz-Vorhersage für Bearbeitungsmaschinen

Der von Abele entworfene Ansatz (Abele et al. 2015) hat das Ziel, den Energiebedarf von Anlagen durch eine detaillierte, auf der Steuerungsebene der Maschinen aufgesetzte, Simulation abzubilden. Der Ansatz vereint empirische und mathematische Modellansätze und ist Matlab/Simulink basiert. Die NC-Programme von Maschinen werden als Input genutzt, Anlagenbestandteile werden in Matlab modelliert und vom Simulator interpretiert – also die NC-Programme hinsichtlich Kräften und Geschwindigkeiten ausgewertet und der Energieeinsatz ermittelt. Eine Case Study für den Aluminium-Fräsprozess an einer Anlage bestätigt die grundsätzliche Funktionstauglichkeit des Modells, zeigt aber auch Abweichungen,

die aufgrund kleiner Abweichungen im Verhalten von Komponenten, z.B. der Kühlung, begründet sind (vgl. Abele et al. 2015).

Der Vorteil der Modellierung auf NC-Steuerungsebene von Maschinen ist die Flexibilität, auch komplexes Verhalten von Anlagen abbilden zu können. Theoretisch wäre damit auch die Modellierung thermisch-dynamischen Verhaltens von Anlagen möglich. Der Nachteil liegt aber im Detaillevel: Komplexe reale Fabriksysteme lassen sich hiermit nur mit enormem Aufwand modellieren, die Rechenzeiten für die dadurch entstehenden Modelle würden sehr wahrscheinlich problematisch für einen Praxiseinsatz werden und die Datenanforderungen würden zusätzlich großen Aufwand mit sich bringen. Außerdem ist die Simulationsumgebung Matlab nicht geeignet, um komplexes diskretes Verhalten abzubilden. Damit ist das Konzept bezüglich der Modellierung auf Maschinenebene durchaus interessant für die vorliegende Arbeit, allerdings eignet sich der vorgestellte Simulationsansatz in der Form nicht für die Komplettabbildung des Gesamtsystems Fabrik, insbesondere nicht für das diskrete Verhalten, also den Materialfluss und die Auftragsbearbeitung.

4.2.15 Löfgren – DES in einer Lebenszyklusbetrachtung

Der von Löfgren veröffentlichte Ansatz (Löfgren 2009) ist ein weiteres Beispiel für eine DES basierte Methode mit statusbasierten Energieprofilen, die für ein Life Cycle Assessment (LCA) des Energieeinsatzes in der Produktion genutzt wird. Eine einfache DES der Produktionsanlagen bildet die Produktion ab, so dass Wirkbeziehungen zwischen klassischen Planungsstellgrößen und Energie relevanten Reaktionsgrößen des Systems dargestellt werden können. Eine vereinfachte Case-Study wird gegeben.

In den Diagrammen ist das Systemverhalten anhand von vier Output-Kenngrößen – dem Elektroenergie-Verbrauch, den CO_2-Emissionen, dem Elektroenergie-Verbrauch pro Produkt und den CO_2-Emissionen pro Produkt – dargestellt und zwar jeweils in Reaktion auf eine 50% Erhöhung von einer von sieben Stellgrößen. Die Stellgrößen umfassen aber keine Planungsstellgrößen, sondern eher technische Eigenschaften des Systems, und sind damit eher geeignet, grundsätzliches Systemverhalten abzubilden. Es wird beispielsweise ersichtlich, dass sich der Energieeinsatz und die CO_2-Emissionen insgesamt und pro Produkt nicht gleich verhalten. Im Vergleich zu den bislang vorgestellten DES basierten Ansätzen ist diese Methode eher konzeptionell angelegt.

4.2.16 Cannata - Prozessanalyse und -verbesserung

Das Konzept von Cannata (Cannata et al.) stellt ein Vorgehen von der Analysephase über die Modellierung, die Aufnahme von Energiemessungen und das Planen von szenariobasierten Verbesserungen im Zuge einer Prozessoptimierung des realen Systems vor. Der Ansatz basiert auf statusbasierter DES – Maschinenstatus werden in wertschöpfend und nicht-wertschöpfend unterteilt, das Ziel der Verbesserung wird definiert, eine State-Machine mit dem Verhalten einer Maschine wird aufgestellt und eine Prozessanalyse und Verbesserung nach vorher definierten Zielkriterien erfolgt. Das Konzept wird anhand eines vereinfachten Ein-Maschinensystems pilotimplementiert.

Der Ansatz ist eher konzeptionell und weniger im Detail und bezüglich Implementierung und Anwendbarkeit gestaltet. Die Anwendbarkeit für einen Einsatz für das Gesamtsystem Fabrik bleibt unklar. Der Materialfluss und die Produktionsperipherie werden nicht betrachtet. Die Prozessoptimierung erfolgt rein Szenario basiert, es gibt also keine Optimierung in einem Lösungsraum und keine automatisierte Verbesserung und Lösungsfindung.

4.2.17 Ansätze mit kontinuierlicher Simulation

Neben den Ansätzen zu diskreter Simulation gibt es Ansätze, die versuchen, das System Fabrik aus der Perspektive der kontinuierlichen Simulation zu beschreiben. An dieser Stelle soll nur stellvertretend der Ansatz von Andreassi genannt werden, der für den Fall der Kraftwerkssteuerung mehrerer Kraftwerke ein simulationsbasiertes Planungstool entwirft. Die Kraftwerke stehen in einem Netzwerk einem determinierten Energieeinsatz gegenüber und ihr Betrieb soll nach verschiedenen Strategien und Zielfunktionen optimiert werden (vgl. Andreassi et al. 2009). Das Ablaufverhalten ist hierbei sehr simpel modelliert und daher in einer kontinuierlichen Simulationsumgebung abbildbar. Auf Fabrikebene hat der in Kapitel 4.2.14 vorgestellte Ansatz Abele’s ähnliches für den Fall eines sehr einfachen diskreten Verhaltens des Systems, ebenfalls in einer kontinuierlichen Simulationsumgebung, aufgesetzt. Das Problem hierbei ist, wie dort beschrieben, dass für komplexes diskretes Verhalten, das in realen Produktionssystemen zu finden ist, keine geeignete praktikable Modellierung in kontinuierlichen Umgebungen möglich ist. Auch im Kapitel 4.2.4 zur Co-Simulation wurden die Ansätze beispielsweise der auf Modelica basierten Modelle aufgeführt und auch dort wurde die Eignung für kontinuierlich dominiertes Verhalten und die Nicht-Eignung für komplexes Materialflussverhalten festgestellt (vgl. Raich et al.). Zur Erfüllung der in Kapitel 3 aufgenommenen Anforderungen, der Abbildung des Gesamtsystems

Fabrik, inklusive des Energiesystems und seines thermisch-physikalischen Verhaltens sowie der Wechselwirkungen des Energiesystems mit dem diskreten Modellverhalten, ist nur eine kontinuierliche Modellierung geeignet. Gleichzeitig muss aber das diskrete Modellverhalten komplexer modelliert werden, als dies in kontinuierlichen Simulationsumgebungen möglich ist. Ein Ausweg, diesen hybriden Modellcharakter zu erfüllen, sind die vorgestellten Co-Simulationen, bspw. von Thiede, Junge und Leobner, allerdings mit dem Nachteil, dass hierbei Probleme mit der Rechenperformance und dem Umfang der Modellkopplung auftauchen.

4.3 Ansätze basierend auf Optimierungsprogrammen

Die vorherig vorgestellten Ansätze basieren alle darauf, eine Simulation, also ein digitales Modell der Fabrik, der Fertigung oder nur einzelner Maschinen und Anlagen, als eine Bewertungsfunktion zu verwenden und damit entweder szenariobasiert Planungsvarianten auf ihre energetische und ökonomische Wirkung zu überprüfen oder über ein angeschlossenes Optimierungsmodul mit der Simulation eine bestmögliche Planungsvariante zu finden. Nur wenige der vorgestellten Ansätze enthalten ein derartiges Optimierungsmodul – am weitesten ausgeprägt ist das von Rager, wenn auch mit stärker vereinfachter Simulation, als beispielsweise bei Thiede und Junge. Aufgrund der Komplexität des Problems – die Stellgrößen und die Simulationsbestandteile ergeben eine extrem große Zahl möglicher Lösungen, so dass sich ein aus Optimierungssicht schweres NP-hartes Problem ergibt – ist es anspruchsvoll, eine geeignete Optimierungsheuristik zu finden, die in angemessener Zeit, gute Planungslösungen findet. Dieses Problem umgehen die nun folgend vorgestellten Ansätze, die keine dynamische Simulation verwenden und das Problem stattdessen in einem mathematisch-analytisch formulierten Programm abbilden. Diese Programme haben eine geringere Komplexität als die umfangreichen Simulationen der meisten vorher vorgestellten Ansätze und sind daher einfacher für eine Optimierung oder Optimierungs-Heuristiken zu lösen. Aufgrund ihrer in der Regel geringeren Komplexität, ist die Bedeutung dieser Ansätze für die vorlegende Arbeit geringer als die der simulationsbasierten Methoden und daher werden die Optimierungsprogramme in kompakterer Form analysiert.

Der erste Ansatz von Morawetz (Morawetz 2015) steht stellvertretend für Ansätze, die das Produktionsplanungsproblem als klassisches Optimierungsprogramm aufstellen und über eine klassische Optimierung lösen. Der Solver für die Optimierung wird auf das Programm zugeschnitten und kann die bestmögliche Lösung finden. Als Stellgrößen enthält das Modell Flexibilitätsmaßnahmen in der Personalplanung, also Überstunden, Wochenendarbeit und ähnliche, und kann dabei das reale Planungsproblem einer Elektronikfertigung in der Modellbildung so weit

vereinfachen, dass es nicht NP-hart wird und damit für die Optimierung lösbar ist. Der Ansatz enthält allerdings keine Energiebetrachtung und für die in Kapitel 3 ermittelte Anforderung der operativen Produktionsplanung und Anlagenplanung der Peripherie reicht das Modell-Detaillevel nicht aus. Insbesondere mit dem Energiesystem ist, wie bspw. in Kapitel 4.2.5 gezeigt, keine Modellierung in einem Programm mehr möglich, dass mit einer echten Optimierung zu lösen ist, ohne das System so stark zu vereinfachen, dass es die gestellten Anforderungen nicht mehr erfüllt.

Die folgenden Ansätze enthalten jeweils einen Energiesystem-Aspekt in der Produktion und sind bezüglich der Modellbildung auch jeweils als mathematische Programmierung formuliert, sie sind allerdings aufgrund ihrer Komplexität NP-hart und damit nur noch durch Heuristiken zu lösen.

Der Ansatz von He (vgl. He et al. 2015) stellt ein Modell mit hinterlegten spezifischen Energieverbräuchen dar, das über Mixed Integer Programming (MIP) formuliert ist. Die Optimierung erfolgt aber über den Nested Partitions (NP) Ansatz, der den Suchraum zerlegt und durchsucht, wobei die vielversprechendsten Suchräume ausgewählt werden. Das Verfahren kombiniert dabei globale und lokale Suche (Shi, Ólafsson 2000). Für einen Test-Case mit vier Aufträgen auf fünf Anlagen, mit unterschiedlicher technologischer Bearbeitungsfolge, kann der Algorithmus erfolgreich gute Lösungen finden. Das Modell ist gegenüber den gestellten Anforderungen stark vereinfacht und der Optimierungsansatz wird nicht mit anderen bezüglich Performance und Ergebnisgüte verglichen.

Shrouf (vgl. Shrouf et al. 2014) stellt einen Ansatz vor, der ein Optimierungsproblem für das Terminieren von Aufträgen bei einem im Zeitverlauf veränderlichen Energiepreis beschreibt. Das Problem wird als NP-schwer eingeordnet und mit einem Genetic Algorithm erfolgreich bearbeitet.

Im Ansatz von Dai (vgl. Dai et al. 2013) wird eine Optimierung mit einem Genetischen Algorithmus erreicht, der schnell ein bestimmtes Lösungsniveau erreichen soll, um dann mit einem Simulated Annealing Algorithmus dieses Ergebnis weiter zu verbessern. Als Grund für die Hybridisierung des GA wird die Anfälligkeit für das Festsetzen in lokalen Optima genannt – das ist insofern ungewöhnlich, als in der Literatur genau das Finden globaler Optima und die Robustheit gegenüber lokalen Optima in komplexen Suchräumen als Vorteil des GA genannt wird (vgl. Sivanandam, Deepa 2007) und die Schnelligkeit, je nach Populationsgröße eher als Problem des GA – somit entgegengesetzt zur von Dai genutzten Argumentation.

Im Ansatz von Fang (vgl. Fang et al. 2011) wird ein Programm gelöst, in dessen Zielfunktion der CO_2-Footprint als Zielfunktion dient.

Eine Reihe weiterer ähnlicher Ansätze werden im Buch von Pochet (vgl. Pochet, Wolsey 2006) vorgestellt, die jeweils als Mixed Integer Programming formuliert sind und mit verschiedenen Optimierungsalgorithmen gelöst werden. Die Gemeinsamkeit aller in diesem Abschnitt vorgestellten Ansätze auf Basis von Optimierungsprogrammen ist, dass sie in der Modellierung so stark vereinfacht wurden, dass sie das komplexe Fabriksystem nicht umfangreich genug abbilden, um die festgehaltenen Anforderungen an die in dieser Arbeit entwickelte Methode erfüllen zu können. Das Energiesystem ist Prinzip bedingt nur deterministisch hinterlegt und das komplexe Systemverhalten mit Interaktion der Bestandteile kann nicht abgebildet werden, genauso wenig wie die auftragsgenaue Planung, die im Bedarfsfall bis auf das Einzelprodukt genau planen können muss. Die Stellgrößen der PPS und der Anlagensteuerung sind ebenfalls Prinzip bedingt zu stark vereinfacht. Die Zielfunktionen, entweder basierend auf Energieeinsatz, Kosten oder CO_2-Footprint, hingegen sind relevant für die vorliegende Arbeit. Auch die Wahl geeigneter Optimierungs-Heuristiken für schwere NP-harte Probleme ist relevant – allerdings ist für das beabsichtigte Simulationsmodell eine noch größere Komplexität der Optimierungsaufgabe zu erwarten, da mit der Steuerung nicht nur der Produktion, sondern auch aller Anlagen der Peripherie, mehrere Kategorien an Stellgrößen hinzukommen, die den Lösungsraum stark vergrößern werden. Dennoch ist der häufig verwendete GA, der auch bei Rager für eine simulationsgestützte Optimierung Verwendung gefunden hat, ein logischer Startpunkt für die Entwicklung des Optimierungsmoduls der vorliegenden Arbeit.

4.4 Entwicklungsbedarf zu bestehenden Ansätzen

In diesem Abschnitt soll der von der vorliegenden Arbeit zu leistende Entwicklungsbedarf definiert werden, der notwendig ist, um, ausgehend von den in den drei vorhergehenden Kapiteln untersuchten vorhandenen Ansätzen, eine Methode zu erhalten, welche die zuvor in Kapitel 3 ermittelten Anforderungen an das Planungswerkzeug erfüllt. Zu Beginn soll dafür die Tabelle 1 einen Überblick über die Analyse und Auswertung der bestehenden Ansätze geben – in ihr ist jeweils die Bewertung der Ansätze nach den Kriterien aus der Anforderungsdefinition enthalten, inklusive einer Verdichtung auf eine Gesamtbewertung für jeden Ansatz. Es wurde eine fünfstufige Bewertungsskala, dargestellt in Kreissymbolen, gewählt – je besser ein Kriterium erfüllt ist, desto mehr schwarze Kreissegmente erscheinen. Dabei ist zu beachten, dass diese quantitative Bewertung nur eine Ergänzung und ein Versuch

der Verdichtung der in den drei vorherigen Kapiteln festgehaltenen Analyseergebnisse darstellt.

Tabelle 1: Bewertungsübersicht bestehender Planungsansätze[6]

Anforderungen	A1			A2	A3	A4	A5		
Simualtionsbasierte Ansätze	Simulation bildet ab:				Planung und Steuerung der Methode umfasst Produktion (PPS) und die alle relevanten Anlagen der Peripherie	Beinhaltet Planungs-optimierungs-Funktion	Erweiterbar-keit, Anpassbarkeit und Aufwand auf neue Anwendungs-fälle	Anwendungs-bereit	Erfüllung der Anforderungen insgesamt
	Logistik-system	Produktion auftragsgenau	Peripherie (TGA, Hilfsanalgen, Gebäude)	Interaktion zwischen Materialfluss und thermisch-physikalischem Energisystem					
Thiede	◔	◕	●	◑	◑	◔	◑	◕	◑ 2,3
Junge	◔	◕	◕	◔	◑	◑	◔	◕	◑ 2,0
Martin	◔	◕	●	◑	◑	◑	◔	◔	◑ 2,0
Leobner	○	○	●	◑	◔	○	◔	◕	◔ 1,4
Rager	○	◑	◑	○	◑	◕	◑	◑	◑ 1,6
Wohlgemuth	◑	○	◔	○	◔	○	◔	◔	◔ 0,8
Solding	○	◑	○	○	◔	○	◑	◔	◔ 0,8
Heilala	○	◑	◔	◔	◔	○	◔	◔	◔ 0,9
Michaloski	◑	◔	●	◔	◔	○	◔	○	◔ 1,3
Weinert	○	◑	◑	◔	◔	○	◔	◔	◔ 1,0
Dietmayr	○	◑	◔	◔	◔	○	◔	◔	◔ 0,9
Haag	◔	◑	◑	◔	◔	◔	◔	◔	◔ 1,3
Rahimfarad	○	◔	◑	○	◔	○	◔	○	○ 0,6
Abele	○	◔	◑	◕	○	○	◔	○	◔ 0,9
Löfgren	○	◔	◔	○	○	○	◔	○	○ 0,4
Cannata	○	◔	◔	○	◔	○	◔	○	○ 0,5
kontinuierliche Simulation	○	○	◕	◕	◔	○	◔	○	◔ 1,0
Optimierungsbasiert	○	◔	○	○	◔	●	◔	○	◔ 0,9

Auf den ersten Blick erscheint eine Kombination der detailliert simulierten und auf eine operative PPS ausgelegten Ansätze von Thiede und Junge mit dem Optimierungsmodul von Rager und der Logistiksystembetrachtung von Michaloski und Wohlgemuth sinnvoll. Dazu sind allerdings wichtige Einschränkungen zu nennen, die auch in den jeweils „starken“ Kategorien der jeweiligen Ansätze noch erheblichen Weiterentwicklungsbedarf bedeuten. So sind die Ansätze von Thiede und Junge bezüglich der Verwendung für die operative Planung, also ähnlich einem Advanced Planning System (APS) oder der Unterstützung eines APS, noch weiter zu entwickeln. Außerdem müsste hierbei die Steuerung der Aggregate der Peripherie noch integriert werden. Auch die Qualität der Abbildung des hybriden Charakters des Modellverhaltens, ist die bislang umgesetzte Co-Simulation der Ansätze noch zu wenig integriert – dies ist gleichzeitig auch eine der bedeutendsten Elemente des Entwicklungsbedarfes, da diese hybride Modellierung eventuell die Entwicklung

[6] Die Bewertungsskala umfasst ganze Zahlen von 0 bis 4, korrespondierend zu 0 bis 4 ausgefüllten Kreissegmenten; die Gesamtbewertung jedes Ansatzes ist der nicht gewichtete Durchschnitt aller seiner Teilbewertungen. Es geht hierbei weniger um eine Quantifizierung der Eignung, sondern um eine grundsätzliche Orientierung bzw. Ranking der Ansätze nach Gesamt-Eignung, bezogen auf die ermittelten Anforderungen.

eines neuen hybriden Simulators erfordert, der das hybride Verhalten nicht über eine grobe und Prinzip bedingt lose Kopplung mehrerer Simulatoren umsetzt, sondern das Systemverhalten in jedem seiner Elemente hybrid abbildet. Übertragen auf die von Thiede und Herrmann aufgestellten Simulationsparadigmen, dargestellt in Abbildung 33, bedeutet dies die Aufstellung eines neuen Paradigmas D, das die verteilten Simulationsdomänen von Paradigma B in einem hybriden Simulator vereinigt und gleichzeitig, wie in Paradigma C, integriert eine Bewertungsfunktion beinhaltet und, darüber hinausgehend, daran gekoppelt auch eine automatische simulationsgestützte Planungsoptimierung beinhaltet.

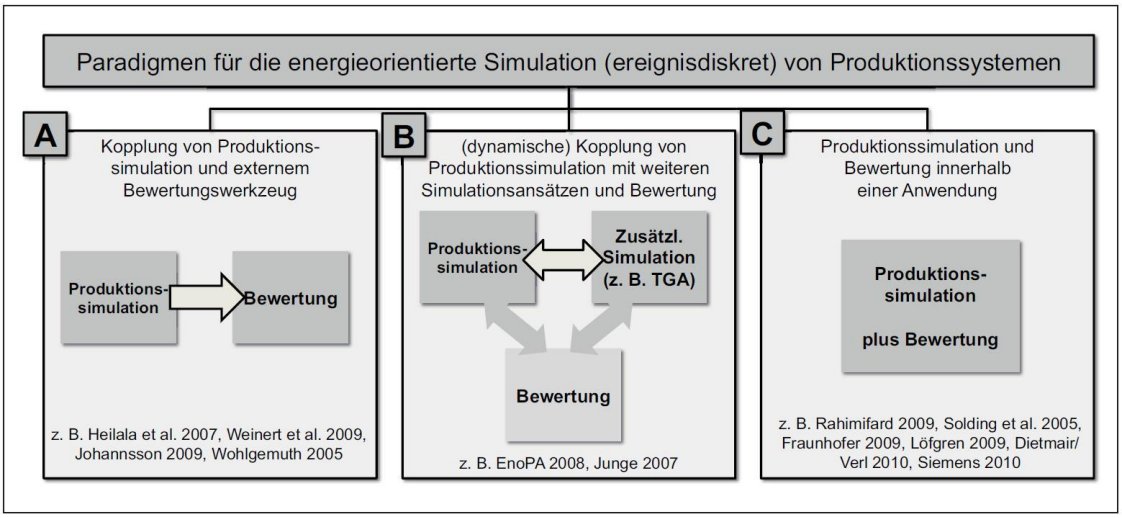


Abbildung 33: Simulationsparadigmen - Zusammenfassung durch Herrmann (Neugebauer 2014, S. 603)

Auch in der Optimierung von Rager besteht insofern Entwicklungsbedarf als dass das eben erwähnte hybride Simulationsmodell weit komplexer sein wird und damit einen größeren Suchraum erzeugt, resultierend in einer schwerer zu lösenden Optimierungsaufgabe für das Optimierungsmodul. Und letztlich kann auch die genannte Logistiksystembetrachtung von Wohlgemuth nicht einfach für die vorliegende Arbeit übernommen werden, da diese vorhandene Betrachtung im Wesentlichen auf einer Sankey-Diagramm-Auswertung beruht. Diese Art der Darstellung ist für die Auswertung durch einen menschlichen Planer gedacht, lässt sich aber nicht gut in einer Simulation integriert mitauswerten und in einem Optimierungsmodul mitbewerten. Für das Logistiksystem muss also eine andere Art der Abbildung entwickelt werden. Der Entwicklungs- bzw. Forschungsbedarf für die vorliegende Arbeit wird folgend zusammengefasst:

Entwicklungsbedarf 1 – simulationsgestützte energetische Bewertung von Logistikprozessen:

Der in den Systemen der Logistik – Transport, Handhabung und Lager – anfallende

Energiebedarf muss, ähnlich dem Energiebedarf der Fertigung und der Peripherie, in der Simulation mit erfasst werden können. Dafür muss eine geeignete Möglichkeit gefunden werden, den Energieeinsatz in der Simulation mit zu bewerten.

Entwicklungsbedarf 2 – Simulation des Gesamtsystems aus Produktion, TGA, Gebäude inklusive der Wechselwirkungen aller Systembestandteile: Hierfür muss das hybride Systemverhalten – kontinuierliches physikalisch-thermisches Verhalten des Energiesystems und diskretes Verhalten des Materialflusses und der Auftragsbearbeitung – mit einem hybriden Simulationsmodell abgebildet werden, das über die vorhandenen Co-Simulationsansätze hinausgeht. Dafür ist ein hybrider Simulator die aussichtsreichste Möglichkeit. Allerdings erfordert dieser nicht nur einen hohen Entwicklungsaufwand, sondern stellt auch hohe Datenanforderungen, so dass, zumindest für Teilsysteme, eine diskrete Vereinfachung bzw. Abstraktion bestimmten physikalischen Verhaltens denkbar ist. Beide Ansätze sollen betrachtet werden. Innerhalb der Simulation ist die Wahl eines geeigneten Detaillevels der Abbildung des produktspezifischen Energiebedarfes bedeutsam. Eine Möglichkeit sind die vorgestellten auf Anlagenstatus basierten Ansätze. Eine Sonderform bildet hierbei die Modellierung bis auf NC-Steuerungsebene für mehr Genauigkeit versus das Hinterlegen eines Leistungsprofils im Zeitverlauf, das für jedes Produkt hinterlegt werden könnte. Auch eine Kombination ist denkbar. Die Simulation sollte hierbei flexibel sein, da sich die Art der Modellierung des spezifischen Energiebedarfes auch in Zukunft noch weiterentwickeln wird, im Spannungsfeld zwischen realitätsnaher Abbildung und Aufwand für die Abbildung. Die Simulation sollte weiterhin modular aufgebaut und flexibel bezüglich der Anwendung für verschiedene Anwendungsbereiche im Bereich Produktion sein. Die Modularität und eine konsistente hierarchische Struktur sind dabei anzustreben, um das Planungswerkzeug mit relativ geringem Aufwand – im Vergleich zur Planung mit speziell auf einen Anwendungsfall zugeschnittenen Systemen – für eine Vielzahl an Anwendungen anpassen und effizient für die Planungsunterstützung nutzen zu können.

Entwicklungsbedarf 3 – Planungsoptimierung:
Ein Modul für die automatische Planungsoptimierung muss für die komplexe hybride Simulation entwickelt werden. Die Planungsstellgrößen umfassen dabei nicht nur die klassischen PPS-Parameter, wie Terminierung und Sequenzierung sowie Maschinenbelegung, sondern auch die Steuerung der relevanten Anlagen der Peripherie bis hin zu TGA und Gebäude. Im Zielsystem der Optimierung sollten zudem die Möglichkeiten flexibler Energietarife und die damit verbundene gezielte Anpassung der Produktion auf variable Energiepreise berücksichtigt werden. Die Herausforderung liegt in der Größe des sich ergebenden Suchraums, innerhalb

dessen die Optimierung, in aus praktischer Planungssicht akzeptabler Zeit, gute Planungslösungen finden können muss. Als akzeptable Zeit können dabei wenige Stunden angesehen werden, um beispielsweise eine Übernachtplanung des nächsten Tages oder Woche anzustoßen und, möglicherweise ergänzend dazu, regelmäßige kurze Planungsläufe innerhalb eines Tages, um auf veränderte Rahmenbedingungen reagieren zu können, die sich im Minutenbereich bewegen sollten. Aus diesen Entwicklungsanforderungen ergibt sich eine Ergänzung beziehungsweise Detaillierung der Forschungsfrage der vorliegenden Arbeit. Diese erfolgt im folgenden Kapitel 5.

5 Detaillierte Zielsetzung der Arbeit

Die grundsätzliche Fragestellung (vgl. Kapitel 1.2) wird folgend detailliert, indem Sub-Fragen aufgestellt werden, die wiederum aus der Anforderungsanalyse (vgl. Kapitel 3) bzw. der Analyse des Forschungsbedarfs (vgl. Kapitel 4.4) abgeleitet sind. **Die übergeordnete Fragestellung ist:** Wie kann eine Planungsmethode für die Produktionsplanung und Steuerung mit Einbeziehung der Energieeffizienz in das Zielsystem gestaltet werden?

Sub-Frage 1: Wie kann die Intralogistik bezüglich ihres Beitrages zum Energieeinsatz simuliert werden?

Sub-Frage 2: Wie kann das Gesamtsystem aus Maschinen/Anlagen, Technischer Gebäudeausstattung und Gebäude simuliert werden, so dass Wechselwirkungen der Systeme und sowohl die Materialflusskomponente wie auch der thermisch-energetische Aspekt abgebildet werden?

Sub-Frage 3: Wie kann eine Optimierung gestaltet sein, die zusammen mit der Simulation das Finden bestmöglicher Planungslösungen ermöglicht, mit einem Zielsystem unter Berücksichtigung des Faktors Energieeffizienz?

Die im Kapitel 3 (Anforderungen) und Kapitel 4.4 (Entwicklungsbedarf) darüber hinaus aufgeführten zusätzlichen Anforderungen, besonders an die Simulation – z.B. Modularität, hierarchische Struktur, leichte Anpassbarkeit auf neue Anwendungsfälle – sind als Nebenbedingung der Forschungsfrage sowie der Sub-Fragen zu verstehen.

6 Konzeptentwicklung für eine simulationsgestützte Planungsmethode

In diesem Kapitel wird das Konzept in drei Elementen entwickelt, korrespondierend zu den oben aufgestellten (Sub-)Forschungsfragen.

6.1 Abbildung des Gesamtsystems inklusive Interaktion der Systembestandteile (Maschinen, TGA, Gebäude)

Im ersten Subkapitel der Konzeptentwicklung wird die Abbildung des Fertigungssystems beschrieben: zunächst die allgemeine Modellierung, gefolgt von der Implementierung in einem Konzept der hybriden Simulation.

6.1.1 Modellierung für eine integrierte Simulation

In diesem Unterkapitel werden die wesentlichen Elemente der Simulationsmodellierung entwickelt: die Struktur, die Systemgrenzen sowie die Modellierung des spezifischen Energieeinsatzes von Produkten.

6.1.1.1 Struktur und Systemgrenzen

In der Struktur der methodengestützten Planung können mehrere Ebenen unterschieden werden: In einer Top-Down Betrachtung, gibt es zunächst die äußere Struktur, der Rahmen, in dem die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Planungsmethode in die Planung eines produzierenden Unternehmens eingebunden wird. Die genaue Ausgestaltung bzw. Implementierung dieser Ebene ist weniger forschungsrelevant – die Integration eines Software-Planungswerkzeuges ist vom Charakter her eine Entwicklungsaufgabe – und ist daher auch nicht Inhalt dieser Arbeit. Die Abbildung 34 stellt die grundsätzliche Struktur des Planungstool-Einsatzes dar. Das Planungswerkzeug empfängt ein Produktionsprogramm aus dem ERP System, dem MES oder, falls kein ERP-System für die Planung verwendet wird, wie in vielen KMU noch heute üblich, wird die grobe Planung des menschlichen Planers übernommen. Das Planungstool optimiert daraufhin den Produktionsplan – Feinplanung – und die Planung für die Aggregate der Peripherie. Am Ende wird das Ergebnis zurück in die Planungssysteme des Unternehmens zurückgespielt. Je nach Aufbau der Unternehmens-IKT kann das eine Übernahme der Planung in ERP, MES und Steuerungen bedeuten. Die Übergabe und detaillierte Ausgestaltung der Schnittstellen ist nicht Bestandteil dieser Arbeit – im hier präsentierten Entwicklungsstand wird das Planungsergebnis aus dem Planungstool von einem menschlichen Planer entgegengenommen und gegebenenfalls Veränderungen in

den relevanten Systemen des Unternehmens vorgenommen. Dieser Schritt kann in weiterer Folge durch eine Entwicklung standardisierter Datenübergabe und Schnittstellen automatisiert werden.

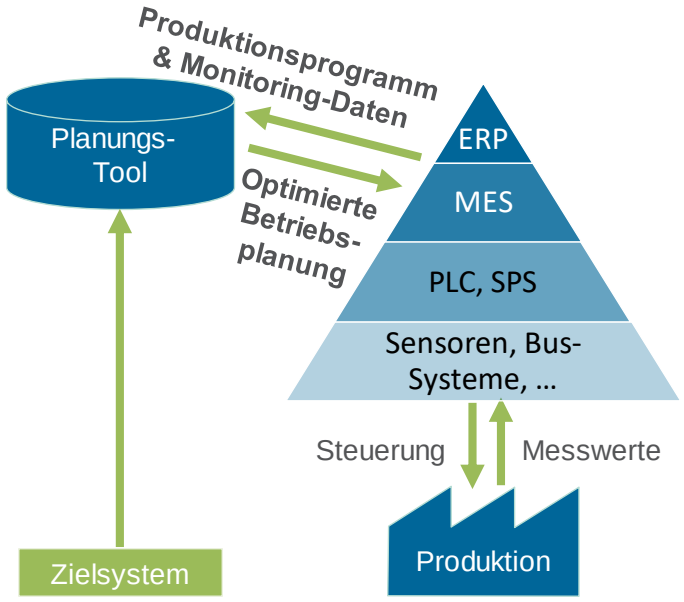


Abbildung 34: Äußere Struktur des Planungstool-Einsatzes

Unter der soeben vorgestellten äußeren Strukturebene, befindet sich die Ebene der Struktur des Planungswerkzeugs selbst. Die in Abbildung 33 in Kapitel 4.4 aufgeführten Simulationsparadigmen geben eine erste Orientierung für eine mögliche grundsätzliche Struktur. Das für die vorliegende Arbeit entwickelte Simulationsparadigma beinhaltet den hybriden Simulator, inklusive eines Bewertungsmoduls, als Bewertungsfunktion für die Planung und ein Optimierungsmodul für die Planung, die mit Hilfe des Simulators eine möglichst gute Planung, im Sinne des Zielsystems, ermittelt. Die daraus folgende Struktur ist in Abbildung 35 dargestellt.

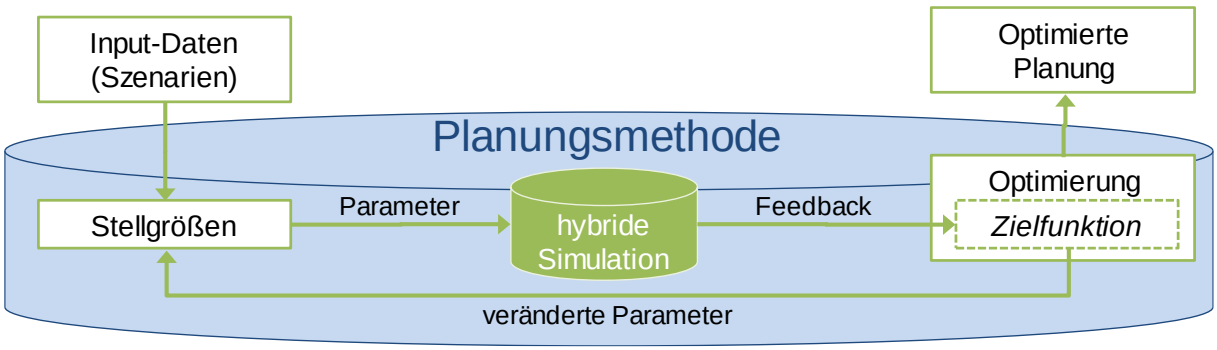


Abbildung 35: Struktur des Planungs-Werkzeugs

Der grundsätzliche Ablauf der Planung ergibt sich folgendermaßen: Eine Startlösung – ggf. auch mehrere – wird bzw. werden dem System aus der Unternehmens-IKT oder vom Planer direkt übergeben. Diese Startlösung ist eine mögliche, die Nebenbedingungen erfüllende, Lösung, die aber noch nicht nach den verschiedenen Zielen der Produktion optimiert ist. Im einfachsten Fall kann dies eine zufällige Aneinanderreihung aller Fertigungsaufträge sein, sowie die für die Aufträge geltenden Liefertermine, verbunden mit einem Anlagensteuerungsplan für die Peripherie, der – ebenfalls im einfachsten Fall – vorsieht, alle Anlagen während der gesamten simulierten Produktionszeit eingeschaltet zu lassen. In zukünftiger Entwicklung soll es durch ein angepasstes Modell auch möglich sein, dass nur noch ein Absatzplan anstelle des Produktionsplans übergeben wird und im Optimierungsmodul selbst eine Startlösung erstellt wird. Die letztgenannte Funktion ist für das Anwenden des Planungswerkzeuges zunächst weniger wichtig, sodass sie für den in dieser Arbeit präsentierten Forschungsstand noch nicht implementiert wurde. Das Modell ermöglicht aber die Integration dieser Funktion. Die Startlösung wird als Parameterset an die Simulation übergeben, die das Systemverhalten des Produktionssystems ermittelt – es wird, basierend auf der Startlösung, der Ablauf der Produktion über eine definierte Laufzeit simuliert. Die Simulation gibt am Ende jedes Simulationslaufes ein Feedback in Form von definierten Kenngrößen an das Optimierungsmodul ab.

Im Optimierungsmodul werden daraufhin die erhaltenen Feedbackwerte jedes Simulationslaufes mit Hilfe einer vorher definierten Zielfunktion bewertet und in eine Gesamtbewertung der Systemleistung für das gegebene Parameterset, also die jeweilige (Zwischen-)Lösung, verdichtet. Anhand dieser Gesamtbewertung jeder Lösung erkennt das Optimierungsmodul Verbesserungspotential und sucht gezielt oder zufällig – dies ist von der Art der Optimierung abhängig – nach besseren Lösungen, also Planungsvarianten. Die dadurch ermittelten nächsten Lösungen werden wieder als Stellgrößen und Parametersets an die Simulation übergeben und, analog zum Verfahren mit der Startlösung, bewertet. Dieser iterative Verbesserungsprozess läuft ab, bis ein Abbruchkriterium des Optimierungsmoduls erreicht wird. Näheres dazu wird im Abschnitt 6.3 ausgeführt. Dieser damit beschriebene Regelkreis der Planung ist ähnlich dem von Haag in Abschnitt 4.2.12 beschriebenen Ablauf der Planungsoptimierung, der allerdings auf ein Konzept beschränkt blieb.

6.1.1.2 Modellierung der Systembestandteile

Die unterste Struktur-Ebene ist die Struktur des Simulationsmodells selbst. Für die Entwicklung der Struktur, für das in der vorliegenden Arbeit entwickelte

Planungswerkzeug, sei zunächst noch einmal auf bestehende Strukturentwürfe aus Planungskonzepten (Abschnitt 4.2) als Startpunkt verwiesen. Das Konzept von Heilala (Abbildung 30) beschreibt ein System von Eingangs- und Ausgangsgrößen des Systems Produktion, sowie eine Reihe von Nebenbedingungen. Die Abbildung 36 zeigt mit der Struktur nach Doflou[7] ein ähnliches Konzept: Der direkte Materialfluss wird horizontal als Ein- und Ausgangsgrößen dargestellt, während vertikal zusätzliche Ein- und Ausgangsgrößen berücksichtigt werden, welche die Produktionsperipherie und die Energieflüsse berücksichtigen. Das Modellierungskonzept von Hopf (vgl. Hopf 2016) wurde parallel zur hierin vorgestellten Modellierung entwickelt und ähnelt dieser grundsätzlich. Die Unterschiede zeigen sich vor allem in der theoretischen Ausrichtung des Hopf-Ansatzes und der stärkeren Orientierung auf eine Simulations-Modellierung im vorliegenden Ansatz, in dem einheitliche Systemgrenzen Hierarchie- und Vererbungsregeln für Eigenschaften eine Notwendigkeit für die nachfolgend geplante integrierte Materialfluss- und Energiesystem Simulation, in einem objektorientierten Simulator sind.

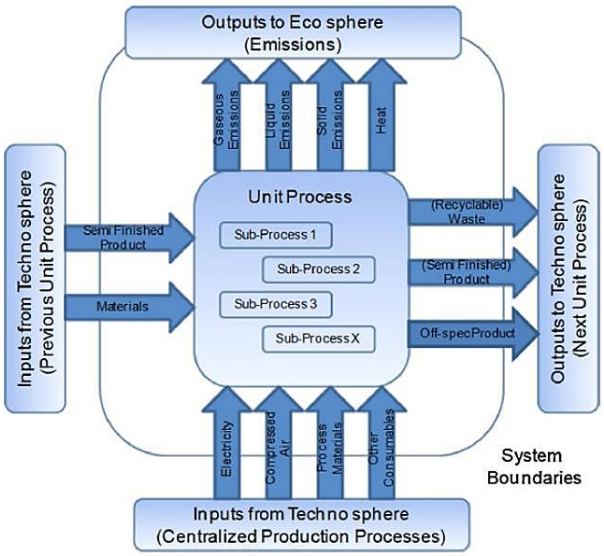


Abbildung 36: Systemgrenzen einer Prozesseinheit (Duflou et al. 2012)

Nachfolgend wird die Entwicklung einer Modellstruktur, sowie der Modellierung selbst, für die in dieser Arbeit entwickelte Methode, beschrieben. Grundsätzlich orientiert sich die Struktur an den im vorigen Abschnitt gezeigten System aus Eingangs- und Ausgangsgrößen aus Systemelementen, mit Prozessen und

[7] Die Struktur von Doflou findet unter anderem im Konzept von Thiede Anwendung, der auch Mitautor der entsprechenden Veröffentlichung ist.

Zustandsänderungen im Inneren. Die Abbildung 37 zeigt die Struktur der Simulation bzw. eines Simulationsbausteins. Im Kern besteht die Struktur der Simulationsbausteine aus Ein- und Ausgangsgrößen, jeweils für den Materialfluss, das Energiesystem und für den Informations- bzw. Daten-Fluss.

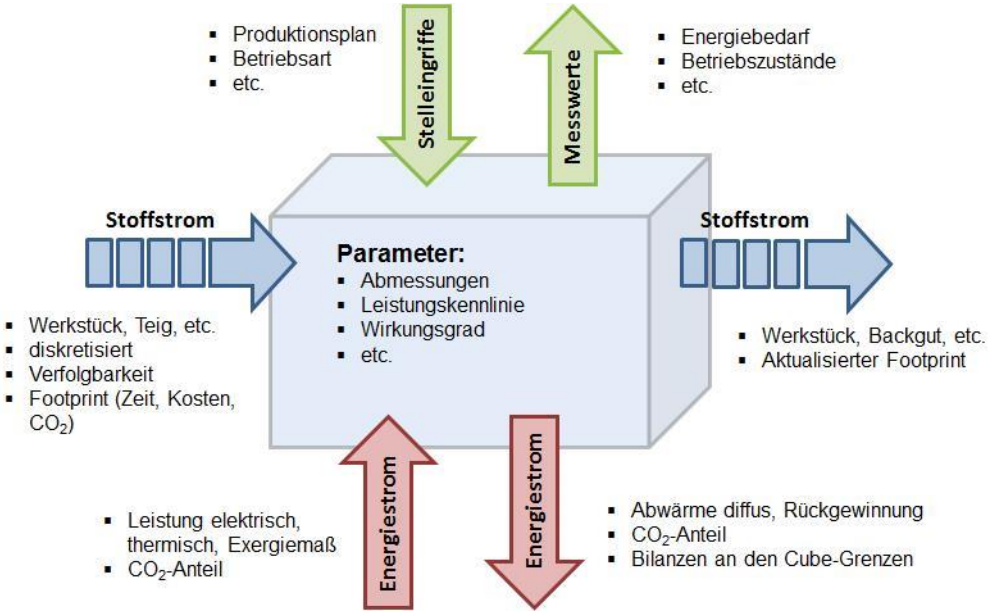


Abbildung 37: Cube-Beschreibung mit Schnittstellen

Die Bausteine werden Cubes genannt – dies verweist auf die spezielle Art der Modellierung von Systemgrenzen und die Bildung von Simulationsbausteinen. Diese Besonderheit trägt wiederum der hybriden Simulation Rechnung, die für diese Arbeit entwickelt wird. Während für die klassische Art der Simulation eines komplexen Systems, beispielsweise über gekoppelte Simulation (vgl. Abschnitt 4.2, Junge, Thiede), die verschiedenen Teilsysteme in gesonderten Simulationsumgebungen modelliert werden und damit voneinander unterschiedliche Systemgrenzen aufweisen, werden im Cube-Ansatz der Modellierung einheitliche Systemgrenzen für alle Größen – Material, Energie, Zeit, Kosten – gezogen. Der Unterschied ist in Abbildung 38 in einer Prinzip-Skizze verdeutlicht. Die Modellierung mit einheitlichen Systemgrenzen passt dabei zum Konzept einer integrierten Simulation des Gesamtsystems Produktion mittels einer hybriden Simulation. Gleichzeitig erleichtert diese einheitliche Modellierung den Aufbau der Simulation aus standardisierten Simulationsbausteinen, den Cubes, für einen modularen Simulationsaufbau. Die Cubes können unterschiedliche Anlagen in der Produktion, Peripherie und Gebäude beschreiben und zu größeren Modellen kombiniert und verknüpft werden. Auch eine klare Hierarchie im Modellaufbau wird möglich: Ausgehend vom äußeren Cube, dem des gesamten Fabrikgebäudes, können darin Cubes für Räume, Bereiche, Produktionslinien und darin wieder Maschinen, als Sub-Cubes innerhalb der

übergeordneten Cubes, erstellt werden. Damit lassen sich alle benötigten Teilsysteme modellieren und verknüpfen.

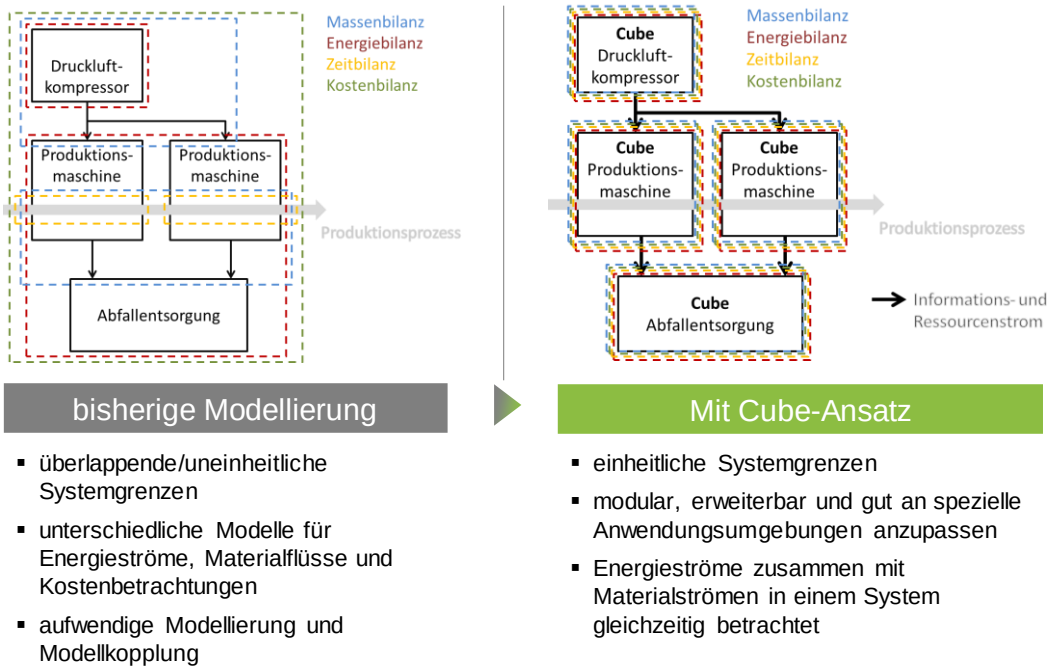


Abbildung 38: Modellierungsansatz – Besonderheit des Cube-Ansatzes

Es gibt dabei Cube-Klassen für jedes Teilsystem, die aber immer gleichartige Systemgrenzen und Schnittstellen aufweisen und daher beliebig kombiniert werden können. Eine Übersicht der grundsätzlichen Cube-Klassen bietet die Abbildung 39 – diese umfasst grundsätzlich alle zum derzeitigen Entwicklungsstand benötigten Teilsysteme, von den Produktionsanlagen, über Gebäude und Räume – modelliert als thermische Zonen – bis hin zu Elementen der TGA und des Logistiksystems. Weitere Cube-Klassen können zukünftig bei Bedarf ergänzt werden, dabei ist damit zu rechnen, dass dies höchstens Ergänzungen der Sub-Klassen betreffen wird, vermutlich aber eher Sub-Klassen unter den in der Übersicht abgebildeten.

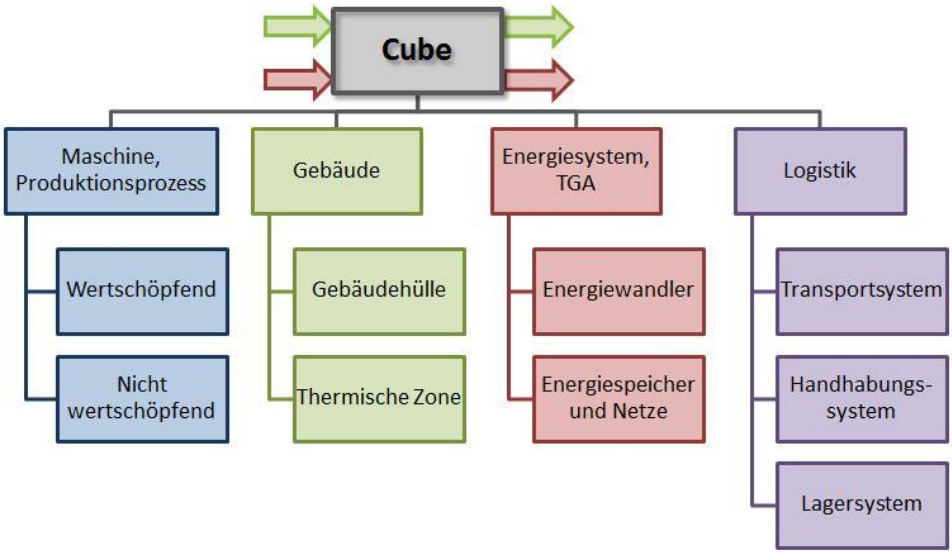


Abbildung 39: Cube-Klassen (Modell-Struktur)

Die Sub-Cube-Klassen werden nach einem einheitlichen Cube-Modellierungs-Schema entwickelt. Diese Cube-Modellierung muss den Anforderungen der hybriden Simulation genügen. Im Folgenden wird die Cube-Modellierung am Bespiel des Cube-Modells eines Industrieofens, ein Sub-Cube der Maschinen- bzw. Produktionsprozess-Cubes (wertschöpfend) beschrieben. Dieser eignet sich besonders als Referenz, da er ein komplexes Verhalten, bestehend aus einem Materialflussverhalten und einem ausgeprägten thermisch-physikalischen Verhalten, zeigt – also den hybriden Simulations-Charakter der Cubes besonders gut repräsentiert. Das in Abbildung 40 dargestellte Schnittstellendiagramm zeigt die Ein- und Ausgänge des Cubes sowie seine Zustandsgrößen. Der Cube kann für jede Art Ofen – z.B. Härteöfen, Trockenöfen, Lötverfahren, Backöfen – genutzt oder ggf. noch angepasst werden. Theoretisch kann das Modell auch zur Kühlung verwendet werden, somit sieht beispielsweise das Cube-Modell für einen Kühler mit ähnlichem Materialflussverhalten sehr ähnlich aus. Sämtliche Parameter des Cubes können entweder direkt hinterlegt oder über einen separaten Arbeitsplan zur Verfügung gestellt werden; diesen Freiraum lässt die Modellierung bei der Implementierung des Simulationsmodells. Der Innenraum des Ofens wird über ein Volumen beschrieben und der Wärmedurchgang UA der Ofenwand beschreibt das Verhalten nach außen.

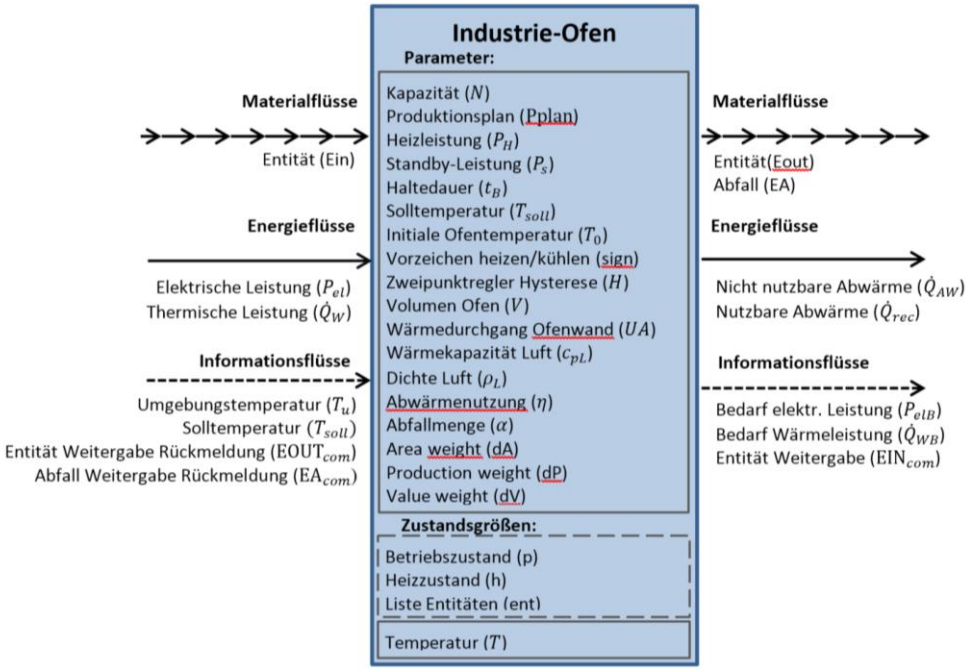


Abbildung 40: Schnittstellendiagramm der Cube-Klasse Industrie-Ofen (Grafik ist Teil des Projektergebnisses des Forschungsprojektes Balanced Manufacturing, in das die Arbeit eingebunden ist)

Das innere Verhalten des Ofens wird zum einen über das kontinuierliche, thermisch-physikalische Verhalten charakterisiert und zum anderen über das diskrete, Materialfluss- und Prozessablauf bezogene Verhalten. Das kontinuierliche Verhalten wird dabei über differential und algebraische Gleichungen beschrieben – für den vorliegenden Industrie-Ofen werden beispielsweise die Temperatur und die Abwärme durch die folgenden zwei Gleichungen definiert.

Formel 2: Temperatur im Ofen

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{Q}_W . p - (T - T_u) * UA}{c_{pL} * \rho_L * V + \sum_{E \in \text{ent}} E.c_p * E.m}$$

Formel 3: Abwärme des Ofens

$$\dot{Q}_{AW} . p = \left((T - T_u) * UA + P_{el} . p\right) * (1 - \eta)$$

Dabei ist T die Temperatur im Ofen, T_u die Umgebungstemperatur, $\dot{Q}_W$ die eingebrachte Leistung für die Heizung des Ofeninnenraums, $\dot{Q}_{AW}$ die nicht nutzbare Abwärme, p der Betriebszustand des Ofens, UA der anlagenspezifische Wärmedurchgang durch die Ofenwand, c_{pL} die Wärmekapazität der Luft, ρ_L die Dichte der Luft, V das Volumen im Ofen, P_{el} die zugeführte elektrische Energie (nicht

für Heizung des Ofeninnenraums genutzt), η der Abwärme-Nutzungsgrad und $\sum_{E \in \text{ent}} E.c_p * E.m$ die der Summe aller Wärmekapazitäten der im Ofen befindlichen Entitäten (Material). Das diskrete Verhalten wird mittels State-Machines beschrieben – abgebildet in Abbildung 41.

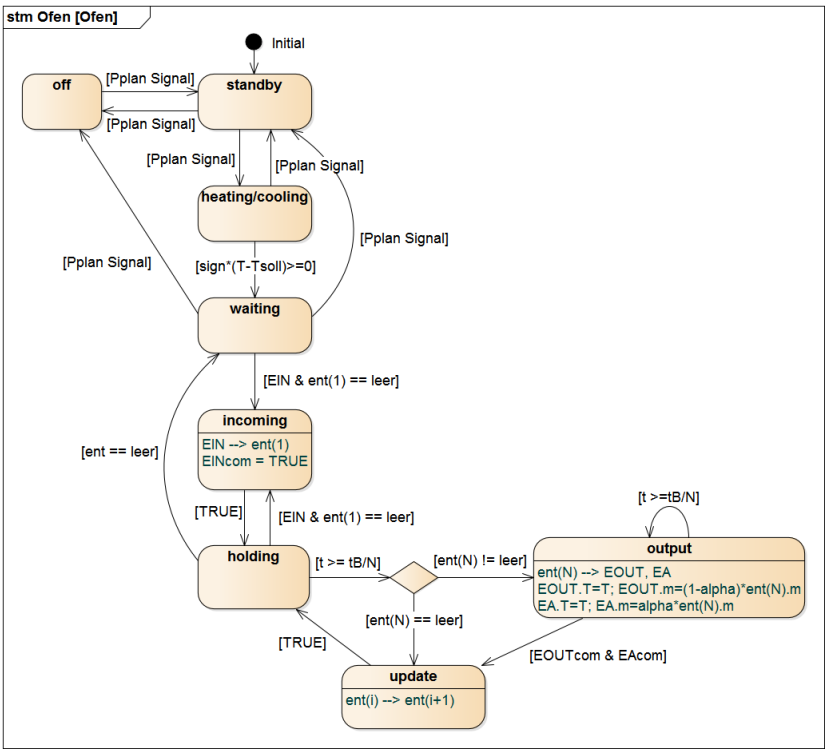


Abbildung 41: State-Machine eines Industrie-Ofens (Grafik ist Teil des Projektergebnisses des Forschungsprojektes Balanced Manufacturing, in das die Arbeit eingebunden ist)

Hierbei werden die Zustandsänderung und die Abfolge von Ereignissen definiert, die das Verhalten des Ofens in Bezug auf das Handhaben des Materialflusses und die Steuerung der Ofen-Funktionen festlegt. Dabei ist zu sehen, dass einkommende Entitäten (einkommendes Material) in eine FiFo-Schlange mit definierter Kapazität geschoben wird und im Ofen eine bestimmte Prozess-(Back-)Zeit verweilt, bevor sie ausgegeben werden. Allerdings gibt der Cube die Entität erst dann frei, sofern der darauffolgende Cube diese aufnehmen kann und eine Empfangs-Bestätigung (EOUT_{com}) sendet – dies ist notwendig, um keine Entitäten in der Simulation zu „verlieren“. Generell ist das modellierte Standard-Materialflussverhalten der Simulation auf ein Push-Prinzip eingestellt. Dies hat sich in Tests als am wenigsten fehleranfällig erwiesen und erfordert die wenigsten Ausnahmeregeln, außerdem entspricht es dem Standardverhalten der markführenden DES Programme, wie bspw. PlantSimulation. Für bestimmte Anlagen, wie beispielsweise ein Lager mit Lagerplatzzuordnung, wird dann im Cube-Modell ein Pull-Verhalten lokal definiert, um ein für diese Art Anlage sinnvolles logisches Verhalten zu erzeugen.

6.1.1.3 Modellierung des spezifischen Energieeinsatzes

Die Modellierung des spezifischen Energieeinsatzes, also des Energieeinsatzes für ein bestimmtes Produkt oder in bestimmten Betriebszuständen des Produktionssystems, kann über eine integrierte hybride Simulation, wie der in dieser Arbeit im Abschnitt 6.1.2 entwickelten, aus dem Modellverhalten ermittelt werden und muss nicht, wie in der Mehrzahl der in Abschnitt 4 vorgestellten Ansätze, deterministisch hinterlegt werden. Die hybriden Simulationsmodelle können bei Bedarf das exakte Verhalten einer Anlage abbilden und somit auch deren Energieeinsatz über die Simulation ermitteln. Während das für Anlagen mit ausgeprägtem thermisch-physikalisch Verhalten auch sinnvoll (bspw. Kälte-/Wärmeanlagen, Anlagen der TGA und das Verhalten des Gebäudes) und zur realitätsnahen Abbildung notwendig ist, wäre es für viele Anlagen, die kein ausgeprägtes thermisches Verhalten zeigen, ein sehr hoher Aufwand, das exakte Anlagenverhalten mit physikalischen Modellen nachzubilden – sowohl bezüglich des Modellierungsaufwandes wie auch der Datenanforderung. Zu dieser letztgenannten Anlagenkategorie zählen vor allem die zerspanenden Prozesse, Umformprozesse sowie Transport- und Handhabungsprozesse. Diese haben zwar einen produktspezifischen Energieeinsatz, allerdings ist dieser in guter Näherung deterministisch, also unabhängig von Umgebungsbedingungen. Zumeist betrifft dies den Verbrauch von elektrischer Energie. Für diese Gruppe von Anlagen kann im hier vorgestellten Simulationskonzept zwar ein detailliertes physikalisches Anlagenmodell hinterlegt werden, da es seitens des Modellierungskonzeptes sowie vom Simulator unterstützt wird, allerdings wird die folgend beschriebene deterministische Modellierung des spezifischen Energieeinsatzes an dieser Anlagengruppe empfohlen. Grundsätzlich gibt es mehrere Optionen, die auch in Grundzügen in den im Abschnitt 4.2 vorgestellten Ansätzen eingesetzt werden, um einen deterministisch hinterlegten Energieeinsatz für Maschinen und Anlagen zu modellieren:

Option 1: Das Energieeinsatzprofil einer Anlage im Zeitverlauf kann über Diskretisierung in variable Zeitabstände in mehrere Energieniveaus zerlegt werden, die dann Anlagenzuständen zugeordnet werden – die Anlagenzustände bzw. -status können in Arbeitsplänen für jedes Produkt hinterlegt und bei der Bearbeitung aufgerufen werden. Dieses Konzept findet bei Thiede (Kapitel 4.2.1) Anwendung, der das Energieeinsatzprofil in einer definierten Samplingrate (Abtastfrequenz) erfasst und diskretisiert. Ähnlich verfährt Junge (Kapitel 4.2.2), der in Messdaten vorliegende Energieprofile linearisiert, also Zeiträume mit gleicher Leistungsaufnahme ermittelt. Das Konzept von Weinert (Kapitel 4.2.10) unterteilt Energieeinsatzprofile in Energieblöcke, die dann Prozessblöcken zugeordnet werden, aus denen wiederum Prozessbeschreibungen, also Arbeitspläne für die Produktbearbeitung an einer

Anlage, generiert werden. Während diese drei Konzepte grundsätzlich variable Anlagenstatus ermöglichen, definiert Haag (Kapitel 4.2.12) Anlagenklassen, für die jeweils standardisierte Status festgelegt sind. Diese Standardisierung vereinfacht die Modellierung erheblich, da die Anzahl möglicher Energieniveaus deutlich reduziert wird, erfordert aber im Falle davon abweichenden Anlagenverhaltens die Neudefinition einer Modellklasse beziehungsweise muss mit einem größeren Abbildungsfehler auskommen. Die von Haag gewählte Option der standardisierten Anlagenstatus ist auch bereits in kommerziellen DES Simulationstools, wie beispielsweise PlantSimulation implementiert.

Ein Spezialfall der Option 1 ist die **Option 2**, die nur einen gemittelten Energieeinsatz pro Produkt und Anlage hinterlegt und somit zwei Status berücksichtigt: aktiviert/deaktiviert. In praktischen Untersuchungen können viele Anlagen, insbesondere Hilfsaggregate oder Handhabungseinrichtungen gefunden werden, für die diese Art der Energieeinsatzmodellierung geeignet ist, da die Änderungen der Leistungsabnahme, relativ zu den anderen Verbrauchern im Modell, unbedeutend ist.

Die **Option 3** wird im Konzept von Abele (Kapitel 4.2.14) genutzt: Hier werden die Maschinen bis auf die Steuerungsebene modelliert. In dieser Ebene, also dem Wirken einzelner Achsen einer mehrachsigen Bearbeitungsmaschine bspw. oder einzeln angesteuerten Anlagenkomponenten, wird das tatsächliche Maschinensteuerungsprogramm modelliert und die eingespielten NC-Programme jedes Produktes steuern dann im Modell, wie in der Realität, die Aktoren in der Maschine. Jedem Aktor ist ein spezifischer Energieeinsatz zugeordnet und durch die Simulation der Maschinensteuerung kann der Gesamtenergieeinsatz der Anlage im Zeitverlauf ermittelt werden. Der Vorteil dieser Option ist die Flexibilität und die Möglichkeit, jede Anlage sehr realitätsnah abzubilden – der erhebliche Nachteil liegt im hohen Modellierungsaufwand und der ebenso hohen Datenanforderung für die Modellierung, bei gleichzeitig oft nur geringem Gewinn an Abbildungsqualität gegenüber den vorgenannten Optionen.

In Tests im Rahmen dieser Forschungsarbeit, anhand von Simulationsmodellen einer Modellfertigung im Labor der TU-Wien, in der Simulationsumgebung PlantSimulation von Siemens, konnte eine weitere **Option 4** als Möglichkeit ermittelt werden: die Kombination der Abbildungsgenauigkeit ähnlich der Option 3 mit der einfacheren Modellierung der Option 1. Dabei wird ein Lastprofil eines Produktes auf einer Anlage im Zeitverlauf mit einer festen Abtastfrequenz erfasst und dieses Energieprofil in

Form eines Arbeitsplanes für jedes Produkt an jeder Anlage hinterlegt[8]. Die Abtastfrequenzen können variabel, in Abhängigkeit vom Verlauf der Lastkurve, gewählt werden. In den Tests haben sich Abtastraten im Bereich von 10 Sekunden für klassische Bearbeitungsmaschinen als sinnvoll herausgestellt, um noch relevante Phänomene, wie Leistungsabnahmepeaks zu erfassen und gleichzeitig den Rechenaufwand und die zu hinterlegenden Datenmengen in Grenzen zu halten.

Das in der Forschungsarbeit entwickelte Simulationskonzept unterstützt grundsätzlich alle vier vorgestellten Optionen der Modellierung des deterministischen spezifischen Energieeinsatzes. Das Cube-Konzept im Kern der Modellierung stellt es frei, Parameter, wie einen determinierten Energieeinsatz, direkt an der Anlage fest zu hinterlegen oder in separaten Arbeitsplänen zur Verfügung zu stellen. Für die Option 3 müssten entsprechend komplexe Cube-Modelle für die jeweiligen Anlagentypen erstellt werden. Ob die Arbeitspläne eine zeitliche Abfolge von Anlagenstatus, wie in Option 1 oder eine zeitliche Abfolge von Energieeinsatz pro Zeitintervall, wie in Option 4, enthalten ist aus Sicht der Cube-Modellierung nicht festgelegt – beides ist möglich. Die Wahl für eine der vier Optionen kann also vom Anwender getroffen werden und ist dann eine Frage der Simulations-Implementierung im Detail. In den Pilot-Modellen, die im Rahmen der Forschungsarbeit erstellt wurden, bspw. für die Entwicklung der hybriden Simulation (Abschnitt 6.1.2) und des Optimierungsmoduls (Abschnitt 6.3), wurden die Optionen 1, 2 und 4 genutzt. Für Anlagen mit ausgeprägtem thermisch-physikalischem Verhalten wurden für diesen Teil des Systemverhaltens physikalische Modelle in der hybriden Simulation erstellt.

6.1.2 Kopplung Diskreter und Kontinuierlicher Simulation

Nachdem im Abschnitt 6.1.1 das Modellierungskonzept für eine integrierte simulationsbasierte Abbildung eines Produktionssystems vorgestellt wurde, soll im Folgenden das dazu passende Simulationskonzept einer integrierten hybriden Simulation entwickelt werden. Für die hier beschriebene Forschungsarbeit, die in ein Forschungsprojekt eingebettet ist, wird jeweils auf Veröffentlichungen von Kollegen im Projekt verwiesen, in denen die entsprechenden Sachverhalte in größerem Detail beschrieben sind. Wie schon in der Auswertung der bestehenden simulationsbasierten Ansätze sowie dem daraus folgenden Forschungsbedarf (vgl. Kapitel 4.4) festgehalten, liegt die Herausforderung für eine integrierte Simulation des Gesamtsystems Produktion wesentlich in der integrierten Abbildung des diskreten und kontinuierlichen Systemverhaltens. Da die Kopplung verschiedener

[8] In PlantSimulation ist das über eine Zusatzprogrammierung über „Methoden“ erfolgt.

Simulatoren, bspw. DES und kontinuierlichen Modellen über eine Co-Simulation keine ausreichende Integration bietet, muss ein Simulationskonzept entwickelt werden, das schon in der Ebene der Simulationsbausteine ein hybrides Verhalten unterstützt. Ein möglicher Ansatz wäre die Modellierung mittels des Functional Mock-up Interface (FMI), das von Anwendern der Simulationsumgebung Modelica als Möglichkeit der Kopplung verschiedener Simulatoren vorangetrieben wird. Allerdings ist die Beschreibung auf Basis der Modelica-Sprache mit dem Fokus auf kontinuierliche Systeme konzipiert worden, sodass sich komplexes diskretes Verhalten nur schwer implementieren lässt und außerdem birgt die Kopplung von ODE Solvern – diese lösen Differentialgleichungssysteme – und Discrete Event Schedulern – diese bilden das diskrete Verhalten ab – Probleme in der Rechenperformance. Ähnliches gilt für den Simulator Simulink, der für einfache Anwendungsfälle eine Kopplung diskreter SimEvents mit ODE Solvern ermöglicht, für komplexere Systeme, allerdings unlösbare Fehler erzeugt; für Detailliertes zu der dazu in der Forschungsarbeit erfolgten Evaluierung sei auf Veröffentlichungen von Kollegen im Projekt verwiesen (Raich et al.; Popper et al. 2014). Wie schon für die zwei bislang vorgestellten Simulatoren, gelten ähnliche Beschränkungen auch für AnyLogic, das bspw. im Konzept Thiedes (vgl. 4.2.1) zum Einsatz kommt. Darin kann kontinuierliches Verhalten prinzipiell über das Modul System Dynamics abgebildet und mit dem DES Modul verknüpft werden – allerdings ist die Implementierung von kontinuierlichem Verhalten, wie in der entwickelten Modellierung (vgl. 6.1.1.2) dargestellt, nicht praktikabel. Auch Thiede hat daher, wie vorgestellt, dieses kontinuierliche Verhalten in seinem Ansatz, in einer Erweiterung seines ursprünglichen Konzeptes, nur mit Hilfe einer Co-Simulation umgesetzt; mit den bereits erwähnten Nachteilen. Demnach sind die verfügbaren Simulatoren für hybrides Systemverhalten nicht geeignet und ein neues Simulationskonzept muss entwickelt werden – dies hat auch eine weitergehende Evaluierung durch ein Team von Simulationsexperten des Projektteams des Forschungsprojektes bestätigt. Einen Startpunkt hierfür bilden die von Zeigler entwickelten Simulations-Formalismen. Die Discrete Event System Specification (DEVS) ist ein Formalismus, der eine Modellierung und Simulation von Systemen erlaubt, die ihren Status aufgrund von Ereignissen ändern, die in diskreten Abständen zueinander auftreten. Dagegen ist die Differential Equation System Specification (DESS) ein Formalismus zur Beschreibung kontinuierlicher Simulation mittels Differentialgleichungen. Die Formalismen bieten eine streng hierarchische, geschlossene Modellbeschreibung, mit Komponenten und definierten Ein- und Ausgangsgrößen. Es gibt zwei Haupt-Komponenten in DEVS: Die Grundbausteine sind die „Atomic“ Modelle, die ein dynamisches Verhalten abbilden, während die „Coupled“ Modelle ein System aus interagierenden Komponenten beschreiben, die wiederum „Atomic“ oder „Coupled“

sein können (vgl. Zeigler 1976). Die Weiterentwicklung des DEVS Formalismus zum Parallel-DEVS (PDEVS) ermöglicht die einfachere Behandlung simultaner Ereignisse auf Ebene der Atomics (vgl. Chow, Zeigler 1996). Hybride Ansätze, um DEVS und DESS zu koppeln wurden entwickelt (vgl. Zeigler et al. 2007). Im Rahmen der Forschung, in die diese Arbeit eingebettet ist, wurden die Konzepte DEVS&DESS sowie Hybrid PDEVS als mögliche Formalismen überprüft, wobei sich Hybrid PDEVS als besser geeignet erwiesen hat (vgl. Raich et al.; Preyser et al.). Die Modelle im Hybrid PDEVS sind durch ein Set von Funktionen gekennzeichnet, ergänzt durch Kopplungselemente für die Verbindung von Ein- und Ausgängen sowie interne Verbindungen.

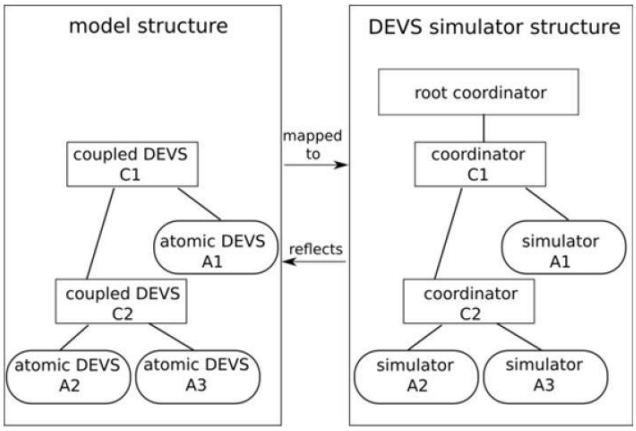


Abbildung 42: Modellstruktur und verbundene Simulatoren (Zeigler et al. 2007)

Die Abbildung 42 zeigt, dass in den Formalismen nicht nur die Modellstruktur beschrieben wird, sondern auch eine Simulatorstruktur vorgegeben ist. Um die Modelle in einer Simulation zu implementieren, müssen die kontinuierlichen Modelle, verteilt über die „Atomics“ und „Coupled“, zusammengeführt und numerisch durch einen ODE Solver gelöst werden, ohne die Strukturinformation des hierarchischen Aufbaus zu verlieren – hierfür wurden zwei wesentliche Varianten evaluiert: **Variante 1** ist die Lösung über ein „Hüllen“-Konzept („wrapper concept“ im Original), in der eine vereinte ODE Repräsentation aller kontinuierlichen Modellteile erzeugt wird, ohne die Strukturinformation des Modells zu verlieren. Hierfür wird der in Abbildung 42 aufgeführte „root coordinator“ angepasst und eine ODE Hüllen-Funktion hinzugefügt – das Modell und der Lösungsalgorithmus werden getrennt (vgl. Deatcu, Pawletta). Die **Variante 2** ist die Quantized State Systems Methode (QSS), in der nicht, wie üblich, Zeit diskretisiert wird, sondern die Zustände (States) der Zustands-Variablen. Die Zustands-Variable wird dabei also um Vielfache einer definierten Zustandsänderung verändert, und zwar in Zeitschritten, die sich variabel aus der Änderungsrate der Funktion der Zustandsvariable ergeben. Dieser zustandsdiskrete Charakter unterscheidet sich von der zeitdiskreten Lösung (Gleichung wird in festen

Zeitschritten gelöst), die klassischerweise in ODE Solvern zur Anwendung kommen. Für die hybride Simulation bedeutet diese Variante, dass der Standard DEVS Formalismus genutzt werden kann, allerdings auch, dass die numerischen Integrationsalgorithmen mit der Modellbeschreibung verbunden sind und daher das Modell nicht unabhängig von den Integrationsmethoden angepasst werden kann. Dies resultiert in einer höheren Modellkomplexität für den QSS Ansatz und einem höheren Aufwand bei der Anpassung und Wiederverwendung von Modellen und Modellkomponenten (Deatcu, Pawletta). Dagegen muss für die Variante 1 zwar eine zusätzliche Struktur in das PDEVS Konzept integriert werden, allerdings ist die Modellkomplexität geringer und durch die Trennung zwischen Modell und Lösungsalgorithmus, kann das Modell leichter angepasst werden, außerdem können effiziente Standard ODE Solver zur Lösung verwendet werden, die bspw. in Simulationsumgebungen wie Matlab verfügbar sind. Aufgrund der beschriebenen Eigenschaften der Variante 1 für eine ingenieurtechnische Anwendung, wurde diese gewählt und mit Hilfe der Matlab-DEVS Toolbox implementiert.

Für eine Implementierung in der Matlab-Umgebung wurde im Rahmen der Forschungsarbeit zusätzlich eine Zwischenebene entwickelt, die vom Hybrid PDEVS Formalismus noch nicht geklärtes Systemverhalten definiert, um die Cube-Modellierung implementieren zu können. Dazu gehören (vgl. Raich et al.):

- Festlegen eines Push-Standard-Weitergabeprinzips für Entitäten im Materialfluss: wie bereits im Modellierungskapitel beschrieben, reduziert dies die Wahrscheinlichkeit auftretender Modellfehler, entspricht dem Standardverhalten von verbreiteten DES Programmen und erleichtert die Implementierung im Hybrid PDEVS Formalismus.
- Sicherstellen, dass keine Entitäten "verloren" gehen: Der empfangende Cube sendet eine Bestätigung, sofern eine Entität angenommen werden konnte - bis dahin bleibt die Entität beim Sender.
- Pull Prinzip kann, abweichend dazu, über die Cube-Modellierung partiell implementiert werden, wenn das für die Abbildung des realen Systems sinnvoll ist, ebenfalls wie im Modellierungsabschnitt beschrieben.
- Sicherstellen, dass bei gleichzeitigen Anfragen keine Anfragen verloren gehen: Pufferung externer Informationseingänge.

Die Abbildung 43 gibt eine Übersicht der entwickelten Systembestandteile der hybriden Simulation von Produktionssystemen: Ein Modellierungskonzept (vgl. 6.1.1) für die integrierte simulationsbasierte Abbildung des Produktionssystem auf Basis von Cubes wurde entwickelt und eine Zwischen-Ebene als Vorbereitung der Cube-Implementierung erarbeitet, um die Cubes mit dem Hybrid PDEVS Konzept

implementieren zu können, das in einem Evaluierungsprozess als bestgeeignetes Simulationsprinzip für eine hybride Simulation ermittelt wurde. Die abschließende Implementierung ist zunächst für alle Pilotimplementierungen in Matlab erfolgt und wurde gleichzeitig in Kooperation mit einem Implementierungspartner in einer eigenen Simulations-Umgebung neu aufgesetzt und dabei im Detail optimiert. Durch diese Softwareumsetzung konnte die Rechenzeit der Simulation um ein Vielfaches verkürzt werden – dies ist vor allem für die beabsichtigte Verwendung der Simulation für eine simulationsgestützte Optimierung von großer Bedeutung, ebenso wie für einen Praxiseinsatz für große, komplexe Produktionssysteme. Die Neu-Implementierung auf Hybrid PDEVS Basis ist notwendig geworden, da kein existierendes Simulationstool diesen Formalismus unterstützt. Der Nachteil der Neuimplementierung ist die Notwendigkeit, alle Komponenten eines klassischen DES Simulators, wie PlantSimulation, neu aufzubauen – dies erfordert in der Modellierung viel Aufwand, um ein verlässliches, realitätsgetreues Verhalten der Simulationsmodelle sicherzustellen. Der Vorteil liegt in der Modularität und Wiederverwendbarkeit der Simulationsmodelle: Auf Basis einer bislang schon entstandenen Modellbibliothek, können zukünftig weitere Modelle für neue Anwendungsumgebungen oder anderes, ggf. komplexeres, Systemverhalten erstellt werden, die nicht von Beginn an aufgebaut werden müssen.

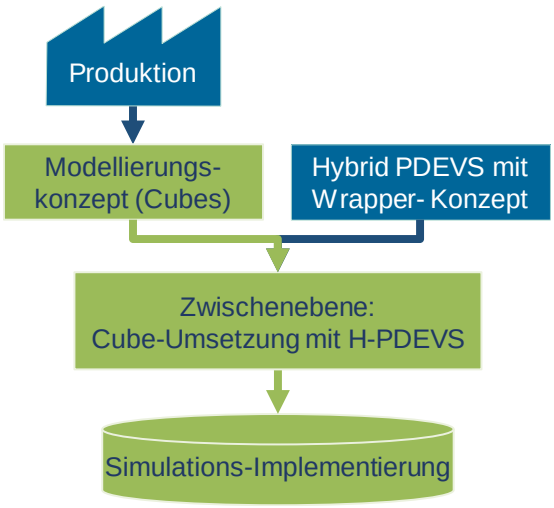


Abbildung 43: System der hybriden Simulation in der Forschungsarbeit

6.2 Simulationskonzept für die energetische Bewertung von Logistikprozessen

Energieeffizienz in der Logistik ist, wie in der Einleitung angesprochen ein stark vernachlässigtes Thema – diese Vernachlässigung, insbesondere in der Planung

findet sich allerdings auch schon im klassischen Planungsbereich in der Praxis wieder und ist somit wenig überraschend. Das Logistiksystem umfasst Transportmittel und Lagertechnik (Stetigförderer, wie Förderbänder, aber auch Unstetigförderer, wie Gabelstapler und Regalbediengeräte) sowie Handhabungsgeräte. Klassische Effizienzsteigerungsmöglichkeiten sind in der Logistik zwar, wie in den Produktionsanlagen, die technischen Optionen (bspw. effizientere Motoren, Nutzung von Hybridantrieben, bessere Lager, Einsatz von Frequenzumrichtern), aber auch über die Steuerung kann Einfluss auf den Energieeinsatz genommen werden. Hierbei werden vor allem das Abschalten von Motoren bei Stillstand, reduzierte/angepasste Geschwindigkeit und Wegeoptimierung genannt (vgl. Neugebauer 2014, S. 743). Auch die Reduktion der Leerfahrten durch eine optimierte Transportplanung ist aus Praxisprojekten bekannt. Obwohl ein simulationsbasiertes Planungs- und Steuerungs-Werkzeug grundsätzlich auch diese Steuerungsoptimierung vornehmen könnte, sofern die Logistik im Simulationsmodell energetisch abgebildet wird, ist es das Hauptziel dieser Arbeit, vor allem die Abbildung der Logistik überhaupt in die Planungswerkzeuge aufzunehmen. Erst so kann ein realistischer Gesamtenergieeinsatz des Produktionssystems über die Simulation ermittelt – wichtig beispielsweise für eine gezielte Energiebeschaffung mit flexiblen Energietarifen – und in weiterer Folge auch Optimierungsmaßnahmen geplant und bewertet werden. Die aktuellen Planungswerkzeuge berücksichtigen die Logistik energetisch nicht (vgl. 4.4)[9]. Gleichzeitig ist der Energieeinsatz in Logistikprozessen, wie dem Transport, erheblich (vgl. Abbildung 44).

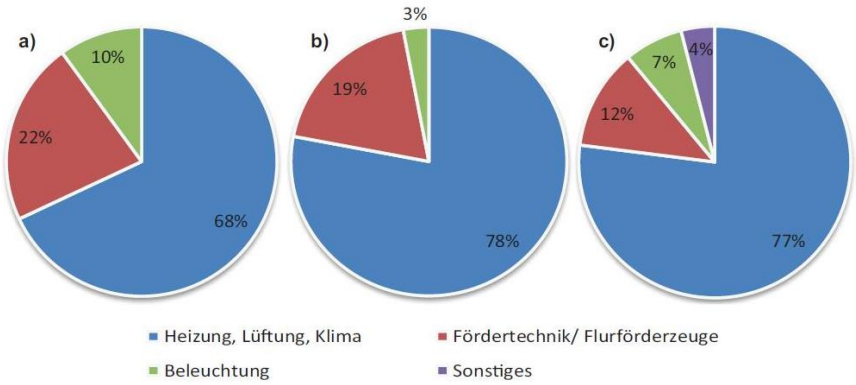


Abbildung 44: Energieeinsatz in Intralogistiksystemen: (a) Logistikzentrum mit hohem Automatisierungsgrad; (b) Lager; (c) Logistikzentrun (Neugebauer 2014, S. 738)

[9] Mit „Planungswerkzeuge“ sind hier die evaluierten simulationsbasierten Planungskonzepte gemeint – grundsätzliche Veröffentlichungen zur Simulation von Logistikprozessen gibt es durchaus (vgl. Schmidt, Schulze 2011, 2011), allerdings fehlt ein System für die Simulationsmodellierung von Logistikvorgängen, wie es in diesem Abschnitt aufgestellt werden soll.

Um Verbraucher des Logistiksystems in die Simulation zu integrieren, ist eine Abbildung mittels determiniert hinterlegten Energieeinsatzes für bestimmte Aktionen sinnvoll, da der Energieeinsatz in der Regel durch Elektromotoren erfolgt, die für gleiche Aktionen gleichen Energieeinsatz erzeugen – für praktische Betrachtungen, unabhängig von den Umgebungsbedingungen. In einem System, das bestimmten Logistik-Betriebsmitteln für bestimmte Aktionen einen spezifischen Energieeinsatz zuordnet, ist es also zunächst notwendig, diese Betriebsmittel und Aktionen zu erfassen, um sie in der Simulation hinterlegen zu können. Eine in der Prozessplanung verbreitete Methode ist die Nutzung eines Systems vorbestimmter Zeiten wie das Methods-Time Measurement (MTM). Dieses Planungssystem wird hauptsächlich genutzt, um wiederkehrende manuelle Prozesse standardisiert in der Prozess- und Kapazitätsplanung zu berücksichtigen. Dadurch wird zum einen eine Planung und Austaktung von Arbeitsstationen in verketteten Prozessen möglich und zum anderen können Abweichungen analysiert und Maßnahmen zur Abhilfe getroffen werden. Grundsätzlich basiert das System auf einer Zerlegung von Bewegungen in Grundbewegungen, die in Videoanalysen, mit Zeitbausteinen verknüpft, und in einen Katalog von Zeitbausteinen für definierte Grundbewegungen aufgenommen werden. Aus diesem Katalog können dann komplexere Bewegungen für bspw. manuelle Montageprozesse zusammengesetzt werden. Über dieses System an Grundbewegungen, MTM-1, hinaus gibt es mittlerweile Systeme mit Zeitbausteinen für aggregierte Bewegungen (Bokranz, Landau 2012). Für den Logistikbereich gibt es ein System für komplexe Prozesssequenzen, auch für den Transport mit Flurförderfahrzeugen (Deutsche MTM-Vereinigung e.V 2006). In diesem System sind Zeitbausteine für Fahr-Bewegung, für Kurvenfahrten, aber auch für Handhabungsschritte, wie das Aufnehmen, Ablegen, Anheben und Absenken von Lasten, enthalten. Diese sind jeweils codiert und der Planer kann daraus den Zeitbedarf für Transportvorgänge durch Kombination der Zeitbausteine erstellen und die Ergebnisse für die Kapazitätsplanung in der Logistik nutzen. Auch für die Parametrisierung von Simulationsmodellen in der Materialflussplanung sind MTM-Zeitbausteine geeignet, da sie eine standardisierte Planungsbasis für Zeiten bietet (Sobottka et al. 2014). Die Abbildung 45 gibt eine Einordnung der MTM-Logistikbausteine in das System der MTM-Bausteine.

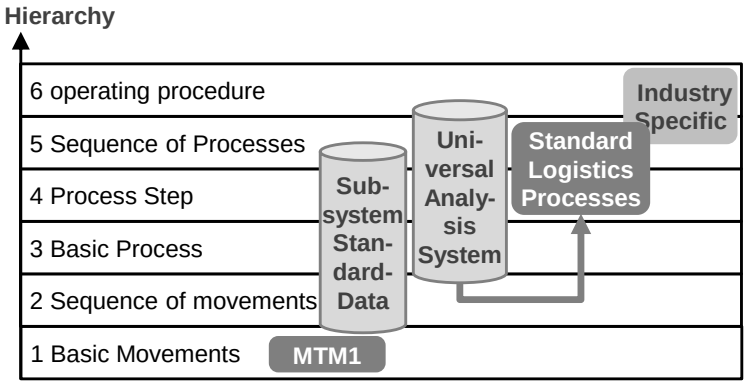


Abbildung 45: Einordnung des MTM-Logistik Systems (Deutsche MTM-Vereinigung e.V 2006)

Das Prinzip der Zeitbausteine für Logistikprozesse soll im vorliegenden Ansatz um den Energieaspekt erweitert werden, um diese kombinierten Zeit- und Energiebausteine in der Simulation dazu verwenden zu können, den aggregierten Energiebedarf des Logistiksystems zu ermitteln. Dazu muss ermittelt werden, welche Prozesse bzw. Aktionen sich bezüglich des Energieeinsatzes unterscheiden – diese müssten dann als Varianten mit eigenem spezifischen Energieeinsatz hinterlegt werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist nicht der Aufbau eines vollständigen Systems kombinierter Zeit- und Energiebausteine für die Logistik – dafür wären eine Vielzahl standardisierter Versuche notwendig, die den Rahmen der Arbeit bei weitem überschreiten würden –, vielmehr soll an einem Referenzbeispiel gezeigt werden, wie diese Bausteine erstellt werden können. Als Referenzbeispiel für die Entwicklung der Methode sollen Gabelstapler dienen, die zur Gruppe der Unstetigförderer und darin zu den Flurförderfahrzeugen zählen. Diese sind ein sehr verbreitetes Transportmittel der Intralogistik und zeigen ein komplexes Materialflussverhalten, da sie sich in einem verzweigten Transportwegenetz durch die Fertigung bewegen können. Die entsprechende DIN Norm für Kraftbetriebene Flurförderzeuge (1994: DIN ISO 5053:1987, Kraftbetriebene Flurförderzeuge) zählt hierzu Fahrgabelstapler, Schubmaststapler, Gehgabelstapler und Schlepper. In der Norm wird ebenfalls ein Messzyklus zur Bestimmung eines Referenzenergieeinsatzes vorgegeben – hierzu fährt das Betriebsmittel eine definierte Fahrstrecke mehrfach in einer definierten Zeit ab, ein gemittelter Energieeinsatz wird ermittelt und in die Typenblätter der Hersteller übernommen. Dieser Energiebedarf bezieht sich ausschließlich auf die Fahrbewegung und berücksichtigt den Einfluss der transportierten und gehandhabten Last nicht. Außerdem entspricht der Messzyklus nicht einer üblichen Einsatzbelastung der Flurförderfahrzeuge in der Praxis. Experteninterviews mit

Herstellervertretern zeigen, dass auch bei den Herstellern bislang kaum bzw. keine Dokumentation zum Energieeinsatz bestimmter Bewegungen vorliegen[10]. In der Fachliteratur sind grundsätzliche Untersuchungen zum Energieeinsatz dokumentiert – demnach entfällt der Hauptteil des Energieeinsatzes auf die Anfahrt und Fahrt und nur ein geringerer Teil auf Handhabungsvorgänge, wie Abheben und Senken; siehe Abbildung 46. Detaillierte Energieeinsatzwerte sind jedoch nicht verfügbar.

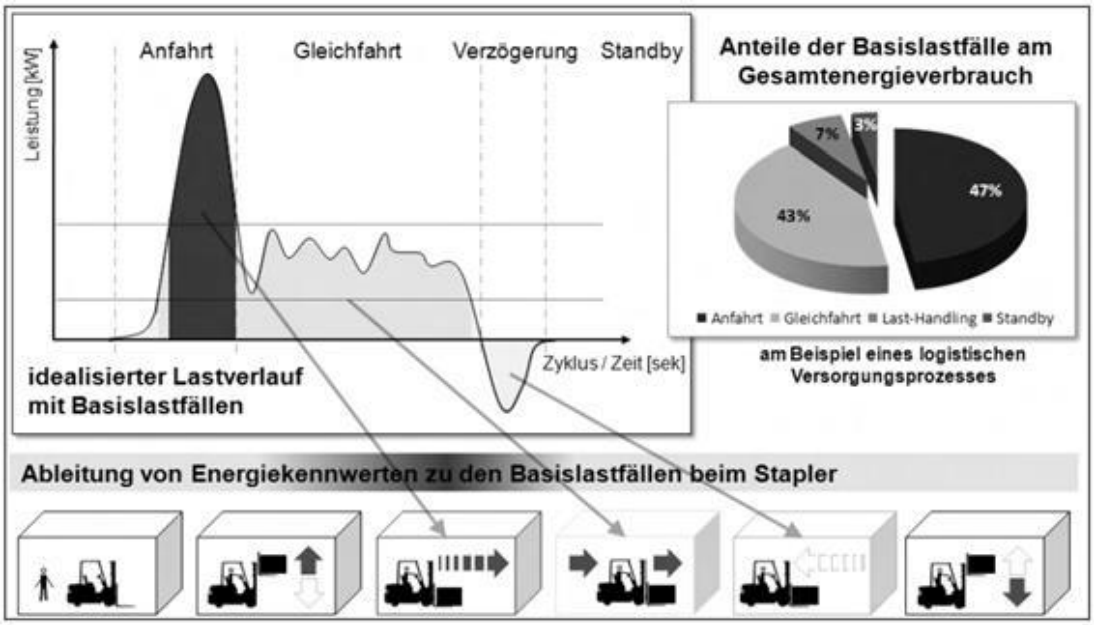


Abbildung 46: Ermittlung von Energiekennwerten in Labor- und Feldversuchen (Müller et al. 2010, S. 561)

Erste Untersuchungen in Kooperation mit einem Anbieter für Gabelstapler in Wien[11] sollten daher grundsätzliche Erkenntnisse über wesentliche Einflussfaktoren auf den Energieeinsatz von Gabelstaplern erbringen, um eine Einschätzung zu ermöglichen, welche Fälle in der Erstellung von kombinierten Zeit- und Energiebausteinen zu berücksichtigen sind. Die Abbildung 47 zeigt eine Übersicht der ermittelten Einflussfaktoren – diese basieren teilweise auf den folgend beschriebenen Feldversuchen und darüber hinaus aus Experteninterviews[12] mit den Technikern bei

---

[10] Interviews vom April 2014: STILL GmbH, Jungheinrich AG, Linde Fördertechnik GmbH, Toyota Material Handling Austria GmbH

[11] Versuche durchgeführt bei Toyota Material Handling Austria GmbH im Zeitraum Juni-August 2014, Nutzung des Messgeräts Wi-IQ® der Firma EnerSys GmbH

[12] dieses sind die bereits erwähnten Interviews mit vier Flurförderfahrzeug-Anbietern aus dem April 2014

Gabelstapleranbietern. Besonders erheblich ist demnach das Gewicht des Transportgutes und die Ausstattung der Stapler sowie die Bodenbeschaffenheit und das Vorhandensein von Steigungen.

	Gewicht des Transportgutes Umgebungstemperatur (schnellere Batterie-Entleerung bei niedriger Temperatur) Gewicht des Staplers selbst (besonders beim Beschleunigen und Verzögern) Gewicht der Mastprofile Beschleunigungs- und Verzögerungsrampe Zusatzausstattung wie Klima, Heizung, Scheinwerfer usw.
	Neigungswinkel der Bodenfläche Bodenbeschaffenheit (Hallenboden, Asphalt, Kopfsteinpflaster, …) Kurvenfahrten (Reifen werden über eine Hydraulikpumpe verstellt) Reifenart (Vollgummi oder mit Luftkammer) Energierückgewinnung beim Verzögern Energierückgewinnung beim Senken der Last Die Güte der Batterie
	Lagerung des Transportgutes (stabil oder labil) Hub- und Senkgeschwindigkeit (Praxis: generell Betrieb 100%iger Geschwindigkeit) Fahrgeschwindigkeit (Praxis: generell Betrieb 100%iger Geschwindigkeit)

Abbildung 47: Einflussfaktoren auf den Energieeinsatz von Gabelstaplern

Für den Faktor Gewicht des Transportgutes wurden daraufhin exemplarisch Versuche ausgeführt, um die Abhängigkeit des Energieeinsatzes verschiedener Staplerarten – ein Fahrgabelstapler, ein Schubmaststapler und ein Hochubwagen (Gehgabelstapler) – vom Transportgewicht zu ermitteln. Hierdurch soll geklärt werden, ob das Gewicht des Transportgutes eine Fallunterscheidung und damit separate Zeit-Energie-Bausteine erfordert. Der Lastgang (Abbildung 48) des Staplers während verschiedener Bewegungen, die in den MTM-Logistikbausteinen für Stapler verzeichnet sind, wurde aufgenommen und der Energieeinsatz jeweils ermittelt.

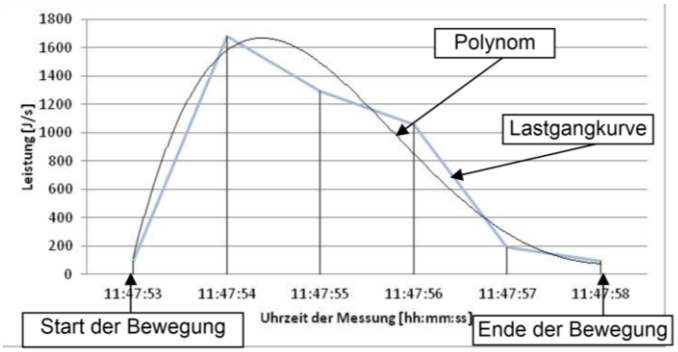


Abbildung 48: Lastgangkurve und Berechnung des Energieeinsatzes

Abbildung 49 zeigt exemplarisch den Energieeinsatz für das Heben einer Last auf einen Meter Höhe für unterschiedliche Last-Gewichte und für die drei betrachteten Betriebsmittel. Ein Zunahme des Energieeinsatzes mit zunehmendem Gewicht ist erwartungsgemäß festzustellen. Ein übermäßiges Ansteigen des Verbrauches nach Überschreitung der zulässigen Nutzlast ist nicht festzustellen – der Fahrgabelstapler hat eine maximale Traglast von 2,5 t, der Gehgabelstapler (Hochhubwagen) hingegen nur von 1,5 t.

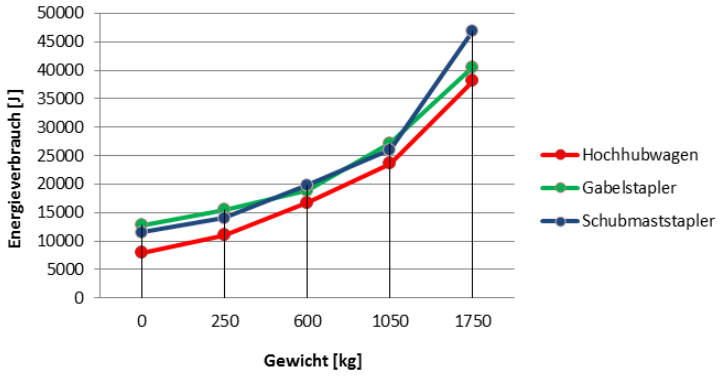


Abbildung 49: Gegenüberstellung der Messergebnisse der einzelnen Flurförderzeuge - Heben der Last vom Boden auf 1 Meter Höhe

Die so ermittelten Energiebausteine (Tabelle 2) können mit den zugehörigen Zeitbausteinen, bspw. aus dem MTM-System; verknüpft werden. Es bietet sich an, eine Last nahe der Traglastgrenze anzunehmen – auch eine Fallunterscheidung in Traglastkategorien ist möglich, allerdings würde dadurch der Katalog mit den Zeit-Energie-Bausteinen größer und unübersichtlicher für die Praxisanwendung werden.

Tabelle 2: Bsp. Für Energiebausteine Flurförderzeuge – Heben vom Boden auf ein Meter

		Energieverbrauch [J]		
Heben vom Boden auf 1 Meter	Gewicht [kg]	Fahrgabelstapler	Schubmaststapler	Hochhubwagen
	0	12785	11468	7879
	250	15498	14031	10993
	600	18910	19789	16736
	1050	27211	26021	23638
	1750	40589	46931	38107

Die erfolgten Tests können und sollen kein abschließendes Bild über die genaue Ausgestaltung eines Zeit-Energie-Baustein Systems für die Logistik geben. Gezeigt werden soll, dass mit dieser Methode eine energetische Erfassung von Logistikprozessen möglich wird, wodurch die Parametrisierung eines Simulationsmodells ermöglicht würde. Für Stetigförderer lässt sich hingegen das System Status basierten Energieeinsatzes anwenden (Abschnitt 6.1.1). Für eine

Simulation von Produktionssystemen gilt es, die innerbetrieblichen Transporte mit abzubilden – je nach Anteil des Energieeinsatzes der Logistik (z.B. Logistikzentrum vs. Maschinenbau-Fertigungsstandort) kann das detailliert über die Simulation einzelner Transporte und Anwendung der Energiebausteine erfolgen oder pauschal über einen von der Anzahl produzierten Materials abhängigen Transportaufwand mit zugehörigem Energieeinsatz. Somit ist eine Möglichkeit der simulatorischen Abbildung des Energieeinsatzes der Logistik ermittelt worden.

6.3 Entwicklung einer simulationsgestützten Optimierung

In den vorigen Kapiteln wurde ein geeignetes hybrides Simulationskonzept inklusive Implementierung für die integrierte Simulation eines Produktionssystems entwickelt. Im jetzt folgenden Abschnitt soll ein Optimierungsmodul entwickelt werden, das mit Hilfe des Simulationsmoduls als Bewertungsfunktion, eine simulationsgestützte Optimierung der Produktionsplanung und -steuerung sowie der Planung und Steuerung der Anlagen der Peripherie, bis hin zum Gebäude, ermöglicht. Das Zusammenspiel der Simulation und Optimierung ist schon in der Struktur-Skizze (vgl. Abbildung 35) und in der Struktur-Beschreibung (Kapitel 6.1.1.1) erläutert worden. Im Folgenden wird demnach das Innenleben des Simulationsmoduls entwickelt, also die Zielfunktion als Bewertungsfunktion des Simulationsfeedbacks für eine gegebene Lösung (Set von Stellgrößen-Parametern) sowie der Optimierungsalgorithmus. Die Optimierung muss auf die Optimierungsaufgabe abgestimmt sein, daher kann die Entwicklung nur auf Basis eines Beispielmodells erfolgen, das zudem alle wesentlichen Merkmale der später zu bearbeitenden Anwendungsmodelle enthält. In diesem Fall wurde eine Fallstudie in einer Großbäckerei, im Kontext des mit der vorliegenden Arbeit verbundenen Forschungsprojektes, gewählt und für den Zweck der Optimierungsentwicklung vereinfacht. Die Vereinfachung hat das Ziel, ein trotz der Modellkomplexität (manuell) überprüfbares Systemverhalten des hybriden Simulationsmodells zu gewährleisten. Nur so kann die Wirkung der Optimierung stets überprüft und validiert werden. Dieses Kapitel zur Entwicklung der Optimierung ist so aufgebaut, dass zuerst eine kurze Vorstellung des Beispielmodells vorangestellt ist, anhand dessen die Entwicklung erfolgt, gefolgt von der Entwicklung der Zielfunktion, wonach dann der eigentliche Optimierungsalgorithmus entwickelt werden kann – abgeschlossen wird das Kapitel mit der Auswertung von Tests des Optimierungsmoduls mit dem Beispielmodell.

6.3.1 Beispielmodell

Die vereinfachte Fallstudie basiert auf einer Produktionslinie in einer industriellen Großbäckerei, die verschiedene Arten von Semmeln herstellt. Im vereinfachten

Modell werden zwei Produktvarianten produziert, tiefgefrorene und fertiggebackene Semmeln. Das Modell, skizziert in Abbildung 50, enthält vier Produktionsanlagen sowie vier Förderbänder und Weichen, plus ein Lager.

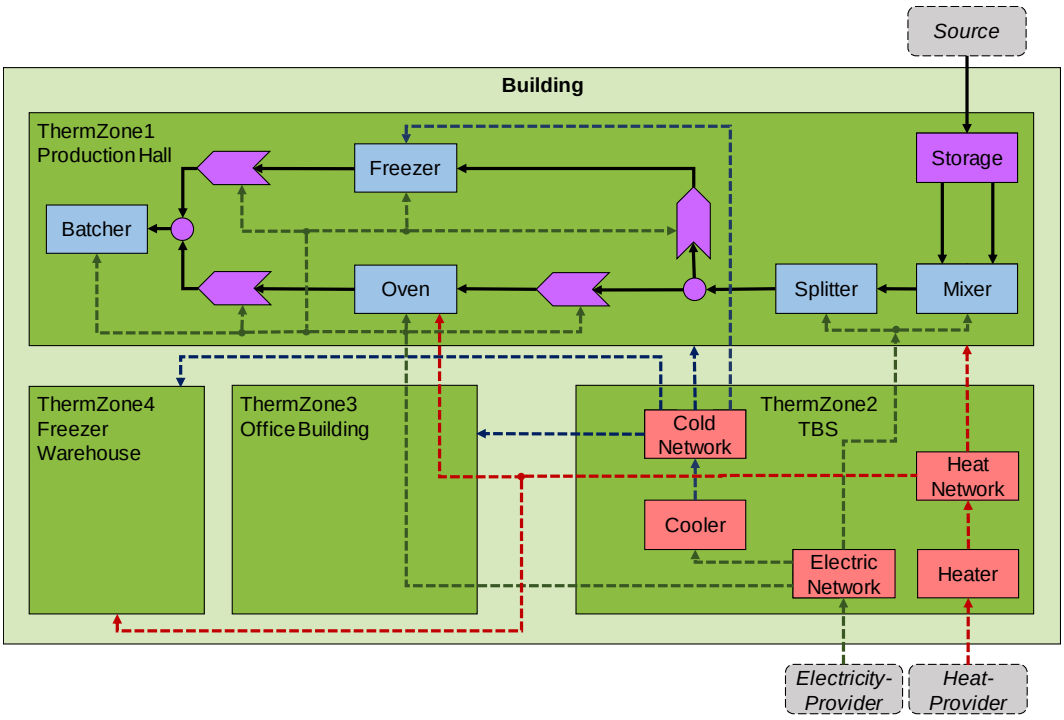


Abbildung 50: Simulationsmodell: Struktur und Material-, sowie Energieflüsse

Zwei der Maschinen, ein Industrie-Backofen (Oven) und ein Tiefkühler (Freezer) besitzen ein ausgeprägtes thermisch-physikalisches Verhalten. Bezüglich der TGA und des Energiesystems, gibt es ein Heizaggregat, das Wärme über ein Thermoöl-Wärmenetzwerk zum Backofen und zur Heizung der Hallen liefert. Das Gebäude selbst ist, der Raumaufteilung folgend, in vier thermische Zonen aufgeteilt: die Hauptproduktionshalle, ein TGA-Raum (TBS), ein Bürogebäude sowie ein Tiefkühllager – jede der Zonen wird mit Kälte und Wärme versorgt und tauscht Wärme mit der Umgebung und anderen Zonen sowie den enthaltenen Anlagen im Rahmen der thermisch-physikalischen Simulation aus. Die Simulation wurde ursprünglich in Matlab® implementiert und danach mit Hilfe eines Umsetzungspartners in einer C++ basierten Softwareimplementierung weiter verbessert, wie in der Simulationsbeschreibung (Abschnitt 6.1.1) beschrieben. Dadurch steht eine, bezüglich der Simulationslaufzeit, sehr leistungsfähige Version der Hybriden Simulation des Musterbeispiels für die Optimierung zur Verfügung.

6.3.2 Zielfunktion

Die Optimierung bewertet die Leistung jeder Zwischenlösung – diese entspricht jeweils einem Plan, formuliert als Stellgrößen-Parameter-Set – anhand einer Zielfunktion. Die Zielfunktion spiegelt die Präferenzen des Managements bzw. der Produktionsplaner in Bezug auf die Leistung des Produktionssystems wieder und enthält mehrere Bewertungskriterien. Durch einstellbare Gewichtungen der Zielfunktionsbestandteile wird zum einen eine Priorisierung der Kriterien erreicht und zum anderen eine Normalisierung der verschiedenen Kriterien, basierend auf Feedbackparametern der Simulation, die von ihren unterschiedlichen Einheiten und Dimensionen auf eine einheitliche Skala gebracht werden müssen. Am Ende bietet die Zielfunktion für jedes Simulationsergebnis einen einfachen Zielfunktionswert als Bewertung für den Optimierungsalgorithmus. Prinzipiell wird die Zielfunktion in diesem Konzept als Minimierungsfunktion formuliert, das heißt, Feedbackparameter der Simulation werden jeweils mit „Bestrafungs-Werten“ beaufschlagt – die Optimierung wird daher versuchen, den Zielfunktionswert, und damit die Werte aller Teilfunktionswerte, so stark wie möglich abzusenken, mittels der Variation von Stellgrößen. Für den Zweck der Entwicklung der Optimierung wird, analog zum Simulationsmodell, eine vereinfachte Zielfunktion aufgestellt, die angelehnt ist an die mit dem Unternehmen der Fallstudie entwickelte Zielfunktion, und alle wesentlichen Charakteristika der Zielfunktion enthält, dabei aber überschaubar bleibt, damit eine manuelle Validierung und Beurteilung der Ergebnisse stets möglich ist. Zunächst wird im Folgenden die vereinfachte Zielfunktion für die nachfolgende Optimierungsentwicklung aufgestellt.

Die Zielfunktion (Formel 4) ist wie folgt definiert:

Formel 4: vereinfachte Zielfunktion für die Optimierungs-Entwicklung

$$f(x) = \omega_1 \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \left(f_1(c_i)\right) + \omega_2 n_2 + \omega_3 n_3 k_1 + \omega_4 n_4 + \omega_5 t_{peak}\, n_{peak}$$

ω_1 - ω_5 ... Gewichte der Teil-Ziele
i … Index der Produktionslose/-aufträge
f_1… Bewertungsfunktion des Lieferverzugs und der Lagerkosten
c_i… relative Losdurchlaufzeit
n_2… akkumulierte Los-Durchlaufzeiten
n_3… akkumulierter Gesamt-Energieeinsatz
n_4… Anzahl der im Simulationszeitraum nicht fertiggestellten Produkte
n_peak… akkumulierte Menge des Peak-Energieeinsatzes über einem definierten

Leistungsabnahme-Grenzwert
t_peak… akkumulierte Zeitdauer des Peak-Energieeinsatzes

Die Funktion f_1 in der Zielfunktion definiert die Lagerkosten für vor dem Lieferdatum fertiggestellte Produkte und gleichzeitig die Bestrafung für nach dem Lieferdatum fertiggestellte Produkte – beides als kontinuierliche Funktion der Fertigstellungszeit eines Loses/Auftrags –, dargestellt in Abbildung 51.

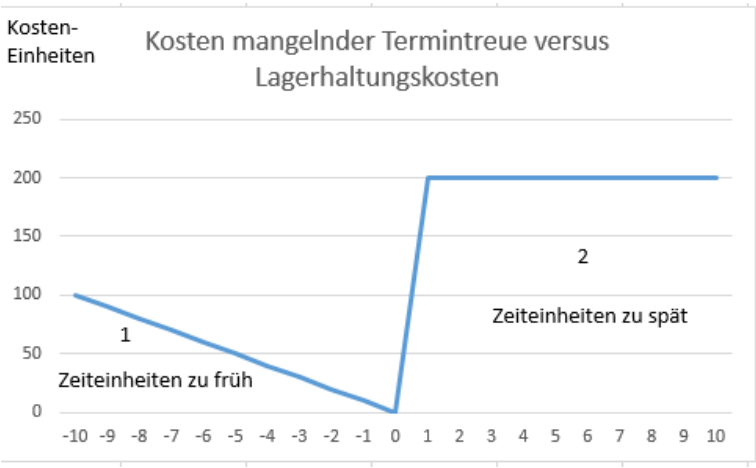


Abbildung 51: Funktion f_1

In der Zielfunktion ist eine Energiebewertung enthalten, die zum einen die Energiekosten und zum anderen die dem Energieeinsatz zugeordnete CO_2-Emission bewertet. Beide Bewertungen greifen auf den Energieeinsatz, verteilt auf die Energieträger (Elektrizität, Prozesswärme und Prozesskälte), übermittelt in Form des Simulationsfeedbacks, zu. Für die Energiekosten ist zudem ein vereinfachter, im Zeitverlauf variabler Preis für elektrische Energie angenommen – im Test-Case wurde eine über Polynome angenäherte Funktion eines Beispielkostenverlaufes hinterlegt.

Bei der Entwicklung des Optimierungsmoduls gilt, dass die Zielfunktion für jeden Anwendungsfall gesondert festgelegt werden muss. Zwar gibt es bestimmte Zielfunktionsbestandteile, die, insbesondere für ähnliche Produkte und Prozesse, für viele Anwendungsfälle relevant sind und mit steigender Zahl implementierter Zielfunktionen für bestimmte Anwendungsfälle, wird zukünftig die Möglichkeit bestehen, bei der Zielfunktionsdefinition weitgehend auf die Anpassung und Kombination bestehender Zielfunktionsmodule zurückzugreifen. Allerdings muss eine Zielfunktion bei der Verwendung einer automatischen Optimierung immer genau auf die Anwendung zugeschnitten werden. Die Zielfunktion erfordert also, ebenso wie die Simulations-Modellierung, weiterhin ein erhebliches Maß an manueller Anpassung im

konkreten Anwendungsfall. Die Entwicklung einer Zielfunktion für ein reales Planungsbeispiel wird im Abschnitt zur Fallstudie in Kapitel 7.2 vorgestellt.

6.3.3 Optimierungsalgorithmen

Wie in Kapitel 2.4 zur Optimierung festgehalten, gibt es für die Problemkategorie der Sequenzierung, Terminierung und Maschinenbelegung, in Verbindung mit dem Energieaspekt, keine speziell angepasste Heuristik aus dem Operations Research – auch Rager (vgl. Kapitel 4.2.5) hat für seinen Anwendungsfall eines Simulationsmodells, das weniger komplex als das vorliegende ist, keine spezielle Heuristik anwenden können. Daher kommen nur die Metaheuristiken als universal nutzbare Lösungsalgorithmen in Frage. Da auch der bereits zitierte Ansatz von Rager ein anderes Simulationsmodell, mit deutlich weniger Komplexität hinsichtlich der Stellgrößen und des Modellverhaltens, beinhaltet, kann auch diese Optimierungsmethode nicht übernommen werden. Stattdessen soll eine vergleichende Evaluierung von Metaheuristiken sowie die darauf basierende Entwicklung eines speziell angepassten Optimierungsalgorithmus‘ erfolgen. Das Vorgehen erfolgt in drei Phasen:

- **Phase 1:** Zunächst werden Metaheuristiken, die für eine komplexe multimodale – also mehrere lokale Optima enthaltende – Fitnesslandschaft getestet, unter Verwendung identischer Szenarien und mit ihrer jeweiligen Standard-Parametrisierung und Implementierung in der Matlab® Global Optimization Toolbox.
- **Phase 2:** Daraufhin werden die am besten geeigneten Algorithmen der Phase 1, der Tuning-Phase, an die vorliegende Optimierungsaufgabe und das Modellverhalten angepasst und hinsichtlich der Leistung optimiert – die Optimierungsleistung bezieht sich hierbei auf das möglichst schnelle Erreichen einer guten Lösung, mit der Rechenzeit als eines der wichtigen Kriterien für eine spätere Praxiseignung des Planungswerkzeuges.
- **Phase 3:** Zum Abschluss wird das entwickelte Optimierungsmodul ebenso wie die hybride Simulation in die Software-Implementierung des Planungstools integriert, um die Leistung zusätzlich zu verbessern.

Die in der Phase 1 vergleichend evaluierten Metaheuristiken sind:

- Genetic Algorithm (GA)
- Particle Swarm Optimization (PSO)
- Simulated Annealing (SA)

- Pattern Search (PS)
- Multi Start Search (MS)

Die Test-Szenarien umfassen: 3 Simulations-Zeiträume (1 Tag, 7 Tage, 30 Tage), jeweils mit 2 Produktionsprogrammen (kleine/große Menge an Produktionslosen, mit 2 verschiedenen Produkttypen und ihren unterschiedlichen Prozessvarianten), mit jeweils mehrfachen Optimierungsläufen für jedes Einzelszenario, um stochastische Fluktuationen absichern zu können.

Phase 1 – Auswahl geeigneter Metaheuristiken

Die Abbildung 52 zeigt die Ergebnisse der vergleichenden Evaluierung der Metaheuristiken im Überblick.

Abbildung 52: Leistungsvergleich der Metaheuristiken – Phase 1

Die Ergebnisse zeigen ein gutes Ergebnis für den GA und PSO – da beides populationsbasierte Verfahren sind, erweisen sich die Ergebnisse auch im Vergleich mehrfacher Ausführung des gleichen Optimierungslaufes als konsistent, während die nicht populationsbasieren Algorithmen anfällig für stochastische Fluktuation sind; einige Läufe liefern sehr gute Ergebnisse, andere Wiederholungen des gleichen Optimierungslaufes ergeben ein schwaches Resultat. Außerdem ist festzustellen, dass für relativ weniger komplexe Szenarien (z.B. 1 Tag simulierte Zeit und wenige

Produktionslose) PS und SA die populationsbasierten Algorithmen übertreffen können, allerdings sinkt die Wahrscheinlichkeit dafür für komplexere Szenarien (in diesem Fall längere Simulationsdauer und mehr Produktionslose) erheblich. Das bedeutet, dass die nicht populationsbasierten Algorithmen für die komplexen Szenarien keine verlässlichen Ergebnisse bringen und die populationsbasierten Verfahren hierfür die bessere Wahl sind. Der GA zeigt insgesamt die beste Leistung: die Resultate für mehrfache Optimierungsläufe des gleichen Szenarios sind konsistent und verlässlich und die relative Verbesserung des Zielfunktionswertes ist unter den zwei am besten abschneidenden Verfahren im Vergleich. Seine Robustheit in einem sehr großen Suchraumen mit vielfachen lokalen Optima bedeutet eine gute Eignung für die vorliegende Optimierungsaufgabe. Außerdem eignet sich der GA sehr gut für ein gezieltes Tuning und eine Anpassung innerhalb des Suchalgorithmus‘ selbst. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, die Ausführung der Bewertung aller Lösungen einer Generation, soweit wie durch die Hardware möglich, zu parallelisieren. Da die Simulationslaufzeit der mit Abstand größte Zeitanteil der Optimierungsläufe ist, ergibt sich hierdurch ein weiteres großes Potential zur Leistungsverbesserung. Letztlich stimmt das Ergebnis auch mit den Ergebnissen von Rager überein, der den GA ebenfalls als den geeigneten Algorithmus für ein Problem der simulationsbasierten Optimierung im Bereich energiebezogener Produktionsplanung ermittelt hat, wenn auch für ein weniger komplexes Simulationsmodell.

Phase 2 – Tuning und Optimierung

Nach der Auswahl des GA für die Phase 2 des Prozesses der Optimierungs-Entwicklung, soll an dieser Stelle kurz eine Vorstellung des grundsätzlichen Ablaufs des GA erfolgen, da Anpassungen in diesem Ablauf für das Tuning des Algorithmus‘ verwendet werden (vgl. Abbildung 53).

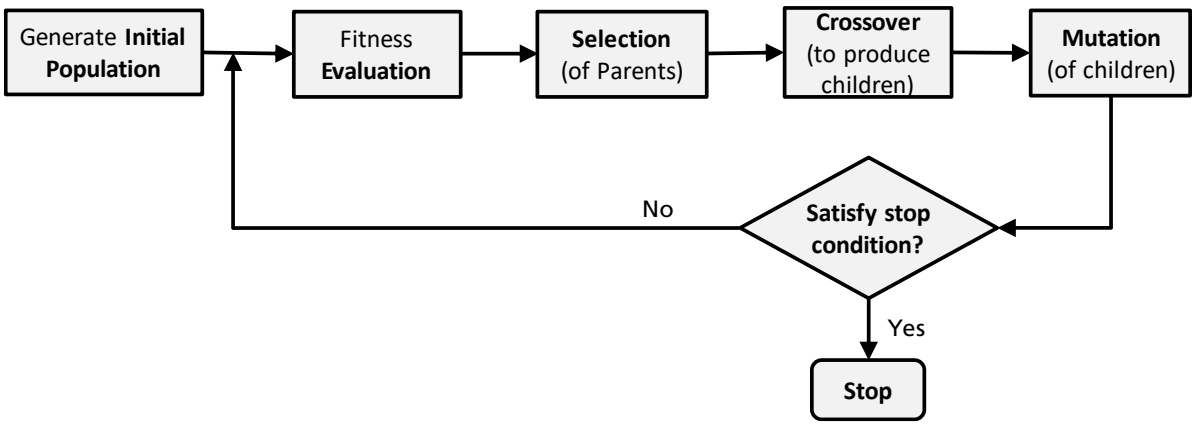


Abbildung 53: Basis-Algorithmus des GA

Der GA imitiert den Prozess der Evolution in der Biologie: Eine initiale Population (von Lösungen) wird auf nachfolgende Generationen vererbt, wobei Eigenschaften der Elterngeneration re-kombiniert und mutiert werden, bevor aus der folgenden Generation, aufgrund ihrer Fitness – gemessen mit einer Zielfunktion –, wieder eine Auswahl getroffen wird. Dieser Prozess läuft zyklisch so lange ab, bis ein Abbruchkriterium erreicht wird, üblicherweise entweder eine Anzahl an Bewertungen, eine Zeitdauer oder ein Konvergenzkriterium; letzteres ist erreicht, wenn die Verbesserungsrate des Zielfunktionswertes unter eine bestimmte Schwelle sinkt (Eiben, Smith 2015).

Eine der Hauptschwierigkeiten für die Metaheuristiken in Phase 1 ist der große Suchraum, mit einem großen Anteil an schlechten (bezogen auf die Zielfunktionswerte) und aus praktischer Sicht nicht umsetzbaren Lösungen. Die Suchprinzipien der meisten Algorithmen zielen auf eine graduelle Verbesserung ab. Wenn die Mehrzahl der Lösungen schlecht ist, bspw., wenn nicht alle beauftragten Produkte produziert werden, weil die Produktionsanlagen nicht genügend Betriebszeit hatten, überschattet die draus folgende (notwendige) harte Bestrafung dieser Lösungen durch die Zielfunktion die eventuell vorhandenen graduellen Verbesserungen anderer Zielfunktionsbestandteile. Dadurch kann die Optimierung nicht erkennen, ob sie auf einem „guten Weg“ bei der Suche ist. Eine Möglichkeit, den Lösungsraum einzuschränken und vor allem aus praktischer Sicht nicht sinnvolle Lösungen auszuschließen, ist das Einfügen von Nebenbedingungen. Diese Nebenbedingungen können nur mit heuristischem Wissen über das Modellverhalten erstellt werden und müssen trotzdem einen algorithmischen Charakter aufweisen, damit sie in ein Optimierungsmodul als generelle Regeln implementiert werden können. Die folgenden Nebenbedingungen haben sich als sinnvoll herausgestellt:

- das Vermeiden überlappender Loszeiten auf den Anlagen
- die Zeitfenster für die Betriebszeiten auf Anlagen müssen jeweils größer oder gleich der kleinsten Bearbeitungszeit eines Auftrags auf der Anlage sein
- für jede Anlage muss die Summe aller Zeitfenster der Betriebszeiten größer oder gleich der Summe der minimalen Bearbeitungszeiten aller Produktionsaufträge auf der Anlage sein

Diese Nebenbedingungen basieren jeweils auf dem Prinzip des Setzens von Zeitfenstern für die Betriebszeit von Anlagen – jeweils begrenzt durch eine Start- und Stoppzeit –, in Abhängigkeit der Anzahl der Produktionsaufträge bzw. –lose. Zusätzlich zur sinnvollen Begrenzung des Suchraums, ist das Tunen und Anpassen des GA selbst die zweite Tuning-Komponente – diese umfasst:

- die Implementierung einer **gezielten Suche**, umgesetzt durch die Anpassung der Operatoren des GA
- die Integration einer **Gedächtnisfunktion**, die aus dem Tabu Search Algorithmus entlehnt ist
- die Implementierung einer **Mixed Integer Optimization**
- die **Hybridisierung**, durch Kombination des GA mit einer nachfolgenden PS
- die Bestimmung der **optimalen Populationsgröße** für den GA

Die **gezielte Suche** soll die Parametervariation des Optimierungsalgorithmus‘ auf möglichst erfolgversprechende Änderungen begrenzen. Dies erfordert wieder heuristisches Wissen über das Verhalten des Simulationsmodells – und auch hier wurde wieder das Konzept der Betriebszeit-Fenster genutzt, das schon für die Definition von Nebenbedingungen zur Einschränkung des Suchraums gedient hat. Die gezielte Suche wurde folgendermaßen über den Crossover-Operator des GA implementiert:

- Die ursprüngliche Funktion des Crossover-Operators ist es, die Eigenschaften zweier Individuen der Elterngeneration von Lösungen zu kombinieren, um daraus ein Individuum der Nachfolgegeneration mit neuen Eigenschaften zu erstellen. Die Eigenschaften sind in der Form von Vektoren gespeichert. Für die Optimierungsaufgabe in der vorliegenden Arbeit, mit den vorliegenden Eigenschaftsvektoren, würde dieses Vorgehen zu einer großen Zahl aus praktischer Sicht nicht sinnvoller Lösungen führen. Daher wurde die Funktion angepasst, um stattdessen eine Mutation auszuführen, die eine gezielte Suche ergibt.
- Das Vertauschen der Produktionsauftrags-Reihenfolge (Sequenz) wurde durch das Vertauschen von Vektorelementen des Vektors erreicht, der die Auftragsauslösezeiten enthält.
- Die zeitliche Verschiebung von Betriebszeit-Fenstern auf jeder Anlage wird durch das Verschieben von Start-/Stopp-Zeiten innerhalb des Vektors erreicht, der die Maschinenbetriebszeiten enthält.
- Ein Zusammenziehen/Kontrahieren der Betriebszeit-Fenster auf den Anlagen konnte durch eine Punkt-Mutation der Start-/Stopp-Zeiten umgesetzt werden (Verzögern des Starts und Vorziehen des Stopps).

- Die Änderung der Auftragsauslösezeitpunkte wurde durch eine zufällige Mutation der Elemente des Vektors mit den Auftragsauslösezeitpunkten erreicht.
- Die Intensität der beschriebenen stochastischen Veränderungen wird im Laufe des Optimierungslaufes stufenweise reduziert. Zu Beginn werden zwischen einem und vier Vektorelementen verändert, während zum Ende nur noch eines verändert wird. Generell wird die Veränderung der Zeitfenster auf unter 25% der aktuellen Fensterlänge begrenzt. Diese Maßnahme soll dafür sorgen, dass zu Beginn eine größere Breite an Lösungen gesucht („Global Search“) und zum Ende eine feinere Suche ausgeführt wird („Local Search“).

Die Integration einer **Gedächtnisfunktion** ist ein weiteres Mittel, um die Optimierungslaufzeit zu reduzieren, indem der Algorithmus daran gehindert wird, schon einmal berechnete Lösungen ein weiteres Mal zu bewerten – stattdessen greift er auf die gespeicherten Bewertungsergebnisse zurück und die Simulation dieser Lösung wird eingespart. Diese Funktion ist ein integraler Bestandteil des Tabu Search Algorithmus, der seinerseits auch eine eigene Optimierungs-Heuristik ist. In der vorliegenden Arbeit wurde lediglich die Gedächtnisfunktion in den GA Optimierungsablauf eingebunden.

Eine **Mixed Integer Optimization** ist eine Maßnahme zur Reduktion des Suchraumes, durch das definierte Beschränken der Schrittweite der oben beschriebenen Veränderungen der Eigenschaftsvektoren. In einer Serie von Testläufen mit modulierter Schrittweite, zwischen 1 und 3600 Sekunden variierend, hat sich eine Schrittweite von 60 Sekunden als optimal für den gegebenen Testfall herausgestellt. In diesem Testbeispiel war der Effekt der Schrittweitenbegrenzung nur geringfügig, allerdings ist zu erwarten, dass er wichtiger und einflussreicher wird, sobald komplexere Modelle realer Fabriken zu bearbeiten sind.

Das gleiche gilt für die **Hybridisierung**, durch das Kombinieren des GA mit einer nachfolgenden PS: die Leistungsverbesserungen für den vorliegenden Testfall sind gering, allerdings bleibt es zu untersuchen, ob der positive Effekt in komplexeren Modellen mehr zum Tragen kommt. Die Abbildung 54 zeigt eine Grafik der Ergebnisse aus Phase 2 – hierbei wurden unterschiedliche Tuning-Maßnahmen und auch der Algorithmen der Phase 1 bezüglich ihrer Leistung verglichen.

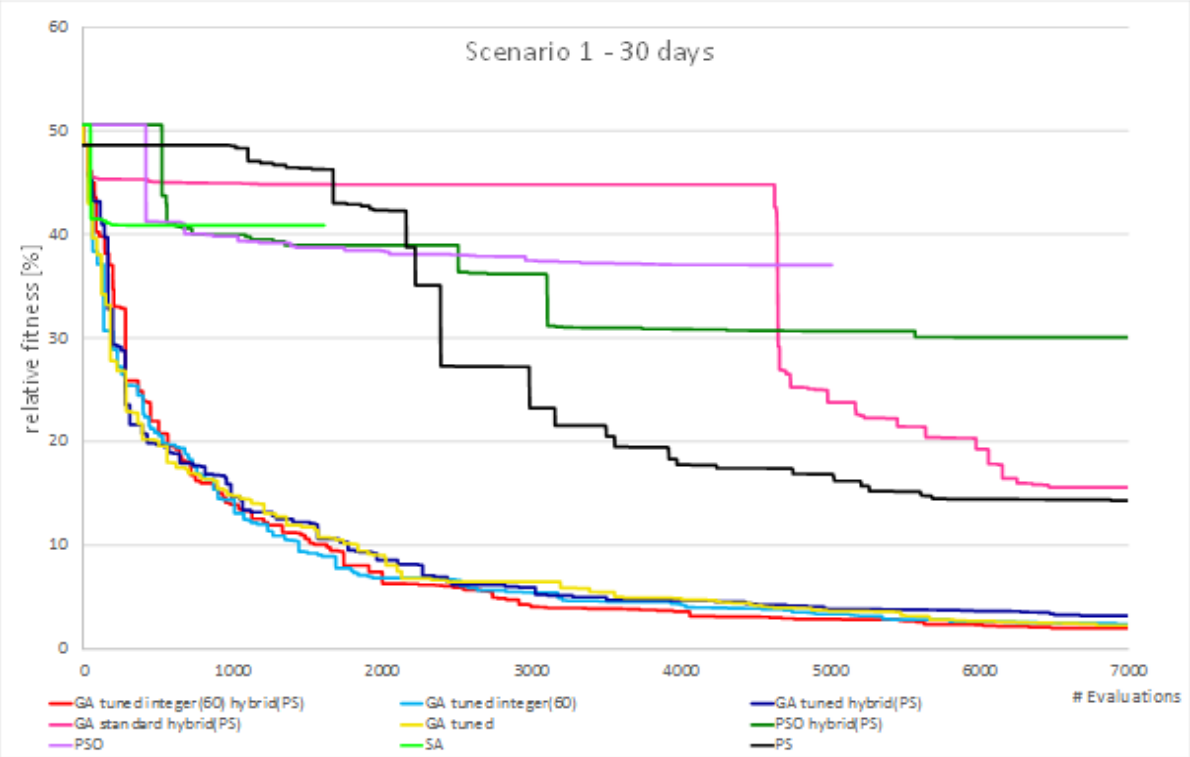


Abbildung 54: Leistungsvergleich der Heuristiken – Phase 2[13]

Da die Zielfunktion multikriteriell ist, ist es wichtig zu beobachten, ob die Optimierung mit allen Teil-Zielen arbeitet und diese verbessern konnte. Die Abbildung 55 zeigt die Veränderung der Werte der Zielfunktionsbestandteile während eines Optimierungslaufes des GA in Phase 2. Die wesentlichen Entwicklungen sind der schnell gesenkte Wert für Lieferverzug (dieser hat eine hohe Gewichtung in der Zielfunktion), die langsamere aber anhaltende Reduktion der Energieeinsatz-Bewertung über die Laufzeit und die wechselnde Verteilung zwischen Lagerkosten und Auftragsdurchlaufzeiten. Der Wert für nicht fertiggestellte Produkte wird während der gesamten Optimierungslaufzeit auf null gehalten, da die sehr hohe Gewichtung die Optimierung von Lösungen fernhält, welche die Soll-Produktionsmenge nicht erfüllen.

[13] Zu beachten ist: Der Standard GA vor dem Tunen ist hier in Kombination mit einer Hybridisierung mit PS dargestellt: die Testreihe hat gezeigt, dass der Standard GA ohne die Hybridisierung keine weitere Verbesserung als die nach etwa 1000 Bewertungen erreichte Lösung erzielen kann – die ab etwa 4700 Bewertungen ersichtliche Sprunghafte Verbesserung ist der Übergabepunkt an PS.

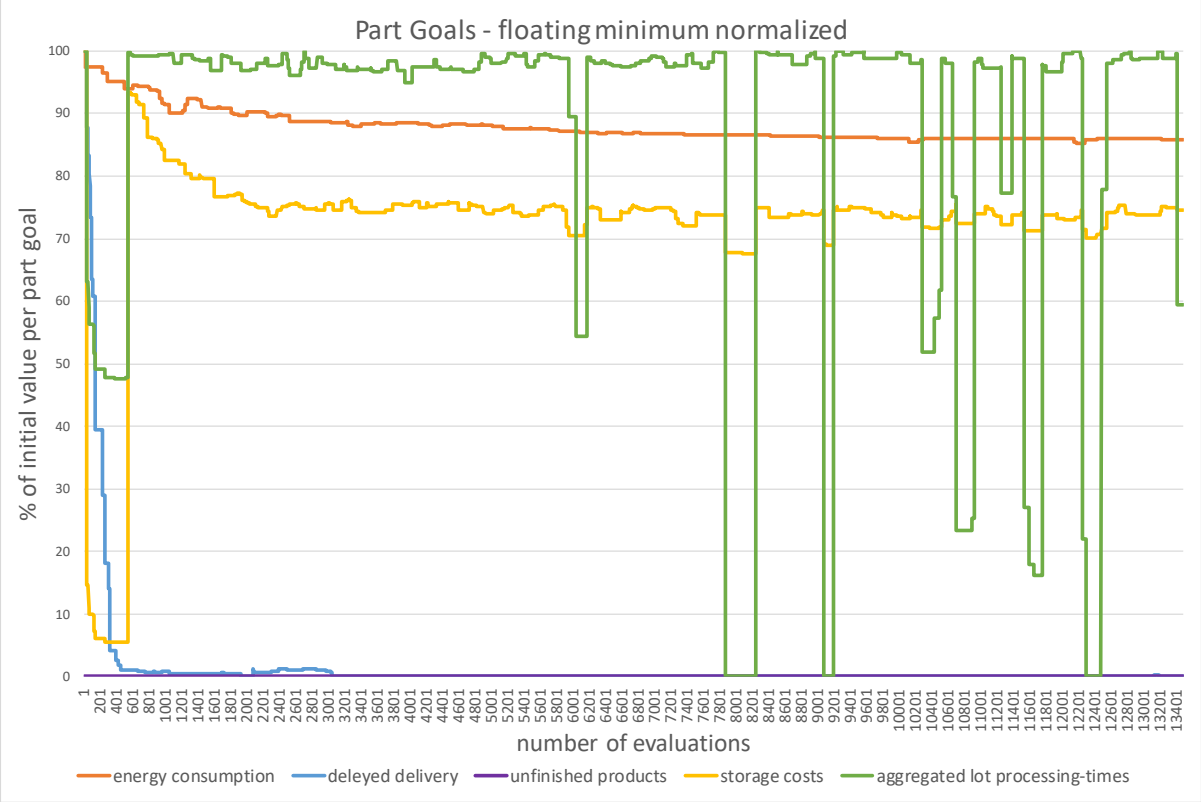


Abbildung 55: Veränderung der Zielfunktions-Bestandteile bei GA Anwendung – Phase 2[14]

Der letzte wesentliche Schritt in der Tuning-Phase für den GA sind Tests zur Ermittlung der optimalen Populationsgröße. Da der GA gleichzeitig mehrere Zwischenlösungen optimiert, ist dieses Verfahren robust gegenüber dem „Festsetzen“ in lokalen Optima sowie gegenüber stochastischer Fluktuation der Ergebnisse, wie dies beispielsweise in der Phase 1 im Vergleich mit den Ergebnissen des PS ersichtlich war. Allerdings bedeuten mehrere Lösungen in einer Generation auch mehrere notwendige Simulationsbewertungen und die damit verbundene verlängerte Laufzeit der Optimierung. Daher ist es angezeigt, die optimale Populationsgröße zu ermitteln. In den bislang vorgestellten Testläufen wurde die Populationsgröße auf 1/8 x n_{vars} gesetzt (mit n_{vars} als Anzahl der Variablen eines Optimierungs-Szenarios). Die Ergebnisse der Experimente zeigen eine erhöhte Optimierungsgeschwindigkeit bis zur Verringerung der Populationsgröße auf 1/16 n_{vars} – nach diesem Punkt machen die stochastischen Fluktuationen die Ergebnisse unzuverlässig, das heißt, ab hier verliert der GA seine populationsbedingte Robustheit.

[14] die Werte sind auf 100% für jeweils pro Teilfunktion normalisiert

6.3.4 Testergebnisse der vereinfachten Fallstudie

Die Ergebnisse der Entwicklung des Optimierungsalgorithmus‘ zeigen, dass ein GA mit einer Reihe von Tuning-Maßnahmen die bestmögliche Optimierungs-Leistung für den vorliegenden Fall erbringt. Die den Algorithmen jeweils übergebenen Startlösungen sind basiert auf echten Produktionsplänen der Produktion, aus welcher der vereinfachte Test-Fall abgeleitet ist. Die manuell erstellten Pläne konnten, bezogen auf die Zielfunktionswerte, wie folgt verbessert – also verringert – werden:

- 4% durch Anwendung des Standard GA
- 13% durch Anwendung des Standard GA, in Kombination mit PS
- 32% durch Einsatz des getunten GA mit einer Mixed integer Optimierung

Gute Resultate konnten für die komplexeren Szenarien jeweils innerhalb von ~2.000 Bewertungen, also auch entsprechend vielen Simulationsläufen, erreicht werden. Mit einem intel-i7 4Gh Prozessor – mit einem solchen Intel-Prozessor wurden die Testläufe ausgeführt – entspricht das einer Laufzeit von etwa 70 Minuten. Wenn man den erschwerenden Faktor etwas komplexerer, von kompletten Produktionsstandorten erstellter Simulationsmodelle (größer, mit mehr Cubes und mehr Variablen) betrachtet, gleichzeitig aber auch eine mögliche Parallelisierung der Bewertungen, sowie die weitere Integration von Maßnahmen zur Reduktion des Suchraums, so scheint es realistisch, die Optimierungszeit unter einer Stunde halten zu können. Diese Laufzeit ist, je nach Einbindung des Planungswerkezuges, für die praktische Anwendung durchaus realistisch, dennoch ist die Rechenzeit damit deutlich über der marktführender APS, die keine Simulation und keine Energiebetrachtung ausführen und nur eine begrenzte Optimierungsfunktion bieten (diese liegen im Sekunden- oder Minutenbereich). Es ist denkbar, eine Kombination von umfangreichen Über-Nacht-Planungs-Optimierungsläufen und einer Anpassung an geänderte Rahmenbedingungen über den Tag, durch eine Folge weniger komplexer Detailoptimierungsläufe (kürzere Simulierte Zeit, reduzierte Stellgrößen und Rückgriff auf die sehr gute Basislösung des umfangreichen Nachtlaufes) einzusetzen. Dadurch könnte die Laufzeit der tagsüber erfolgenden, regelmäßigen Planungsaktualisierungen den für APS gewohnten Zeiten angeglichen werden. Obwohl die bisherigen Optimierungs-Ergebnisse der Fallstudie sich auf ein vereinfachtes Simulationsmodell einer realen Fertigung beziehen, entspricht die grundlegende Komplexität der Optimierungsaufgabe dem zu erwartenden Level für zukünftige Planungsfälle. Das Optimierungsmodul erfüllt die Anforderungen hinsichtlich Laufzeit und Qualität der Lösung und wurde vom Autor veröffentlicht (Sobottka et al. 2017).

7 Anwendung auf eine Fallstudie

Bis zu dieser Stelle wurden entwickelt:

- das Modellierungskonzept für die Abbildung eines Produktionssystems,
- eine entsprechende hybride Simulationsmethode,
- und ein Optimierungsmodul für die automatisierte Planungsunterstützung, das die Simulation als Bewertungsfunktion nutzt.

In diesem Abschnitt wird die sich daraus ergebende Gesamtmethode auf ein konkretes Fallbeispiel aus einem Unternehmen exemplarisch angewendet. Dies soll die Methode validieren, eine Potentialanalyse ausführen und weiteren Entwicklungsbedarf der Methode für die praktische Anwendung in Unternehmen ermitteln.

7.1 Charakterisierung des Fallbeispiels

Für die Fallstudie dient eine Produktionslinie einer industriellen Bäckerei in Österreich – ein vereinfachtes, abstrahiertes Modell einer Bäckerei-Produktionslinie ist auch schon für die Entwicklung der Optimierung vorgestellt worden: Dieses nun folgende Modell bildet im Gegensatz dazu die konkrete Linie originalgetreu ab und ist komplett mit Echt-Daten aus der Produktion parametrisiert. Die Planungsergebnisse

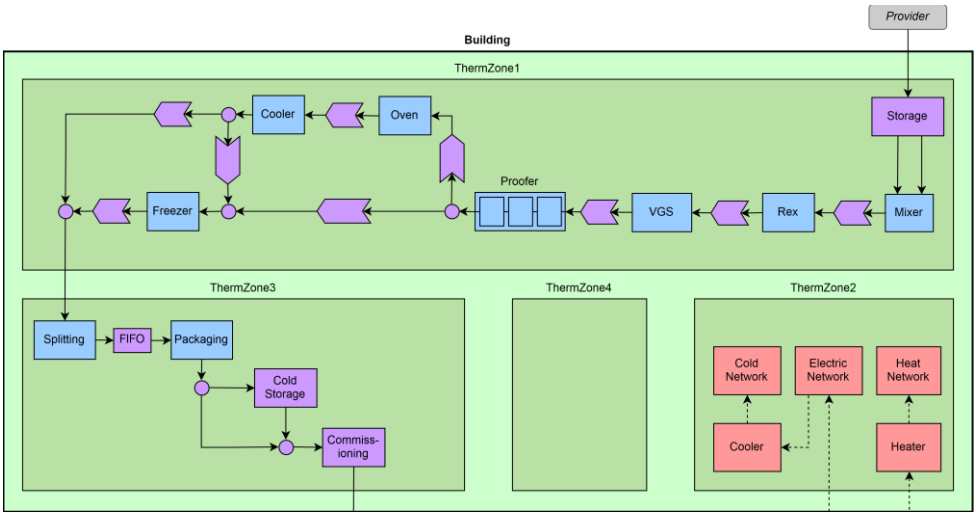


Abbildung 56: Simulationsmodell der Fallstudie

und ermittelten Potentiale haben daher auch Relevanz für die Planungsoptimierung des realen Produktionssystems. Die grundsätzliche Modellstruktur ist in Abbildung 56 dargestellt.

Das Produktionssystem umfasst neun Produktionsmaschinen, neun Förderbänder mit Kreuzungen und zwei Lager-Komponenten im Logistiksystem. Produziert werden fertig-gebackene (frische), halbfertig-gebacken-tiefgekühlte und tiefgekühlte Semmeln, die in verschiedenen Materialflussvarianten durch die Fertigung bewegt werden; im Wesentlichen mit oder ohne Durchlaufen des Backofens. Die Produkte erfordern unterschiedliche Prozessparameter, z.B. Backtemperaturen oder Prozesszeiten auf den Anlagen. Diese produktspezifischen Parameter sind in Prozessbeschreibungen/Arbeitsplänen gespeichert und werden von der Methode als Inputdaten genutzt. Zwei der Produktionsmaschinen sind durch ein ausgeprägtes – thermisch-physikalisch Verhalten charakterisiert. In der TGA und im Energie-System und Gebäude gibt es einen zentralen Ofen, der Wärme über ein Thermoöl-Heizungsnetz zum Industrie-Backofen sowie zu den verschiedenen Hallen der Fabrik bereitstellt. Neben dem Heizungsnetz bestehen drei Kältenetzwerke und ein elektrisches Netz. Die Kältenetzwerke enthalten insgesamt fünf Kälteanlagen. Die Umgebung der Fabrik wird über einen Wetterdaten-Import berücksichtigt, vor allem die Temperatur im Zeitverlauf und die Bewölkung/Sonneneinstrahlung. Es wurden Szenarien für drei Saisons – Zeiträume im Jahresverlauf – untersucht; Saisons beginnend mit der 3., 34. und 44. Kalenderwoche. Das Gebäude ist in vier thermische Zonen unterteilt, die Räumen mit ähnlichen thermischen Bedingungen entsprechen: die Hauptproduktionshalle, ein TGA-Raum, ein Bürogebäude und ein Tiefkühllager. Jede dieser Zonen wird während der Simulation mit Wärme/Kälte versorgt und tauscht Wärme/Kälte mit den jeweils anderen aus.

Die hybride Simulation wurde für die Tests von einem Implementierungspartner im Projekt in einer C++ Software umgesetzt – die Optimierung erfolgt weiterhin mit Matlab® und greift auf die Global Optimization Toolbox zu. Die Optimierung in Matlab ruft die in einer ausführbaren Datei befindliche Simulation als Bewertungsfunktion auf, nach dem Schema in Abbildung 35. Ebenso wie die produkt- und prozessspezifischen Daten, sind auch alle Modelle bezüglich ihres physikalisch-thermischen Verhaltens mit realen Daten parametrisiert; letztere als Ergebnis einer umfangreichen Messkampagne in der Fabrik. Die untersuchten Produktionsszenarien umfassen ein-, zwei- und sieben-tages Szenarien (simulierte Zeit), mit jeweils allen 12 auf der Produktionslinie gefertigten Produkttypen. Die importierten Produktionsmengen und Liefertermine sind tatsächlich die im Herbst 2016 angefallenen Mengen und Zeitpunkte. Die Basis-Planungen, mit denen die optimierten Planungsergebnisse der Methode vergleichend bewertet werden, entsprechen den von den menschlichen Planern erstellten Produktionsplänen.

Für die Zielfunktion der multikriteriellen Optimierung wurde die in der Optimierungsentwicklung aufgestellte Basisfunktion (Sobottka et al. 2017)

angepasst. Dazu wurden die Funktionsbestandteile mit realen Werten – bspw. Kostensätze und Energiepreise – und Präferenzen der Planer parametrisiert. Die Gewichtungen der Bestandteile wurden ebenso angepasst. Die Anpassungen wurden im Zuge von Zielfunktionsworkshops mit Planern und Management der Bäckerei entwickelt. Das Resultat ist folgende Funktion – Details zu den Funktionsbestandteilen finden sich in Kapitel 6.3.2:

Formel 5: Zielfunktion der Fallstudie

$$f(x) = \omega_1 \sum_{i=1}^{n} (f_1(c_i)) + \omega_2 n_2 k_1 + \omega_3 n_3 + \omega_4 n_4 \quad (1)$$

ω_1 - ω_4 … Gewichtung der Teilziele

i … Index für Produktionslose

f_1… Bewertungsfunktion für Lieferverzögerungen und Lagerkosten

c_i… Produkt(Los)-Fertigstellungszeitpunkt

n_2… akkumulierte Gesamt-Energiemenge

k_1… Gesamtenergiekosten pro kWh (inkl. CO_2-Emissions-Bewertung)

n_3… Produkteinheiten-Anzahl nicht bedienten Bedarfes

n_4… Anzahl nicht produzierter Produkte im Betrachtungszeitraum

Die Zielfunktion ist auf Euro normalisiert. Die Teilfunktion f_1 berechnet die Lagerkosten für Produkte, die vor dem Lieferdatum fertiggestellt werden sowie Pönalen für verspätete Lieferung von Produkten, als eine Funktion der Produktfertigstellungszeitpunkte. Der zweite Zielfunktionsbestandteil berücksichtigt den Energieeinsatz – die Gesamtenergiekosten werden als eine Kombination der tatsächlichen Energiekosten pro Energiequelle plus einen Bewertungsfaktor für die damit verbundenen CO_2-Emissionen berechnet. Für die reinen Energiekosten wurden mehrere Szenarien getestet: In der Saison 0 werden die tatsächlichen Ist-Kosten aus dem Energievertrag der Bäckerei berücksichtigt, während in den Saisons 1/2/3 die tatsächlichen Spotmarktpreise im Winter/Sommer/Herbst 2016 (korrespondierend zu den Kalenderwochen 03/34/44) angenommen wurden (EPEX SPOT 2017). Mit den letzten drei Saisons können daher die Möglichkeiten eines komplexen Portfoliomanagements für die Beschaffung von Elektroenergie evaluiert werden – dies greift die in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Möglichkeiten auf. Das Portfoliomanagement, bzw. die gezielte Beschaffung von Energie auf kurzfristigen Energiemärkten, ist eine der Potentiale, die durch die Nutzung einer IT-Planungsmethode wie der vorgestellten für Produktionsunternehmen entstehen. Die Energiekosten für Kälte werden über den Verbrauch der elektrisch betriebenen

Kältemaschinen berechnet. Für die Wärmeenergiekosten wurde der tatsächliche Tarif der Bäckerei genutzt. Der Bewertungsfaktor für die verbundenen CO_2-Emissionen wird zunächst mit dem Energieeinsatz pro Energiequelle mit korrespondierenden Konversionsraten für Österreich kombiniert (OIB-330.6-009/15), um die Emissionsmenge zu ermitteln. Diese wird dann mit CO_2-Emissions Spotmarkt-Preisen der European Energy Exchange AG (European Energy Exchange (EEX) 2017) bewertet, zuzüglich eines Faktors, der die Bewertung des Managements für CO_2-Emissionen widerspiegelt. Der dritte Zielfunktionsbestandteil sind Pönalen für nicht gedeckten Bedarf während der Simulation und der vierte bestraft bis zum Ende der Simulation nicht fertiggestellte Produkte.

7.2 Anpassungen an die Fallstudie

Während das hybride Simulationsmodell des Produktionssystems aus den bereits entwickelten Modell-Bestandteilen zusammengestellt werden konnte, die im Zuge der Entwicklung der objektorientierten Simulationsmethode (vgl. 6.1) erstellt wurden, musste die Optimierungsmethode (vgl. 6.3) an den Anwendungsfall adaptiert werden. Die wesentlichen Komponenten der Optimierung – ein speziell adaptierter Genetischer Algorithmus (GA) – bleiben unverändert.

Die bedeutendste Änderung ist die Unterteilung der Optimierung in zwei Phasen. Diese Maßnahme wurde ergriffen, um die Geschwindigkeit der Optimierung in einem großen Suchraum zu verbessern, der in realen Planungsumgebungen komplexer Produktionssysteme entsteht. In der **ersten Phase** werden nur die Sequenzierung und Terminierung von Produktionslosen als Stellgrößen optimiert. In der nachfolgenden **zweiten Phase** werden mit einer fixierten Auftragssequenz die Betriebszeitfenster für Produktionsmaschinen und Anlagen in der Peripherie verschoben, komprimiert und somit hauptsächlich hinsichtlich des Energieeinsatzes optimiert. Es ist wichtig zu betonen, dass trotzdem die Stellgrößen in den Phasen variieren, die Zielfunktion in beiden Phasen identisch ist und dass auch die hybride Simulation jederzeit das komplette Produktions- und Energiesystem betrachtet. Daher kann in beiden Phasen grundsätzlich die ganze Zielfunktion optimiert werden. Die zwei Phasen erfordern Anpassungen in den Nebenbedingungen, im Vergleich zum entwickelten Basis-Optimierungsmodul aus Kapitel 6.3: In der ersten Phase muss nur noch sichergestellt werden, dass die Auftragsauslösezeitpunkte positiv sind. In der zweiten Phase muss eine überlappende Bearbeitung von Aufträgen auf Maschinen verhindert werden, genauso wie sichergestellt werden muss, dass die Betriebszeiten an jeder Maschine mindestens so lang sind, wie die minimale Bearbeitungsdauer eines Produktionsloses an der gleichen Maschine

Eine zweite wesentliche Anpassung ist die Einführung eines **Produktionsplan-Generators** (PPG), der eingesetzt wird, um die Anzahl praktisch nicht nutzbarer Lösungen, die durch den GA erstellt werden, zu minimieren. Dies wiederum verringert in gleichem Ausmaß die Anzahl der notwendigen, rechenaufwändigen Simulationsbewertungen und verhindert, dass der GA sich in Suchraumbereichen ohne im Sinne der Zielfunktion nutzbare Lösungen „verliert“. Der PPG greift auf die Prozessbeschreibungen der Produkte zu und erstellt auf Basis der Auftragsauslösungszeitpunkte Produktionspläne für jede Maschine und Anlage. Der PPG erhöht damit die Geschwindigkeit der Optimierung und verbessert die Lösungsqualität. In der Phase 1 wird der PPG vor jeder Simulationsbewertung für jede Zwischenlösung aufgerufen. Zwischen den Phasen 1 und 2 wird er zusätzlich aufgerufen, um zulässige Backofen-Betriebszeit-Fenster und die Erfüllung der linearen Nebenbedingungen sicherzustellen. In der Phase 2 empfängt der PPG zusätzlich optimierte Ofenbetriebszeiten für jede Zwischenlösung, um die Betriebszeiten der restlichen Maschinen und Anlagen zu berechnen. Mit der aktuellen Simulationsleistung, Rechnergeschwindigkeiten und der Komplexität der üblichen Optimierungsaufgaben und Produktionssysteme der Praxis, ist es wahrscheinlich, dass sowohl der Zwei-Phasen-Ansatz, wie auch die Nutzung des PPG notwendig sein wird. Der Nachteil der zwei Phasen Optimierung ist, dass das Optimierungspotential einer vollständig simultanen Optimierung aller Stellgrößen potentiell unerreichbar bleibt. Nachteilig an der PPG Nutzung ist, dass dieser an jeden Planungsfall und jedes Simulationsmodell angepasst werden muss und somit den Modellierungsaufwand erhöht, der durch die objektorientierte Simulation minimiert werden soll. Letzteres soll in zukünftiger Entwicklung der Methode verbessert werden, indem eine Generalisierung und Modularisierung auch der Optimierung und des PPG erreicht wird. Bevor die Experimente durchgeführt wurden, ist eine Validierung und Verifikation (vgl. Kapitel 2.3.4) der Simulation erfolgt: Durch Tests von Modellbestandteilen sowie Parametertests und Input bekannter Produktionspläne und Messergebnisse mit dem Verhalten des Modells wurde sichergestellt, dass sich das Simulationsmodell realistisch verhält und die Planungsaussagen auf die Realität übertragbar sind.

7.3 Ergebnisse der Fallstudie

In den Experimenten wurden Szenarien mit 1, 7 und 30 Tagen simulierter Zeit durchgeführt. Der hauptsächliche potentielle Anwendungsbereich für die Planungsmethode und ihre PPS/APS-ähnlichen Funktion, ist aktuell der Ein-Tages Planungshorizont – daher werden die Ergebnisse des Ein-Tages-Horizontes auch im Folgenden ausführlich dargestellt. Die Abbildung 57 zeigt den Einfluss verschiedener

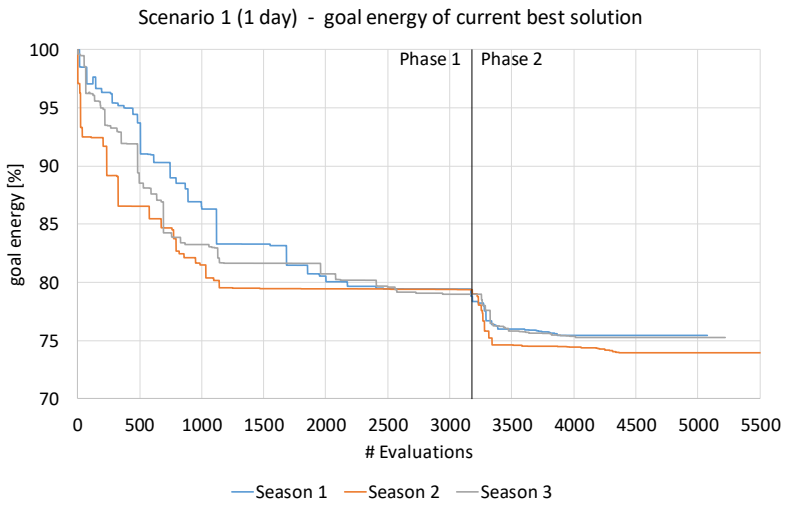


Abbildung 57: Energie-Ziel Trend der aktuell besten (Zwischen-)Lösung

Saisons (Jahreszeiten) und korrespondierender Wetterbedingungen sowie Kurzfristiger Marktpreise für Elektroenergie (Spotmarktpreis) auf das energieseitige Einsparungspotential. Die Abbildung 58 zeigt den Trend der Teilzielfunktionswerte im Verlauf der Optimierung als Durchschnittwerte pro GA Lösungsgeneration. Dieses Diagramm lässt den Trade-off zwischen den Zielfunktions-Bestandteilen erkennen. Außerdem wird deutlich, dass die Optimierung, nachdem zunächst eine deutliche Energie-Kosten Verringerung erreicht werden kann, kurz nach dem Beginn der Phase 2 keine deutlich verbesserten Lösungen mehr erzeugen kann, ohne gleichzeitig nicht mehr alle geplanten Produkte fertigstellen zu können.

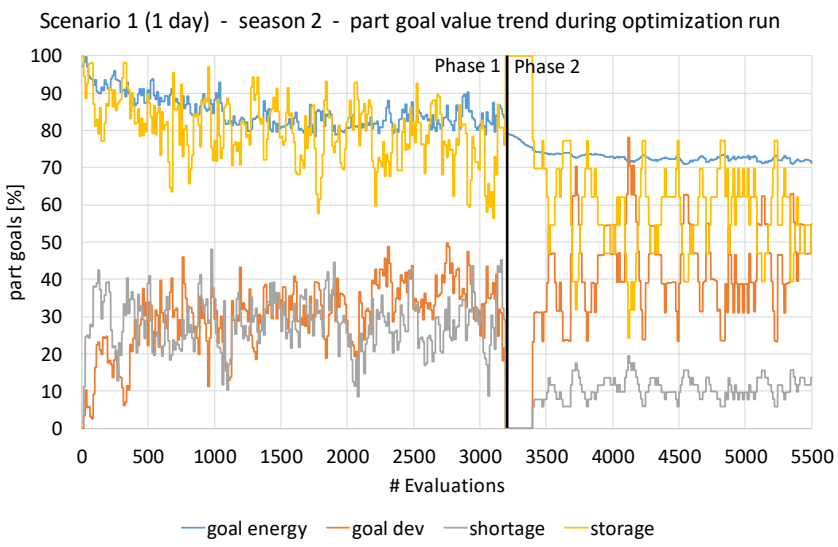


Abbildung 58: Teil-Ziel-Trends der Durchschnittswerte pro Lösungs-Generation

Eine Erhöhung der Sprungweite der Optimierung, eine Maßnahme zur Reduktion des Suchraums der Optimierung, von einer auf 300 Sekunden verbessert sowohl die Optimierungsgeschwindigkeit, wie auch die Qualität der Lösung, vgl. Abbildung 59.

In den Ein-Tages Szenarien ist eine Optimierung von etwa 50% möglich gewesen, bezogen auf eine Reduktion des Gesamt-Zielfunktionswertes. Diese große Optimierung beinhaltet die Reduktion von Pönalen für verzögerte Belieferung, die in manuell erstellten Plänen vorkommen können. Der Energieeinsatz konnte dabei um bis zu 33% reduziert werden, während die damit verbundenen Gesamt-Energiekosten – diese enthalten auch einen Anteil für CO_2-Kosten – um 25% gefallen sind. Die Szenarien mit Berücksichtigung variabler Elektroenergie-Preise im Zeitverlauf (Spot-Markt-Preise) zeigen ein erhöhtes, Energie bezogenes, Optimierungspotential. Dieses ist von den untersuchten Saisons in Kalenderwoche 34 – das Sommer-Szenario – am höchsten, aufgrund des hohen Kühlungsbedarfes und gleichzeitig hoher Verfügbarkeit günstigen Stromes aus erneuerbaren Energiequellen. Die Optimierung konnte in ~4.400 Simulations-Bewertungen und ebenso vielen Zwischenlösungen erreicht werden. In den Ergebnis-Trend-Diagrammen ist ersichtlich, dass die Anzahl der Bewertungen für dieses Ergebnis auf etwa 2.300 reduziert werden kann, indem der Phasenübergang von Phase 1 auf 2 auf etwa 2.000 Bewertungen verschoben wird.

Auf einem Standard intel-i7 4 GHz Prozessor erfordern 2.300 Bewertungen eine Ausführungszeit von etwa drei Stunden. Längere Szenarien wurden, wie eingangs erwähnt, ebenfalls durchgeführt, allerdings ergeben sich hierfür zunächst praktische Beschränkungen: Die Komplexität von Sieben-Tages-Szenarien steigt, bezogen auf die Suchraumgröße auf etwa das Dreihundertfache an, 30 Tages-Szenarios entsprechend noch länger.

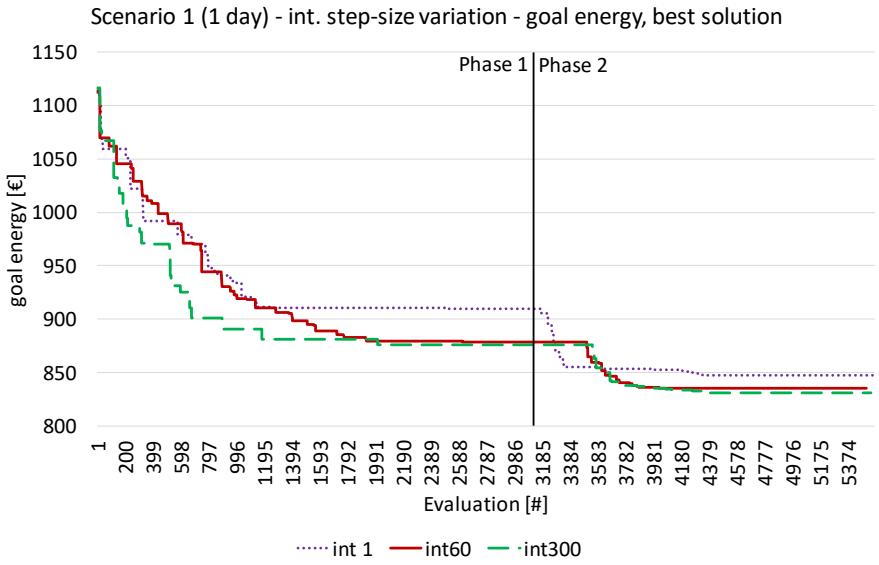


Abbildung 59: Einfluss von variierten Optimierungs-Schrittgrößen auf die Optimierungs-geschwindigkeit und –ergebnisqualität (Werte: 1, 60 und 300 Sekunden)

In Anbetracht der praktischen Anforderung für eine Ausführungsdauer der Planungsoptimierung von etwa zwei bis drei Stunden, ergibt sich für die langen Szenarien eine zu kleine Zahl möglicher Bewertungen, um gute Optimierungsergebnisse erzielen zu können, verglichen mit dem theoretisch möglichen Optimierungspotential der Szenarien. Durch die weitere Reduktion der Populationsgröße des GA kann die Optimierungsgeschwindigkeit signifikant verbessert werden (vgl. Abbildung 60), allerdings führt dies auch zu weniger verlässlichen Ergebnissen – eine der wesentlichen Vorteile populationsbasierter Metaheuristiken ist schließlich die simultane Optimierung einer ganzen Population von Zwischenlösungen.

In der nächsten Iteration des Optimierungsmoduls, bzw. der gesamten Planungsmethode, wird auch die Optimierung in die Software-Implementierung integriert werden, welche die hybride Simulation schon enthält. Dieser Schritt kann vermutlich die Leistung der Planungsoptimierung mit der Simulation deutlich verbessern. Mit der Implementierung können die rechenintensiven

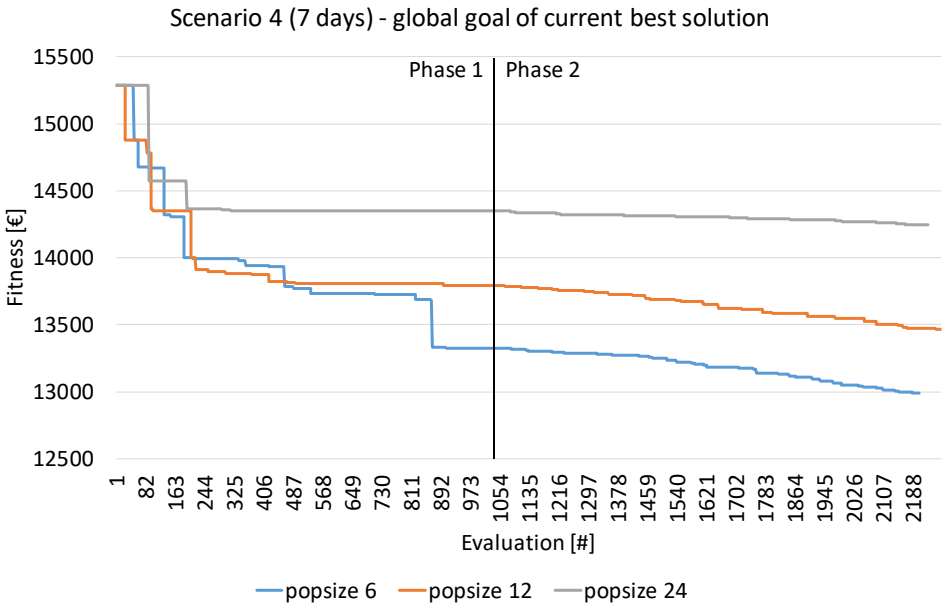


Abbildung 60: Einfluss einer Variation der Populationsgröße des GA auf die Optimierungsleistung

Simulationsbewertungen auch auf mehrere Prozessorkerne verteilt und simultan ausgeführt werden – auch hierdurch kann die Rechenzeit, mit der Verwendung von Multicore-Prozessoren, noch einmal deutlich reduziert werden.

In der Anpassung der Gesamtmethode auf einen konkreten Praxis-Fall wurden eine Reihe von Adaptionen im Optimierungsmodul entwickelt, um die Komplexität resultierend aus echten Anwendungsumgebungen in der Ausführung der Methode bewältigen zu können und um fallspezifische Anforderungen der Planung erfüllen zu können. Die Simulation hingegen konnte mit den bereits entwickelten Simulationsobjekten und deren Parametrisierung erfüllt werden. Die Ergebnisse weisen ein Optimierungspotential von bis zu 50% aus, bezogen auf den Zielfunktionswert, und ein Optimierungspotential von bis zu 30% bezüglich des Energieeinsatzes. Durch eine Berücksichtigung variabler Energiepreise auf kurzfristigen Energiemärkten, konnte das Energie bezogene Optimierungspotential noch einmal vergrößert werden. Letzteres verweist auf das Nutzenpotential der Methode für komplexes Energie-Portfoliomanagement in Kombination mit der PPS – dies ist besonders im Kontext der Energiewende praxisrelevant. Es ist wichtig zu betonen, dass das Optimierungspotential stark vom spezifischen Fall und den

Anwendungs-Szenarien abhängig ist. In den in der vorliegenden Fallstudie überprüften Szenarien bewegt sich das Optimierungspotential zwischen 15-50%, mit einer Gesamt-Energie-Kosten-Optimierung von 8-25%. Ebenfalls ist es wichtig zu betonen, dass die mit der Optimierung verbundene Verschiebung und Kontraktion von Betriebszeitfenstern von Anlagen ein zusätzliches Risiko in das Produktionssystem einführt – letzteres ist ein Merkmal fast jeder Optimierung. Bevor von der Methode erstellte Planungen in der Praxis umgesetzt werden, ist es daher angebracht, die Planungen auf Machbarkeit und Sinnhaftigkeit zu überprüfen. Eine weitere Maßnahme zur Risikominimierung ist das Einfügen von Sicherheitsabständen für die Betriebszeitfenster von Anlagen. Die Simulation stochastisch verteilter Risiken und Störfaktoren ist zum derzeitigen Entwicklungsstand nicht praktikabel, da es die Anzahl notwendiger Simulationsbewertungen sehr stark vergrößern würde. Gleichzeitig sind diese Simulationsbewertungen und der damit verbundene Rechenaufwand schon jetzt ein wesentlicher limitierender Faktor für die Anwendung der Methode.

8 Diskussion der Ergebnisse

Der Abschluss der Arbeit ist zweigeteilt: Zuerst soll in diesem Kapitel die entwickelte Planungsmethode anhand der vorher aufgestellten Anforderungen, bewertet werden. Im daran anschließenden Kapitel 9 soll daraus der weitere Forschungsbedarf abgeleitet und ein Ausblick auf die weitere Nutzung und Weiterentwicklung der Methode gegeben werden.

Die hierin präsentierten Forschungsergebnisse demonstrieren, dass die entwickelte Methode geeignet ist, um die Grundanforderung einer Integration des Ziels Energieeffizienz in das traditionelle, rein ökonomische Zielsystem der Produktionsplanung- und Steuerung zu erfüllen. Die Methode kann optimierte Produktionspläne automatisiert erzeugen und auch die Ansteuerung des Equipments der Peripherie optimiert erfüllen.

Die übergeordnete Fragestellung: Wie kann eine Planungsmethode für die Produktionsplanung und Steuerung mit Einbeziehung der Energieeffizienz in das Zielsystem gestaltet werden? → Die vorliegende Arbeit ist eine Möglichkeit der Gestaltung einer entsprechenden Planungsmethode, in der die Materialfluss- und Energiesysteme als Bestandteile komplexer Produktionssysteme integriert betrachtet und mit einem Optimierungsmodul verknüpft werden.

Sub-Frage 1: Wie kann die Intralogistik bezüglich ihres Beitrages zum Energieeinsatz simuliert werden? → Über das Bausteinsystem (vgl. 6.2) ist eine Abbildung von Transport- und Handhabungsvorgängen möglich.

Sub-Frage 2: Wie kann das Gesamtsystem aus Maschinen/Anlagen, Technischer Gebäudeausstattung und Gebäude simuliert werden, so dass Wechselwirkungen der Systeme und sowohl die Materialflusskomponente wie auch der thermisch-energetische Aspekt abgebildet werden? → Der Kern der integrierten Betrachtung in der vorgestellten Methode ist die entwickelte hybride Simulation (vgl. 6.1), die über ihr hybrides Verhalten beide Aspekte der komplexen Produktionssysteme simultan und in ihren Wechselwirkungen abbilden kann; und dies deutlich realistischer als bspw. Methoden mit Co-Simulation.

Sub-Frage 3: Wie kann eine Optimierung gestaltet sein, die zusammen mit der Simulation das Finden bestmöglicher Planungslösungen ermöglicht, mit einem Zielsystem unter Berücksichtigung des Faktors Energieeffizienz? → Das entwickelte Optimierungsmodul mit einer multikriteriellen Optimierung (vgl. 6.3), auf Basis der Metaheuristik Genetischer Algorithmus, mit einem Tuning für den jeweiligen

Anwendungsfall, ist eine Möglichkeit der Gestaltung einer automatisierten Planungsoptimierung, mit der erhebliches Optimierungspotential in einem Beispiel-Anwendungsfall ausgewiesen werden konnte; weitere Anwendungsfälle sind aktuell in Arbeit.

Die weitere Selbstevaluierung der hierin entwickelten Methode soll anhand der Kriterien erfolgen, mit denen bereits in Abschnitt 4.4 die bestehenden Ansätze bewertet wurden. Da eine Selbstevaluierung vorliegt, verzichtet diese Arbeit auf eine Quantifizierung der Eignung der Methode für jedes Kriterium und liefert stattdessen eine qualitative Bewertung anhand jeder Anforderung im Vergleich zu den bestgeeigneten bestehenden Ansätzen – dies ist gerade im Sinne der Beurteilung einer Eignung für die praktische Anwendung der Methode und damit für die Erfüllung des Forschungsziels relevant.

- **Anforderung 1 – die Simulationsbasierte Methode bildet ab:**
    - **Logistiksystem:** Während die vorhandenen Ansätze die Materialflüsse und die dafür notwendigen Transporte zwischen Anlagen sowie den damit verbundenen Energieeinsatz nicht abbilden konnten, ist in der entwickelten Methode eine Prozess-Baustein basierte Möglichkeit geschaffen worden, Transporte und Handhabungsprozesse in einer Simulation des Produktionssystems abzubilden (vgl. Kapitel 6.2). Da auf die Logistik zumeist ein vergleichsweise kleiner Energieeinsatz anfällt, ist die Detailgenauigkeit der Modellierung sowie die Genauigkeit der Parametrisierung des Modells auf den konkreten Anwendungsfall anzupassen. Gleiches gilt für die Stellgrößen: Sofern beispielsweise ein Gabelstapler durch optimierte Transportsteuerung etwa 20% Energie einsparen kann, dies aber nicht in weniger Ladezyklen oder erhöhter Verfügbarkeit des Staplers resultiert, ist es nicht notwendig, der Optimierung diese Stellgröße zu übertragen; zusätzliche Optimierungskomplexität kann vermieden werden. Im Fallbeispiel der Großbäckerei (vgl. Kapitel 7) wurde vorerst entsprechend auf die Modellierung der Unstetigförderer verzichtet und nur die Stetigförderer wurden abgebildet.
    - **Produktionsanlagen**: Die eigentlichen Produktionsanlagen wurden auch schon von vorhandenen Ansätzen – insbesondere Thiede, Junge, Martin – abgebildet. Der hierin entwickelte Ansatz erweitert dies mit dem hybriden Simulationsansatz noch auf die Möglichkeit der detaillierten simultanen Abbildung des thermischen-physikalischen Verhaltens von Anlagen; vgl. Anforderung 2.

- **Peripherie**: Auch die vorhandenen Ansätze konnten die Peripherie großteils abbilden – auch hier ermöglicht der entwickelte Ansatz allerdings eine detailliertere Abbildung der Interaktion zwischen dem diskreten und thermisch-physikalischen Verhalten des Equipments, für eine bei Bedarf realistischere Abbildung.

- **Anforderung 2 – Berücksichtigung der Interaktion zwischen Materialfluss und Energiesystem:** Alle vorhandenen Ansätze konnten, aufgrund der schwachen Kopplung der Simulationsabbildungen des Energiesystems und des diskreten Materialflusssystems, die Wirkbeziehungen nur ungenau nachbilden. Der vorhandene Ansatz, mit seiner neuartigen hybriden Simulation (vgl. 6.1.2), kann bei Bedarf ein sehr realitätsnahes Verhalten des Produktionssystems und aller seiner Bestandteile abbilden. Es ist wichtig zu betonen, dass eine detailliertere Abbildung mit höherer Komplexität der Simulation und damit höherem Rechenzeitaufwand für die Planungsoptimierung einhergeht. Daher ist es auch hier wichtig, bei der Anwendung der Methode auf konkrete Anwendungsfälle, ein der gewünschten Planungsaussage entsprechendes Modellierungs-Detailniveau zu wählen.
- **Anforderung 3 – Planung und Steuerung der Methode umfasst als Stellgrößen das gesamte Produktionssystem inklusive der Peripherie der Produktionsanlagen:** Die meisten bezüglich der Simulationsabbildung am weitesten fortgeschrittenen Ansätze, wie bspw. Thiede's, enthalten keine automatisierte Planungsoptimierung, während Rager's Ansatz zwar eine Optimierung beinhaltet, allerdings werden die Peripherie und auch die Ansteuerung der Produktionsanlagen nicht berücksichtigt. Der hierin entwickelte Ansatz beinhaltet als Stellgrößen sowohl die Produktionsplanung und –steuerung im Sinne einer Auftragsterminierung und –sequenzierung, wie auch eine Ansteuerung beliebiger Aggregate in der Peripherie. Auch hier gilt, wie in Kapitel 6.3 beschrieben, dass mehr Stellgrößen zu einer erheblichen Erschwerung der Optimierungsaufgabe führen.
- **Anforderung 4 – Beinhalten einer Planungsoptimierungsfunktion:** Eine echte Optimierungsfunktion für die Planung haben nur der Ansatz von Rager sowie die rein optimierungsbasierten Ansätze geboten – dies allerdings mit stark vereinfachten Abbildungen des Produktionssystems. Der vorliegende Ansatz verbindet die bei Bedarf sehr detaillierte, realitätsnahe, simulatorische Abbildung des Produktionssystems, mit einer umfassenden Planungsoptimierung. Wie in Kapitel 6.3.4 und Kapitel 7.3 beschrieben, ist die Komplexität der Optimierungsaufgabe für Planungsoptimierungen in der Praxis ein limitierender Faktor für die Anwendbarkeit der Methode. Hier ist sowohl in der Modellierung eine gute Abstimmung des notwendigen

Detailgrades auf die gewünschte Planungsaussage erforderlich, wie auch eine zukünftige Weiterentwicklung der Methode – insbesondere des Optimierungsmoduls – und ihrer Software-Implementierung, für eine verbessere Berechnungsleistung (vgl. Kapitel 9).

- **Anforderung 5 – Anwendbarkeit in der Unternehmenspraxis:**
  - **Anpassungsfähigkeit auf neue Anwendungsfälle:** Die Anwendbarkeit auf neue Anwendungsfälle wird wesentlich durch den Anpassungsaufwand in der Modellierung und Adaption auf konkrete neue Produktionssysteme und ihre Zielsysteme bestimmt. Die der entwickelten Methode ähnlichsten Ansätze – z.B. Thiede – haben aufgrund der Co-Simulation im Kern einen komplexen Modellaufbau. Für jeden neuen Anwendungsfall müssen alle Teilmodelle neu angepasst werden – dies kann ggf. noch aus vorhanden Objekten und Modellbibliotheken erfolgen – und daraufhin neu verknüpft werden. Dadurch wird die Modellierung sehr aufwändig und die Wiederverwendbarkeit von Modellen und Modellbestandteilen ist begrenzt. Die im vorliegenden Ansatz entwickelte Methode, mit ihrer objektorientierten hybriden Simulation im Kern kann alle Vorteile der objektorientierten Simulation nutzen: Modellbestandteile können in Objektbibliotheken abgelegt und wiederverwendet bzw. angepasst werden. Dadurch wird die Anwendung der Methode bezüglich des Anpassungsaufwands vereinfacht.
  - **Anwendbarkeit:** Die vorhandenen Ansätze wurden jeweils als Konzept ausgeführt und haben jeweils einen oder mehrere Anwendungsfälle enthalten, die allerdings vereinfachte, isolierte Studien darstellen. Die in Kapitel 7 vorgestellte Anwendung der entwickelten Methode auf den Fall einer industriellen Großbäckerei, inklusive der Nutzung einer von einem Implementierungspartner erstellten Software-Implementierung der Methode, kann dagegen schon für eine realistische Potentialabschätzung der Methodennutzung in der Praxis genutzt werden. Auch dieser Entwicklungsstand ist noch deutlich entfernt von einem operativen Einsatz in der täglichen Planung, allerdings bietet gerade die Zusammenarbeit mit dem Implementierungspartner im Forschungsprojekt eine gute Chance, die Praxistauglichkeit der Methode im weiteren Projektverlauf noch zu verbessern.

In diesem Abschnitt konnte dargestellt werden, dass die entwickelte Methode in allen ermittelten Anforderungs-Kategorien einen Weiterentwicklungsschritt gegenüber bestehenden Ansätzen repräsentiert. Die Anforderungen haben direkten Bezug zur

Forschungsfrage (vgl. Kapitel 5), so dass auch die Forschungsfrage beantwortet werden kann: Die entwickelte Planungsmethode, basierend auf einer hybrid-simulationsbasierten Optimierung ist für die Produktionsplanung und Steuerung mit Einbeziehung der Energieeffizienz in das Zielsystem geeignet. Die Logistik, das Gesamtsystem, inklusive Peripherie und das Energiesystem, werden berücksichtigt und auch eine Optimierung der Planung im Sinne des erweiterten Zielsystems konnte mit der multikriteriellen Optimierung adressiert werden.

Da ab der Entwicklung der Optimierung im Rahmen dieser Arbeit stärker mit dem spezifischen Use-Case der Großbäckerei gearbeitet wurde, ist die am Ende der Phase 2 der Optimierungs-Entwicklung – aus dem Tuning – hervorgegangene Methode in der optimierten Form nur für den Anwendungsfall einer Großbäckerei gültig. Die entwickelte Grundform des Optimierungsmoduls, mit dem Genetischen Algorithmus im Kern, ist aber für verschiedene Anwendungsfälle gültig. Auch die Prinzipien des getunten Optimierungsmoduls, bspw. das Kontrahieren von Betriebszeiträumen im Rahmen der Optimierung, sind auf alle funktional ähnlichen Produktionsanlagen übertragbar. Ähnlich verhält es sich mit den konkret in den Use-Cases entwickelten Simulationsmodellen: Im Rahmen der Entwicklung sind zunächst Modelle für die vorliegenden Use-Cases – insgesamt fünf, wie eingangs beschrieben – entstanden. Diese können übernommen werden und gegebenenfalls in ihren Eigenschaften leicht angepasst werden, um Modelle für andersartige Anlagen in anderen Anwendungsfällen zu erhalten. Durch die objektorientierte Simulation und Großteils auch damit verbundene modulare Optimierung, können somit die bislang entwickelten Modelle wiederverwendet und ggf. angepasst werden und zu neuartigen Modellen anderer Produktionssysteme adaptiert werden. Sowohl in der Simulationsmodellierung wie auch in der Optimierungs-Modellierung kann dies aber, je nach Charakteristik und Andersartigkeit neuer Anwendungsfälle, einen gewissen Aufwand nach sich ziehen und ggf. auch die Berücksichtigung neuer Optimierungsprinzipien, z.B. für eine andersartige gezielte Suche, erfordern. Gegenüber Methoden mit Co-Simulation und damit in der Regel verbundenen nicht einheitlichen Sub-Systemgrenzen der Teilmodelle, bietet die entwickelte Methode eine erhebliche Aufwandsersparnis in der Modellierung. Gegenüber Methoden ohne Simulation steht die deutlich höhere Planungsgenauigkeit und das höhere Optimierungspotential, dass sich durch die nun mögliche integrierte Betrachtung von Materialfluss- und Energiesystem ergibt.

9 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Eine wesentliche Anforderung an die Planungsmethode ist die Praxisanwendbarkeit bzw. der durch sie entstehende Praxisnutzen. Hierfür ist besonders in der Fallstudie (vgl. Kapitel 7) deutlich geworden, dass die Rechenzeit der Optimierung bzw. der Ausführung der Planungsmethode entscheidend ist. Die vorliegende Arbeit hatte nicht die Implementierung der Methode zum Ziel, obgleich sie teilweise begleitend und im diese Arbeit umgebenden Forschungsprojekt schon erfolgt ist. Im Zuge der Forschungsarbeit wird in einer nächsten Iteration der Methoden-Implementierung das Optimierungsmodul in die bestehende Software-Implementierung integriert, die bereits die hybride Simulation umfasst. Dadurch wird eine deutliche Steigerung der Optimierungsleistung erwartet, insbesondere auch durch die Möglichkeit der Multikernnutzung (vgl. Kapitel 7.3). Die Optimierungsmethode soll in der Folge ebenfalls weiterentwickelt werden: Die Tuning-Maßnahmen für die Optimierung, inklusive der Nutzung eines Produktionsplan-Generators, erfordern aktuell für jeden neuen Anwendungsfall eine fallspezifische Adaption, ähnlich, wie sie in Kapitel 7.2 erfolgt ist. Obwohl auch hier schon eine Wiederverwendung und Adaption bestehender Optimierungsmodule für die Fallstudien möglich ist, steht dies dennoch der Modellierungs-Einfachheit der objektorientierten Simulation mit dem Modul- bzw. Bausteinprinzip entgegen. Hier wird im Projekt daher an einer Verallgemeinerung der Tuning-Elemente gearbeitet, damit auch die Optimierung leichter und unter Verwendung von parametrisierbaren Bausteinen genutzt werden kann. Auch bezüglich der Fallstudien-Anwendung wird daran gearbeitet, den aktuellen Fall zu erweitern: Bislang wird die Peripherie, vor allem die TGA zwar simuliert und dadurch in ihrer Wechselwirkung mit dem Gesamt-Produktionssystem erfasst. Allerdings sind derzeit noch keine TGA-bezogenen Stellgrößen für die Planungsoptimierung enthalten. In der nächsten Iteration der Anwendungsstudie werden TGA bezogene Stellgrößen integriert, bspw. die variable Priorisierung der bedarfsgerechten Nutzung mehrerer Kältemaschinen in einem Kältenetz oder die Variation der Regeltemperatur von Kälte- oder Wärmespeichern. Hierdurch kann das Optimierungspotential des Gesamtsystems vergrößert werden. Auch ein Anwendungsfall mit komplexerer Logistik als das aktuell abgebildete System einer variantenreichen Serienfertigung, bspw. eine Werkstattfertigung, sind Anwendungsstudien, die mit der entwickelten Methode erfolgen sollten, um für eine möglichst große Bandbreite an Anwendungsfällen, Modellbibliotheken und Modellbestandteile bereithalten zu können.

Eine weitere Weiterentwicklung liegt im Planungshorizont der Methode: Bislang wird der klassische PPS/MES-Planungshorizont von einem oder wenigen Tagen

abgedeckt. Eine starke Vergrößerung des Optimierungspotentials ließe sich erreichen, wenn nicht nur die Produktionsterminierung und –sequenzierung sowie die Ansteuerung aller relevanten Aggregate optimiert würde, sondern auch die Produktionsmengen von der Optimierung selbstständig, angepasst an die Absatz- bzw. Bedarfsdaten, gewählt werden könnten. Mit dem derzeitigen kurzen Planungshorizont ist dies nicht sinnvoll möglich, da die Optimierung beispielsweise im Fall der Industriebäckerei das Lager „leeräumen“ würde, aufgrund der fehlenden Vorausschau, dass aufgrund fehlender Produktionskapazität in Anbetracht zukünftiger Absatzmengen, eigentlich ein gewisser Lagerstand notwendig wäre. Hierfür ist es notwendig, der Optimierung eine längerfristige Planungsperspektive zu ermöglichen – dafür wiederum muss die Planungsmethode angepasst werden, denn die detaillierte, hybride Simulation kann die langfristigen Zeiträume aufgrund fehlender Rechenleistung nicht umsetzen. Eine Lösungsmöglichkeit ist die Kopplung bzw. Integration an eine grobe Langfristvorschau und die Umsetzung einer Produktionsglättung, zusätzlich zur PPS-Optimierung.

Die aktuelle Methode hat die Energieeffizienz in das Zielsystem der Planung integriert. Im Kontext des weiteren Begriffs der nachhaltigen Produktion ist, neben dem Energieeinsatz, auch der Verbrauch von Ressourcen, wie z.B. Wasser oder begrenzter Rohstoffe, zu minimieren (vgl. Thiede et al. 2016). Die Gesamtressourceneffizienz könnte also in das Zielsystem der Planungsoptimierung integriert werden.

Eine weitere Möglichkeit, die aktuelle Limitation der Methode in Bezug auf die begrenze Rechenleistung zu adressieren ist die Entwicklung in Richtung einer aktuell schnell Fortschritte machenden Forschungsdisziplin (vgl. Wang et al. 2016): die künstliche Intelligenz (AI), mit ihren Ansätzen, wie Deep-Learning, Neural Networks oder Machine-Learning (vgl. Schmidhuber 2015; Bengio 2009). Algorithmen der künstlichen Intelligenz könnten genutzt werden (vgl. Deng 2013), um Modellbildung für Planungsmethoden zumindest teilweise zu automatisieren und um die Optimierung der Planung zu beschleunigen.

10 Literaturverzeichnis

Abele, Eberhard; Braun, Steffen; Schraml, Philipp (2015): Holistic Simulation Environment for Energy Consumption Prediction of Machine Tools. In *Procedia CIRP* 29, S. 251–256. DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.059.

Alhourani, Farouq; Saxena, Umesh (2009): Factors affecting the implementation rates of energy and productivity recommendations in small and medium sized companies. In *Journal of Manufacturing Systems* 28 (1), S. 41–45. DOI: 10.1016/j.jmsy.2009.04.001.

Andreassi, L.; Ciminelli, M. V.; Feola, M.; Ubertini, S. (2009): Innovative method for energy management. Modelling and optimal operation of energy systems. In *Energy and Buildings* 41 (4), S. 436–444. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.11.010.

Banks, Jerry (Ed.) (1998): Handbook of simulation. Principles, methodology, advances, applications, and practice. Knovel (Firm). New York, S.l.: Wiley; Co-published by Engineering & Management Press. Available online at http://dx.doi.org/10.1002/9780470172445.

Behl, Madhur; Jain, Achin; Mangharam, Rahul (2016): Data-Driven Modeling, Control and Tools for Cyber-Physical Energy Systems, 1/20/2016. Available online at http://arxiv.org/pdf/1601.05164.

Bengio, Y. (2009): Learning Deep Architectures for AI. In *FNT in Machine Learning* 2 (1), S. 1–127. DOI: 10.1561/2200000006.

Bokranz, Rainer; Landau, Kurt (2012): Handbuch Industrial Engineering. Produktivitätsmanagement mit MTM. 2., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.

Bonneville, Eric; Rialhe, Anne (2006): Good practice for energy efficiency in industry. In *Efficiency & Ecodesign*.

Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S. (2011): Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele: Springer Berlin Heidelberg. Available online at https://books.google.at/books?id=L4whBAAAQBAJ.

Bunse, Katharina; Vodicka, Matthias; Schönsleben, Paul; Brülhart, Marc; Ernst, Frank O. (2011): Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. In *Journal of Cleaner Production* 19 (6-7), S. 667–679. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.11.011.

Busch, Axel (Ed.) (2002): Integriertes Supply Chain Management. Theorie und Praxis effektiver unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler.

Buzacott, John A. (2010): Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Konzepte und integrative Entwicklungen. München: Oldenbourg (Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre).

Cannata, Alessan; Karnouskos, Stamatis; Taisch, Marco: Energy efficiency driven process analysis and optimization in discrete manufacturing. In : IECON 2009 - 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON). Porto, Portugal, S. 4449–4454.

Chow, Alex Chung Hen; Zeigler, Bernard P. (1996): Parallel DEVS: A parallel, hierarchical, modular modeling formalism and its distributed simulator. In *TRANSACTIONS of the Society for Computer Simulation* 13 (2), S. 55–68.

Claus, Thorsten; Herrmann, Frank; Manitz, Michael (Eds.) (2015): Produktionsplanung und -steuerung. Forschungsansätze, Methoden und deren Anwendungen. Berlin: Springer Gabler. Available online at http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-43542-7.

Claus, Volker (2003): Duden Informatik. Ein Fachlexikon für Studium und Praxis. [Neuaufl.]. Mannheim, Wien u.a.: Dudenverl.

D’Atri, Alessandro; Casalino, Nunzio; Marco, Marco (2008): Interdisciplinary Aspects of Information Systems Studies. The Italian Association for Information Systems. Heidelberg: Physica-Verlag Heidelberg. Available online at http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7908-2010-2.

Dai, Min; Tang, Dunbing; Giret, Adriana; Salido, Miguel A.; Li, W. D. (2013): Energy-efficient scheduling for a flexible flow shop using an improved genetic-simulated annealing algorithm. In *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 29 (5), S. 418–429. DOI: 10.1016/j.rcim.2013.04.001.

Dangelmaier, Wilhelm (2009): Theorie der Produktionsplanung und -steuerung. Im Sommer keine Kirschpralinen? Berlin u.a.: Springer (VDI-Buch).

Deatcu, Christina; Pawletta, Thorsten: A Qualitative Comparison of Two Hybrid DEVS Approaches.

Deng, Li (2013): Deep Learning. Methods and Applications. In *FNT in Signal Processing* 7 (3-4), S. 197–387. DOI: 10.1561/2000000039.

Deutsche MTM-Vereinigung e.V (2006): Handbuch MTM-Logistik. Hamburg.

Dietmair, Anton; Verl, Alexander: Energy consumption modeling and optimization for production machines. In : 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET). Singapore, Singapore, S. 574–579.

Dietmair, Anton; Verl, Alexander (2009): A generic energy consumption model for decision making and energy efficiency optimisation in manufacturing. In *International Journal of Sustainable Engineering* 2 (2), S. 123–133. DOI: 10.1080/19397030902947041.

1994: DIN ISO 5053:1987, Kraftbetriebene Flurförderzeuge.

Dubois, Anna; Gadde, Lars-Erik (2002): Systematic combining. An abductive approach to case research. In *Journal of Business Research* 55 (7), S. 553–560. DOI: 10.1016/S0148-2963(00)00195-8.

Duflou, Joost R.; Sutherland, John W.; Dornfeld, David; Herrmann, Christoph; Jeswiet, Jack; Kara, Sami et al. (2012): Towards energy and resource efficient manufacturing. A processes and systems approach. In *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61 (2), S. 587–609. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.05.002.

E-Control_01: Der kurzfristige physische Stromhandel in Österreich. Vermarktungsmöglichkeiten, Marktkonzentration und Wirkungsmechanismen. Betrachtungszeitraum: 2012-2013, Datenstand: 01.07.2014. Available online at https://www.e-control.at/documents/20903/-/-/3abbd7d1-f502-454a-bf4a-8fac08e4aebc, checked on 8/16/2016.

E-Control_02: Stromkennzeichnungsbericht (2015). Available online at https://www.e-control.at/publikationen/oeko-energie-und-energie-effizienz/berichte/stromkennzeichnungsbericht, checked on 8/16/2016.

E-Control_05 (2012): Sonstige Marktregeln Strom. Available online at https://www.e-control.at/recht/marktregeln/sonstige-marktregeln-strom, checked on 8/16/2016.

E-Control_06 (2017): Preiszusammensetzung [Elektrizität für Industrieverbraucher]. Stand 01.01.2017. Available online at https://www.e-control.at/industrie/strom/strompreis/preiszusammensetzung, updated on 10/1/2017.

Eiben, A. E.; Smith, J. E. (2015): Introduction to evolutionary computing. 2nd ed. Berlin: Springer (Natural Computing Series). Available online at http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-44874-8.

EPEX SPOT (2017): Marktdaten Day-Ahead-Auktion. Börse für Stromspotmärkte. Available online at https://www.epexspot.com/de/marktdaten/dayaheadauktion/auction-table/, updated on 6/8/2017.

Erlach, Klaus; Westkämper, Engelbert (Eds.) (2009): Energiewertstrom. Der Weg zur energieeffizienten Fabrik. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung. Stuttgart: Fraunhofer Verl.

European Energy Exchange (EEX) (2017): European Emission Allowances | Global Environmental Exchange. Preis in EUR/tCO2. Available online at https://www.eex.com/de/marktdaten/umweltprodukte/spotmarkt/european-emission-allowances#!/, updated on 4/7/2017.

Evers, Karsten (2002): Simulationsgestützte Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage. Univ., Diss.--Hannover. [Elektronische Ressource]. Hannover: Universitätsbibliothek u. Technische Informationsbibliothek. Available online at http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dh01/345691490.pdf.

Fang, Kan; Uhan, Nelson; Zhao, Fu; Sutherland, John W. (2011): A New Shop Scheduling Approach in Support of Sustainable Manufacturing. In Jürgen Hesselbach, Christoph Herrmann (Eds.): Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd - 4th, 2011. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 305–310.

Flick, Dominik (2016): Roadmap für betriebliches Energiemanagement - Opel. München, 2/16/2016.

Fuss, Emanuel (2009): Energieeffizienzorientierte Fabrikplanung (eFAP), Ingenieurwissenschaften - Wirtschaftsingenieurwesen, GRIN, checked on 1/22/2016.

Gerhard, Detlef (2015): Integrating Electric Energy Demand of Machine Tool Processes as Resource for Production Planning Software. In Madjid Fathi (Ed.): Integrated Systems: Innovations and Applications. Cham: Springer International Publishing, S. 29–38. Available online at https://doi.org/10.1007/978-3-319-15898-3_2.

Giacone, E.; Mancò, S. (2012): Energy efficiency measurement in industrial processes. In *Energy* 38 (1), S. 331–345. DOI: 10.1016/j.energy.2011.11.054.

Glover, Fred (1986): Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. In *Computers & Operations Research* 13 (5), S. 533–549. DOI: 10.1016/0305-0548(86)90048-1.

Goldberg, David E.; Holland, John H. (1988). In *Machine Learning* 3 (2/3), S. 95–99. DOI: 10.1023/A:1022602019183.

Graßl, Hartmut (2003): Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit. Berlin: Springer.

Gummerer, Christian; Wibke, Tritthart; Susanne, Geissler (2000): EDV-unterstützte Gebäudesimulation. Optimization of Solar Energy Use in Large Buildings. Langfassung - im Auftrag des Bundesministeriums für Wissenschaft und Verkehr - IEA TASK 23. Wien.

Haag, Holger (2013): Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion. Univ., Diss.--Stuttgart, 2013. Stuttgart: Fraunhofer Verlag (Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 11).

Haag, Holger; Siegert, Jörg; Bauernhansl, Thomas; Westkämper, Engelbert (2012): An Approach for the Planning and Optimization of Energy Consumption in Factories Considering the Peripheral Systems: Springer Berlin Heidelberg.

Hansen, Hans Robert; Neumann, Gustaf (2009): Wirtschaftsinformatik. 10., völlig neu bearb. und erw. Aufl. Stuttgart: Lucius & Lucius (UTB Wirtschaftswissenschaften, 2669).

He, Yan; Li, Yufeng; Wu, Tao; Sutherland, John W. (2015): An energy-responsive optimization method for machine tool selection and operation sequence in flexible

machining job shops. In *Journal of Cleaner Production* 87, S. 245–254. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.10.006.

Heilala, Juhani; Vatanen, Saija; Tonteri, Hannele; Montonen, Jari; Lind, Salla; Johansson, Björn; Stahre, Johan (2008): Simulation-based sustainable manufacturing system design: IEEE.

Heinzl, Bernhard; Kastner, Wolfgang; Leobner, Ines; Dur, Fabian; BLEICHER, Friedrich; Kovacic, Iva: Using coupled simulation for planning of energy efficient production facilities. In : 2014 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES). Berlin, Germany, S. 1–6.

Herrmann, C.; Thiede, S.; Kara, S.; Hesselbach, J. (2011): Energy oriented simulation of manufacturing systems – Concept and application. In *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60 (1), S. 45–48. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.127.

Herrmann, Christoph; Thiede, Sebastian (2009): Process chain simulation to foster energy efficiency in manufacturing. Life Cycle Engineering. In *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 1 (4), S. 221–229. DOI: 10.1016/j.cirpj.2009.06.005.

Hertz, Alain; Widmer, Marino (2003): Guidelines for the use of meta-heuristics in combinatorial optimization. In *European Journal of Operational Research* 151 (2), S. 247–252. DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00823-8.

Hesselbach, Jens (2012): Energie- und klimaeffiziente Produktion. Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele. 1. Aufl. s.l.: Vieweg+Teubner (GWV). Available online at http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=885626.

Hinterstocker, Michael; Salvamoser, Simon; Roon, Serafin von; Berner, David; Staats, Joachim; Bruce-Boye, Cecil: Dynamische Korrektur der Lastprognose von Haushaltskunden mittels kurzzyklischer Smart-Meter-Daten.

Hopf, Hendrik (2016): Methodik zur Fabriksystemmodellierung im Kontext von Energie- und Ressourceneffizienz. In : Methodik zur Fabriksystemmodellierung im Kontext von Energie- und Ressourceneffizienz. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 61–141. Available online at http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-11599-9_4.

Imgrund, Christian (2016): Ganzheitliche Ansätze und Methoden zur nachhaltigen Neuplanung einer energieeffizienten Automobilfabrik - BMW. München, 2/16/2016.

Johansson, Björn; Kacker, Raghu; Kessel, Rüediger; McLean, Charles; Sriram, Ram: Utilizing Combinatorial Testing on Discrete Event Simulation Models for Sustainable Manufacturing. In : ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. San Diego, California, USA, August 30–September 2, 2009, S. 1095–1101.

Junge, Mark (2007): Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Univ., Diss.--Kassel, 2007. Kassel: Kassel Univ. Press (Produktion & Energie, 1). Available online at http://d-nb.info/989831884/34.

Kals, Johannes (2015): ISO 50001 energy management systems. What managers need to know about energy and business management. New York, NY: Business Expert Press (Environmental and social sustainability for business advantage collection).

Kantorovič, Leonid Vital'evič (1960): Mathematical methods of organizing and planning production. [S.l.].

Kara, S.; Manmek, S.; Herrmann, C. (2010): Global manufacturing and the embodied energy of products. In *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (1), S. 29–32. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.004.

Kirkpatrick, Scott (1984): Optimization by simulated annealing. Quantitative studies. In *J Stat Phys* 34 (5-6), S. 975–986. DOI: 10.1007/BF01009452.

Kletti, J. (2015): MES - Manufacturing Execution System: Moderne Informationstechnologie unterstützt die Wertschöpfung: Springer Berlin Heidelberg. Available online at https://books.google.at/books?id=UYZNCwAAQBAJ.

Kurbel, Karl (1998): Produktionsplanung und -steuerung. Methodische Grundlagen von PPS-Systemen. 3., unveränd. Aufl. München [u.a.]: Oldenbourg (Handbuch der Informatik).

Law, Averill M.; Kelton, W. David (2000): Simulation modeling and analysis. 3. ed. Boston: McGraw-Hill (McGraw-Hill series in industrial engineering and management science). Available online at http://www.loc.gov/catdir/description/mh023/99052146.html.

Leimer, H. P. (2002): Thermisch-energetische Gebäudesimulation. In *Beitrag im Bauphysik-Kalender*.

Leobner, Ines; Kastner, Wolfgang; Kovacic, Iva; DÜR, Fabian; FLATZ, Thomas; PONWEISER, Karl; BLEICHER, Friedrich (2013): Interdisziplinäre Optimierungsstrategien zu Energie-effizienz in Produktionsbetrieben. In *Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 13.-15. Februar 2013*.

Li, Wen (2015): Efficiency of manufacturing processes. Energy and ecological perspectives. Cham: Springer (Sustainable production, life cycle engineering and management).

Linke, Barbara; Overcash, Michael (2012): Life Cycle Analysis of Grinding: Springer Berlin Heidelberg.

Löfgren, Birger (2009): Capturing the life cycle environmental performance of a company's manufacturing system: Chalmers University of Technology Licentiate thesis.

Martin, Lars; Hesselbach, Jens; Thiede, Sebastian; Herrmann, Christoph; Lüdemann, Bruno; Detzer, Rüdiger (2008): Energieeffizienz durch optimierte Abstimmung zwischen Produktion und technischer Gebäudeausrüstung. In *Advances in simulation for production and logistics applications Verlag: Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart*, S. 121–130.

März, Lothar; Krug, Wilfried; Rose, Oliver; Weigert, Gerald (2011): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch, 130). Available online at http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14536-0.

Mattern, Friedemann; Mehl, Horst (1989): Diskrete Simulation - Prinzipien und Probleme der Effizienzsteigerung durch Parallelisierung. In *Informatik Spektrum* 12 (4), S. 198–210.

Michalewicz, Zbigniew (Ed.) (1994): Genetic Algorithms + Data Structures. Evolution Programs. Second, Extended Edition. Berlin, Heidelberg: Springer.

Michaloski, John L.; Shao, Guodong; Arinez, Jorge; Lyons, Kevin; Leong, Swee; Riddick, Frank (2011): Analysis of sustainable manufacturing using simulation for integration of production and building service: Society for Computer Simulation International. Available online at http://dl.acm.org/ft_gateway.cfm?id=2048548&type=pdf.

Morawetz, Christian (2015): Vorgehensmodell zur Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems zur kostenoptimalen mittelfristigen Kapazitätsanpassung.

Müller, E.; Götze, U.; Fischer, S.; Veit, T.; Strauch, J.; Krönert, S. (Eds.) (2010): Auswirkungen von Lean Logistikstrategien auf energieeffiziente Fabriksysteme.

Nebl, Theodor (2011): Produktionswirtschaft. 7., vollst. überarb. und erw. Aufl. München: Oldenbourg (Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre). Available online at http://www.oldenbourg-link.com/isbn/9783486714425.

Netz Burgenland (2013): Information über unterbrechbare Stromlieferung, S. 1. Available online at http://www.netzburgenland.at/fileadmin/NB_pdf_NEU/Informationen/Information_ueber_unterbrechbare_Stromlieferung.pdf, checked on 8/17/2016.

Neugebauer, Reimund (Ed.) (2014): Handbuch ressourcenorientierte Produktion. [Elektronische Ressource]. München: Hanser (Hanser eLibrary). Available online at http://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139/9783446436237.

Nyhuis, Peter; Wiendahl, Hans-Peter (2012): Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. 3. Aufl. 2012. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch). Available online at http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-92839-3.

OIB-330.6-009/15: OIB-RICHTLINIE 6 - Energieeinsparung und Wärmeschutz. Available online at https://www.oib.or.at/sites/default/files/richtlinie_6_26.03.15.pdf.

Ōno, Taiichi; Hof, Wilfried; Stotko, Eberhard C. (1993): Das Toyota-Produktionssystem. Frankfurt/Main: Campus-Verl.

Page, B.; Wohlgemuth, V. (2010): Advances in Environmental Informatics. Integration of Discrete Event Simulation Methodology with ecological Material Flow Analysis for Modelling eco-efficient Systems. In *Procedia Environmental Sciences* 2, S. 696–705. DOI: 10.1016/j.proenv.2010.10.079.

Patterson, Murray G. (1996): What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. In *Energy policy*.

Peffers, Ken; Tuunanen, Tuure; Rothenberger, Marcus A.; Chatterjee, Samir (2007): A design science research methodology for information systems research. In *Journal of management information systems* 24 (3), S. 45–77.

Petri, Christian (2007): Ablaufplanung bei Reihenfertigung mit mehrfacher Zielsetzung auf der Basis von Ameisenalgorithmen: Passau.

Pochet, Yves; Wolsey, Laurence A. (2006): Production Planning by Mixed Integer Programming. New York, NY: Springer Science+Business Media Inc (Springer Series in Operations Research and Financial Engineering). Available online at http://dx.doi.org/10.1007/0-387-33477-7.

Popper, Niki; Hafner, I.; Rössler, M.; Preyser, F.; Heinzl, B.; Smolek, P.; Leobner, I. (2014): A General Concept for Description of Production Plants with a Concept of Cubes. In *Simulation Notes Europe* 24 (2), S. 105–114.

Preyser, Franz; Hafner, Irene; Rößler, Matthias: Implementation of Hybrid Systems Described by DEV&DESS in the QSS Based Simulator PowerDEVS. In *SNE*, S. 109.

Rabe, Markus; Spiekermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch). Available online at http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-35282-2.

Rager, Markus (2008): Energieorientierte Produktionsplanung: Analyse, Konzeption und Umsetzung: Springer-Verlag.

Rahimifard, S.; Seow, Y.; Childs, T. (2010): Minimising Embodied Product Energy to support energy efficient manufacturing. In *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (1), S. 25–28. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.048.

Raich, Philipp; Heinzl, Bernhard; Preyser, Franz; Kastner, Wolfgang: Modeling techniques for integrated simulation of industrial systems based on hybrid PDEVS. In : 2016 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES). Vienna, Austria, S. 1–6.

REFA (1991): Planung und Steuerung Teil 3. 1. Aufl. München: Hanser (Methodenlehre der Betriebsorganisation).

Reinhard (2015): PowerPoint-Präsentation, checked on 2/16/2016.

Rogelj, Joeri; den Elzen, Michel; Höhne, Niklas; Fransen, Taryn; Fekete, Hanna; Winkler, Harald et al. (2016): Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. In *Nature* 534 (7609), S. 631–639. DOI: 10.1038/nature18307.

Roon, Serafin von; Huck, Malte (2010): Merit Order des Kraftwerkparks. In *Forschungsstelle für Energiewirtschaft eV*.

Sachverständigenrat für Umweltfragen: Weichenstellungen für eine nachhaltige Stromversorgung. Available online at http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/06_Hintergrundinformationen/2009_Thesen_Weichenstellungen_Stromversorgung_Hohmeyer.html;jsessionid=1AE3EA6D1BFBA9F8C3DFDA87678DCE60.1_cid335, checked on 8/16/2016.

Schenk, Michael; Wirth, Siegfried; Müller, Egon (2014): Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch). Available online at http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-05459-4.

Schmidhuber, Jurgen (2015): Deep learning in neural networks: an overview. In *Neural networks : the official journal of the International Neural Network Society* 61, S. 85–117. DOI: 10.1016/j.neunet.2014.09.003.

Schmidt, T.; Schulze, F. (2011): Simulationsbasierte Entwicklung energieeffizienter Steuerungsstrategien für Materialflusssysteme. In *Logistics Journal* 2192 (9084), S. 1.

Schnorrenberg, Burkhard (2006): Zur Preisbildung von Forwardkontrakten im Strommarkt. Eine empirische Untersuchung des deutschen Strom-Terminmarktes. Univ., Diss.--Köln, 2005. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden (Gabler Edition Wissenschaft Schriften zum europäischen Management). Available online at http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=751318.

Schönemann, Malte; Schmidt, Christopher; Herrmann, Christoph; Thiede, Sebastian (2016): Multi-level Modeling and Simulation of Manufacturing Systems for Lightweight Automotive Components. In *Procedia CIRP* 41, S. 1049–1054. DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.063.

Schröter, Marcus; Weißfloch, Ute; Buschak, Daniela (2009): Energieeffizienz in der Produktion: Wunsch oder Wirklichkeit: na.

Schuh, Günther (2007): Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung Und Konzepte. Dordrecht: Springer (VDI-Buch). Available online at http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=416991.

Schulz, Detlef (Ed.) (2015): Nachhaltige energieversorgung und integration von Speichern. Tagungsband zur NEIS 2015. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg. Available online at http://lib.myilibrary.com/detail.asp?id=888476.

Selzam, Patrick (2013): Strompreisoptimierung. Software „intergia - Strompreisoptimierung“ Version 1.1 - Handbuch 1. Auflage, S. 13, checked on 8/17/2016.

Seow, Y.; Rahimifard, S. (2011): A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems. Production Networks Sustainability. In *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 4 (3), S. 258–264. DOI: 10.1016/j.cirpj.2011.03.007.

Shi, Leyuan; Ólafsson, Sigurdur (2000): Nested Partitions Method for Global Optimization. In *Operations Research* 48 (3), S. 390–407. DOI: 10.1287/opre.48.3.390.12436.

Shrouf, Fadi; Ordieres-Meré, Joaquin; García-Sánchez, Alvaro; Ortega-Mier, Miguel (2014): Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs. In *Journal of Cleaner Production* 67, S. 197–207. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.12.024.

Sivanandam, S. N.; Deepa, S. N. (2007): Introduction to genetic algorithms: Springer Science & Business Media.

Sobottka, Thomas; Kamhuber, Felix; Sihn, Wilfried (2017): Increasing Energy Efficiency in Production Environments Through an Optimized, Hybrid Simulation-based Planning of Production and Its Periphery. In *Procedia CIRP* 61, S. 440–445.

Sobottka, Thomas; Sihn, Wilfried; Edtmayr, Thomas (2014): Increasing the efficiency of closed loops of reusable containers in production environments concerning container cleaning. In *Acta Technica Corviniensis = Bulletin of Engineering* 7 (Nr.1), S. 101–110.

Sokolowski, John A.; Banks, Catherine M. (2012): Handbook of real-world applications in modeling and simulation. Hoboken, N.J.: Wiley (Wiley handbooks in operations research and management science).

Solding, Petter; Petku, Damir; Mardan, Nawzad (2009): Using simulation for more sustainable production systems – methodologies and case studies. In *International*

Journal of Sustainable Engineering 2 (2), S. 111–122. DOI: 10.1080/19397030902960994.

Stadtler, Hartmut; Kilger, Christoph (2000): Supply chain management and advanced planning. Concepts, models, software and case studies. Berlin: Springer.

STATISTIK AUSTRIA: Energiebilanzen. Available online at http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html, checked on 8/16/2016.

Steinaecker, J. von (1999): Kommunikationsorientiertes PPS-Konzept unterstützt Umweltorientierung und Produktionsnetzwerke. Teil 1. In *Logistik im Unternehmen* 13 (Nr.3), S. 28–30.

Thiede, S.; Bogdanski, G.; Herrmann, C. (2012): A Systematic Method for Increasing the Energy and Resource Efficiency in Manufacturing Companies. 1st CIRP Global Web Conference: Interdisciplinary Research in Production Engineering (CIRPE2012). In *Procedia CIRP* 2, S. 28–33. DOI: 10.1016/j.procir.2012.05.034.

Thiede, Sebastian (2012): Energy efficiency in manufacturing systems. Techn. Univ., Diss.--Braunschweig, 2011. Berlin: Springer (Sustainable production, life cycle engineering and management). Available online at http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy1409/2012935578-d.html.

Thiede, Sebastian (2015): Fabrik der Zukunft: intelligent und ressourceneffizient. Seminar Energieeffizienz, TU Wien/IFT, 28. Mai 2015. Wien, 5/28/2015.

Thiede, Sebastian; Herrmann, Christoph; Kara, Sami (2011): State of Research and an innovative Approach for simulating Energy Flows of Manufacturing Systems. In Jürgen Hesselbach, Christoph Herrmann (Eds.): Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd - 4th, 2011. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 335–340.

Thiede, Sebastian; Schönemann, Malte; Kurle, Denis; Herrmann, Christoph (2016): Multi-level simulation in manufacturing companies. The water-energy nexus case. In *Journal of Cleaner Production* 139, S. 1118–1127. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.08.144.

Thiede, Sebastian; Seow, Yingying; Andersson, Jon; Johansson, Björn (2013): Environmental aspects in manufacturing system modelling and simulation—State of the art and research perspectives. In *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 6 (1), S. 78–87. DOI: 10.1016/j.cirpj.2012.10.004.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2017): Historic Paris Agreement on Climate Change. Available online at http://newsroom.unfccc.int/unfccc-newsroom/finale-cop21/, updated on 4/6/2017.

Uslar, Mathias; Specht, Michael; Dänekas, Christian; Trefke, Jörn; Rohjans, Sebastian; González, José M. et al. (2013): Standardization in smart grids. Introduction to IT-Related Methodologies, Architectures and Standards. Berlin, Heidelberg: Springer (Power Systems). Available online at http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-34916-4.

2008: VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1.

Voß, Stefan; Martello, Silvano; Osman, Ibrahim H.; Roucairol, Catherine (2012): Meta-heuristics: Advances and trends in local search paradigms for optimization: Springer Science & Business Media.

Wang, Fei-Yue; Zhang, Jun Jason; Zheng, Xinhu (2016): Where does AlphaGo go. From church-turing thesis to AlphaGo thesis and beyond. In *IEEE/CAA J. Autom. Sinica* 3 (2), S. 113–120. DOI: 10.1109/JAS.2016.7471613.

Weinert, Nils; Chiotellis, Stylianos; Seliger, Günther (2011): Methodology for planning and operating energy-efficient production systems. In *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60 (1), S. 41–44. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.015.

Weinert, Nils; Seliger, Günther (Eds.) (2010): Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme. Techn. Univ., Diss.--Berlin, 2010. Stuttgart: Fraunhofer-Verl. (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin).

Wenzel, Sigrid (1998): Verbesserung der Informationsgestaltung in der Simulationstechnik unter Nutzung autonomer Visualisierungswerkzeuge. Dortmund: Verl. Praxiswissen (Unternehmenslogistik).

Westkämper, Engelbert; Decker, Markus (2006): Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch). Available online at http://dx.doi.org/10.1007/3-540-30764-8.

Wohlgemuth, Volker; Page, Bernd; Kreutzer, Wolfgang (2006): Combining discrete event simulation and material flow analysis in a component-based approach to industrial environmental protection. In *Environmental Modelling & Software* 21 (11), S. 1607–1617. DOI: 10.1016/j.envsoft.2006.05.015.

Zäpfel, Günther; Braune, Roland (2005): Moderne Heuristiken der Produktionsplanung. Am Beispiel der Maschinenbelegung. München: Vahlen (WiSo-Kurzlehrbücher Reihe Betriebswirtschaft).

Zeigler, Bernard P. (1976): Theory of modelling and simulation. New York: Wiley (A Wiley-Interscience publication).

Zeigler, Bernard P.; Praehofer, Herbert; Kim, Tag Gon (2007): Theory of modeling and simulation. Integrating discrete event and continuous complex dynamic systems. 2. ed., [Nachdr.]. Amsterdam: Acad. Press.

Zeugmann, Thomas; Poupart, Pascal; Kennedy, James; Jin, Xin; Han, Jiawei; Saitta, Lorenza et al. (2011): Particle Swarm Optimization. In Claude Sammut, Geoffrey I. Webb (Eds.): Encyclopedia of machine learning. With 78 tables. New York, NY: Springer (Springer reference), S. 760–766.