

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

SEBASTIAN WECKMANN

Dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung der Produktion



Universität Stuttgart



Fraunhofer

IPA

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG BAND 116

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl

Univ.-Prof. a.D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Sebastian Weckmann

Dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung der Produktion

FRAUNHOFER VERLAG

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11/970-11 01
info@ipa.fraunhofer.de; www.ipa.fraunhofer.de

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl^{1,2}

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke^{1,4}

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber^{1,2}

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer^{1,5}

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Ver³

Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper^{1,2}

¹Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

²Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart

³Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart

⁴Institut für Photovoltaik (IPV) der Universität Stuttgart

⁵Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart

Titelbild: © metamorworks – stock.adobe.com

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-8396-1660-4

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2020

Druck: Mediendienstleistungen des Fraunhofer-Informationszentrums Raum und Bau IRB, Stuttgart
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© FRAUNHOFER VERLAG, 2020

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Postfach 800469, 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon 0711 970-2500

E-Mail verlag@fraunhofer.de

URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung der Produktion

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Sebastian Weckmann
aus Duisburg

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Tag der mündlichen Prüfung: 15.07.2020

Institut für Energieeffizienz in der Produktion der Universität Stuttgart

2020

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Energieeffizienz in der Produktion der Universität Stuttgart (EEP) und des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer, dem Leiter des Instituts für Energieeffizienz in der Produktion und des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, für die fachliche Förderung meiner Arbeit und darüber hinaus für die vertrauensvolle sowie motivierende Zusammenarbeit. Bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele, dem ehemaligen Leiter des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen PTW der Technischen Universität Darmstadt, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferats und der wissenschaftlichen Begleitung der Arbeit herzlich bedanken. Für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. Siegfried Schmauder, dem Leiter der Abteilung Multiskalensimulation am Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre der Universität Stuttgart.

Darüber hinaus danke ich allen Kollegen des EEPs und des Fraunhofer IPAs, die mich begleitet und bei meiner Arbeit unterstützt haben. Mein Dank gilt insbesondere Herrn Ekrem Köse, Herrn Darian Schaab, Herrn Fabian Zimmermann und Herrn Dr. Timm Kuhlmann für die kritischen und konstruktiven Diskussionen.

Herzlich bedanke ich mich bei meiner gesamten Familie für den Rückhalt und die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit. Insbesondere danke ich meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht haben, und meinen Schwiegereltern, die mich jederzeit bei der Arbeit unterstützt und motiviert haben. Ein besonderer Dank gilt meinem Vater Hans-Dieter und meinem Schwiegervater Thomas für die inhaltliche und mentale Begleitung.

Von ganzem Herzen danke ich meiner Frau Anja, meiner Tochter Lilly und meinem Sohn Tino für die bedingungslose Unterstützung, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Stuttgart, Juli 2020

Sebastian Weckmann

Kurzfassung

In der Industrie gewinnt die Frage nach einer sicheren, kostengünstigen und qualitativ hochwertigen Energieversorgung zunehmend an Bedeutung, insbesondere vor dem Hintergrund steigender und volatiler Energiepreise sowie einer zunehmend schwankenden Bereitstellung von Energie.

Vor diesem Hintergrund greift die vorliegende Arbeit die Frage auf, wie ein Produktionssystem dezentral, autonom und energieflexibel gesteuert werden kann mit dem Ziel, die Energie- und damit auch die Produktionskosten nachhaltig zu senken. Dabei soll die Auslastung des Produktionssystems und die Termintreue der Aufträge nicht (negativ) beeinflusst werden.

Im Fokus der Arbeit stehen die Produktionssteuerung und die damit verbundenen wertschöpfenden Maschinen und Anlagen sowie die bestehende energetische Infrastruktur des Produktionssystems. Die Ergebnisse der Arbeit sind ein neuartiges Steuerungssystem und effiziente Regelalgorithmen, die es erlauben, das Produktionssystem energetisch zu optimieren und damit das Produktionssystem robust, zukunftsorientiert und nachhaltig zu betreiben.

Im Rahmen von zwei untersuchten Praxisbeispielen wurden Energiekosteneinsparungen erzielt, ohne die Auslastung der Produktionssysteme oder die Termintreue der Aufträge (negativ) zu beeinflussen. Dabei zeigt sich jedoch auch, dass die kostenbezogene Transformation der prozentualen Einsparungen vom jeweilig aktuellen Energiepreishebel abhängen. Der dezentrale und anreizbasierte Charakter der Steuerung und Regelung ermöglicht es, ein selbstoptimierendes Ökosystem zu schaffen, das keine harten externen Regelungseingriffe benötigt. Damit wird ein integriertes Energie- und Produktionssystem geschaffen, das kostengünstig, robust, hochdynamisch, flexibel und nachhaltig ist.

Abstract

In industry a low-cost and high-quality energy supply is becoming more and more important, especially against the background of rising and volatile energy prices and an increasingly fluctuating supply of energy.

This work addresses the question of how a production system can be controlled in a decentralized, autonomous and energy-flexible manner with the aim of sustainably reducing energy and thus production costs. In doing so, the utilization of the production system and the adherence to delivery dates of orders should not be (negatively) influenced.

The focus of the work is on production control and the associated value-adding machinery and equipment as well as the existing energy infrastructure of the production system. The results of the work are a new type of control system and efficient control algorithms that allow the production system to be energetically optimized and thus operate the production system in a robust, future-oriented and sustainable manner.

Within the scope of two examined practical examples, energy cost savings were achieved without (negatively) affecting the capacity utilization of the production systems or the adherence to delivery dates of orders. However, it is also apparent that the cost-related transformation of the percentage savings depends on the respective current energy price level. The decentralized and incentive-based character of the control and regulation system makes it possible to create a self-optimizing ecosystem that does not require hard external regulation intervention. This creates an integrated energy and production system that is cost-effective, robust, highly dynamic, flexible and sustainable.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Problemstellung und Forschungsbedarf	5
1.3	Forschungsmethodik und wissenschaftstheoretische Positionierung	7
1.4	Zielsetzung, Forschungsfrage und Aufbau der Arbeit	9
2	Grundlagen	13
2.1	Produktionssysteme	13
2.1.1	Definition von Produktionssystemen	13
2.1.2	Automatisierungsebenen von Produktionssystemen	16
2.1.3	Energieversorgung von Produktionssystemen	18
2.2	Produktionsplanung und -steuerung	20
2.2.1	Produktionslogistik	20
2.2.2	Produktionskosten	22
2.2.3	Produktionsplanung	24
2.2.4	Produktionssteuerung	25
2.2.5	Produktionssteuerung als Regelkreis	28
2.3	Ansätze der Produktionssteuerung	30
2.3.1	Ansätze zur Klassifizierung der Produktionssteuerung	30
2.3.2	Verfahren der Auftragserzeugung und -freigabe	31
2.3.3	Verfahren der Kapazitätssteuerung	36
2.3.4	Verfahren der Reihenfolgebildung	37
2.3.5	Dezentrale und automatisierte Produktionssteuerung	38
2.4	Energieflexibilität	39
2.4.1	Definition Energieflexibilität	40
2.4.2	Energieflexibilitätsmaßnahmen	42
2.4.3	Energiewirtschaft und-versorgung	46
2.4.4	Industriestrompreis	48
2.4.5	Märkte für Energieflexibilität	51
2.5	Zwischenfazit	54
3	Stand der Forschung und Technik	56
3.1	Methodisches Vorgehen	56

3.2	Bestehende Ansätze im Untersuchungsbereich.....	57
3.2.1	Energiesensitive Produktionsplanung	57
3.2.2	Energiesensitive Produktionssteuerung	66
3.2.3	Laststeuerung	70
3.3	Zwischenfazit	74
4	Anforderungen und Handlungsbedarf	75
4.1	Anforderungsdefinition	75
4.1.1	Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich	75
4.1.2	Anforderungen an das Steuerungs- und Regelungssystem	77
4.1.3	Anforderungen an die Systemoptimierung.....	78
4.2	Einordnung bestehender Ansätze und Handlungsbedarf	79
4.2.1	Ansätze der Produktionssteuerung	79
4.2.2	Ansätze der Laststeuerung.....	82
4.2.3	Zusammenfassung und Handlungsbedarf	86
4.3	Zwischenfazit	88
5	Entwicklung einer dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung.....	90
5.1	Methodisches Vorgehen.....	90
5.2	Fachtechnisches Lösungskonzept und Systemstrukturierung.....	91
5.2.1	Netz- und Energiemanagement	92
5.2.2	Konzept eines dezentralen Netzmanagements.....	93
5.2.3	Komponenten	94
5.2.4	Kommunikationstopologie.....	95
5.2.5	Systemstrukturierung.....	97
5.3	Verfahrensentwicklung zur dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung	100
5.3.1	Eignung bestehender Produktionssteuerungsverfahren	100
5.3.2	Auftragserzeugung.....	101
5.3.3	Auftragsfreigabe	101
5.3.4	Auftragsreihenfolge.....	102
5.3.5	Kapazitätssteuerung	103
5.3.6	Materialflusssteuerung	107
5.4	Softwareentwurf der dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung.....	107

5.4.1	Verfahrensbeschreibung und Regelungsarchitektur.....	107
5.4.2	Produktionsdruck als neue Regelgröße	109
5.4.2.1	Logistische Komponente L.....	110
5.4.2.2	Energetische Einflussgröße E.....	116
5.4.2.3	Komponentengewichtung und funktionale Parametrierung	118
5.5	Zwischenfazit	121
6	Implementierung und Validierung	123
6.1	Systematischer Aufbau der Verfahrensimplementierung.....	123
6.1.1	Modellierungssoftware	124
6.1.2	Modellbildung und Systemmodell.....	125
6.1.3	Annahmen und Randbedingungen	128
6.1.4	Systemzustände.....	131
6.1.5	Szenariobildung und Parametervariation.....	131
6.1.6	Sensitivitätsanalyse und Parameteroptimierung.....	133
6.2	Automobilzulieferer Magnesiumdruckguss	134
6.2.1	Der Druckgießprozess.....	135
6.2.2	Systemmodell	141
6.2.3	Systemzustände.....	143
6.2.4	Szenariobildung und Ergebnisbewertung.....	147
6.2.4.1	Basisszenario Magnesiumdruckguss	147
6.2.4.2	Parametervariation	152
6.2.4.3	Sensitivitätsanalyse Energierferenzpreis.....	155
6.2.4.4	Sensitivitätsanalyse Mindestbetriebsdauer und Lagervolumen ..	158
6.2.4.5	Sensitivitätsanalyse Lagervolumen und Energierferenzpreis.....	160
6.2.4.6	Parameteroptimierung und Ergebnisbewertung	162
6.2.4.7	Schaltverhalten thermischer Prozesskomponenten	164
6.2.5	Fazit Automobilzulieferer Magnesiumdruckguss	165
6.3	Automobilzulieferer Spritzgießen	165
6.3.1	Der Spritzgießprozess	166
6.3.2	Systemmodell	169
6.3.3	Systemzustände.....	172
6.3.4	Szenariobildung und Ergebnisbewertung.....	174
6.3.4.1	Basisszenario Spritzguss	174

6.3.4.2	Parametervariation.....	183
6.3.4.3	Sensitivitätsanalyse Energiereferenzpreis	187
6.3.4.4	Sensitivitätsanalyse Mindestbetriebsdauer und Mindestlagerbestand.....	189
6.3.4.5	Sensitivitätsanalyse Mindestlagerbestand und Energiereferenzpreis	192
6.3.4.6	Parameteroptimierung und Ergebnisbewertung.....	194
6.3.5	Fazit Automobilzulieferer Spritzguss	196
6.4	Anwendungsübergreifende Analyse und Zwischenfazit	197
7	Reflexion	199
7.1	Bewertung der Erfüllung der Anforderungen	199
7.2	Beantwortung der Forschungsfrage.....	203
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	206
9	Literaturverzeichnis.....	209
Anhang	241

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current
AFE	Active Front End
BKT	Betriebskalendertag
BKV	Bilanzkreisverantwortlicher
CPP	Critical Peak Pricing
DC	Direct Current
DGM	Druckgussmaschine
DSM	Demand Side Management
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
eex	European Energy Exchange
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ERP	Enterprise-Resource-Planning
HKG	Heiz-/ Kühlgeräte
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MES	Manufacturing Execution System
MVG	Masselvorwärmgerät
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SGM	Spritzgussmaschine
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TOU	Time of Use

ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
VNB	Verteilnetzbetreiber
WIP	Work in Process

Variablenverzeichnis

AktAVG	Index des aktuellen Arbeitsvorgangs [-]
AnzAVG	Anzahl der Arbeitsvorgänge des Auftrags [-]
BL _{Ist}	Istlagerbestand [ME]
BL _{Plan}	Planlagerbestand [ME]
BME	Lagerbestandsmenge nach dem aktuellen Arbeitsvorgang des Auftrags [-]
E	Energetische Komponente des Produktionsdrucks [-]
E _{ref}	Energierferenzwert [€]
E _{min}	Unteres Limit im Energierferenzintervall [€]
k _E	Energetischer Gewichtungsfaktor [-]
k _L	Logistischer Gewichtungsfaktor [-]
K _{x1}	Logistischer Gewichtungsfaktor [-]
K _{x2}	Logistischer Gewichtungsfaktor [-]
K _{x3}	Logistischer Gewichtungsfaktor [-]
KAP	Kapazität eines Arbeitssystems [Std/BKT]
KAP _{akt}	Aktuelle Kapazität vor der Kapazitätserhöhung [Std/BKT]
KAP _{erf}	Erforderliche Kapazität [Std/BKT]
KAP _{rel}	Relative Kapazität [%]

KAP_{Bednorm}	Normale Kapazität eines Arbeitssystems [Std/BKT]
L	Logistische Komponente des Produktionsdrucks [-]
LME	Liefermenge des Auftrags[-]
ME	Mengeneinheiten (allgemein; z. B. Stk; m ² ; kg)
N	Anzahl der Aufträge in der Warteschlange vor dem Auftrag [-]
Pd	Produktionsdruck [-]
st	Stückzeit [s]
T_0	Aktueller Zeitpunkt [BKT]
t_e	Einzelzeit [min/ME]
t_{min}	Mindestens für die Produktion der Liefermenge benötigte Zeit [BKT]
t_{haben}	Verbleibende Zeit bis zum Plan-Bearbeitungsende des Auftrags [BKT]
TAE_{Plan}	Plan-Bearbeitungsende des Auftrags [BKT]
TBE_{Plan}	Plantermin Bearbeitungsende des Auftrags [BKT]
TP_0	Planungszeitpunkt [BKT]
T_R	Reaktionszeit der Kapazitätserhöhung [BKT]
t_r	Rüstzeit [BKT]
$t_{\text{min,AktAVG}}$	Minimale benötigte Zeit für den aktuellen Arbeitsvorgang [BKT]
Z_{Einsatz}	Dauer der Kapazitätsanpassung [BKT]
ZAU_i	Auftragszeit des i-ten Auftrags [Sdt]

ZAU_{angi}	Angearbeitete Auftragszeit von Aufträgen in Bearbeitung [BKT]
ZAU_{n+1}	Auftragszeit des Auftrags n+1[BKT]
ZDF_i	Durchführungszeit des i-ten Arbeitsvorgangs [BKT]
$ZUE_{min,i}$	Mindestübergangszeit des i-ten Arbeitsvorgangs [BKT]
ΔKAP	Kapazitätsanpassung [Std/BKT]
α	y-Achsenabschnitt
β	Regressionskoeffizient
ε	Standardfehler
γ	energetische Dringlichkeit [-]
γ_E	Energiezustandsbit[€]

Bildverzeichnis

Alle Abbildungen ohne Quellenangaben sind eigene Abbildungen des Verfassers.

Bild 1 Industriestrompreisentwicklung (inklusive Stromsteuer) in Deutschland	4
Bild 2: Angewendete Fachdisziplinen der Ingenieurwissenschaft	8
Bild 3: Forschungsstruktur der vorliegenden Arbeit	9
Bild 4: Betrachtungsraum der dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung	11
Bild 5: Das Produktionssystem.....	14
Bild 6: Elemente eines Produktionssystems.....	16
Bild 7: Die Erweiterung der Automatisierungspyramide um den Faktor Energie ...	17
Bild 8: Zielsystem der Produktionslogistik	21
Bild 9: Trichtermodell und Durchlaufdiagramm einer Produktionsstation	27
Bild 10: Modell der Fertigungssteuerung	28
Bild 11: Controlling im Regelkreis der PPS.....	30
Bild 12: Ebenen des Demand Side Management	41
Bild 13: Zeitintervalle zur Beschreibung einer Flexibilitätsmaßnahme	44
Bild 14: Elektrizitätswirtschaftliche Vertragsbeziehungen.....	48
Bild 15 Entwicklung der Industrie-Strompreis-Bestandteile in Deutschland.....	51
Bild 16: Relevanzanalyse der Literatur	57
Bild 17: Die Erweiterung des logistischen Zielsystems um den Faktor Energie	76
Bild 18: Die Steuerungsentwicklung auf Basis des Wasserfallmodells.....	90
Bild 19: Funktionen des Netzmanagements.....	92

Bild 20: Die Kommunikationstopologie am Beispiel eines Gleichstromnetzes	96
Bild 21: Aufbau der dezentralen Verbraucheroptimierung	99
Bild 22: Der energieflexible Verbraucherregelkreis	109
Bild 23: Veranschaulichung des Verhaltens der Logistikkomponente	114
Bild 24: Verlauf des Strompreises und des Produktionsdrucks.....	118
Bild 25: Zeitverlauf der gewichteten logistischen Komponente des Produktionsdrucks	120
Bild 26: Modellierungs- und Implementierungsstrategie der energieflexiblen Steuerung.....	124
Bild 27: Fertigungsmodellierung in AnyLogic.....	126
Bild 28: Aufteilung des Energieverbrauchs des Druckgussproduktionssystems ...	128
Bild 29: Komponentenbezogener Energieverbrauch eines Druckgießprozesses..	137
Bild 30: Darstellung der zeitlichen Abfolge des Druckgießprozesses	139
Bild 31: Systematischer Aufbau des Simulationsmodells des Druckgussproduktionssystems.....	141
Bild 32: Betrachtete Prozesszustände der Druckgießmaschine	144
Bild 33: Nettostrompreisverlauf für den Simulationszeitraum.....	148
Bild 34: Verlauf der logistischen und der energetischen Komponente der DGM	148
Bild 35: Verlauf der energetischen Komponente der DGM in Abhängigkeit des Strompreises	149
Bild 36: Verlauf des Produktionsdrucks der DGM	149
Bild 37: Schaltverhalten der DGM in Abhängigkeit des Produktionsdrucks	150
Bild 38: Verlauf des Lagerfüllgrads nach der DGM	151
Bild 39: Stromkostenverlauf in Bezug zum Normalbetrieb der DGM.....	151

Bild 40: Effekt des Energiereferenzpreises auf die energetische Komponente der DGM	155
Bild 41: Lösungsraum für die Variation von Mindestbetriebsdauer und Lagergröße der DGM	159
Bild 42: Lösungsraum für die Variation von Lagervolumen und Energiereferenzpreis der DGM	161
Bild 43: Energiekostenreduktion gegenüber dem Normalbetrieb in Abhängigkeit von Lagervolumen und Energiereferenzpreis der DGM	162
Bild 44: Prozentualer Stromkostenverlauf in Abhängigkeit des Normalbetriebs der DGM	163
Bild 45: Stromkosteneinsparungen der DGMs in Abhängigkeit des Marktüblichen Effektivzinssatzes bezogen auf ein Jahr	164
Bild 46: Komponentenbezogener Energieverbrauch eines Spritzgusszyklus.....	167
Bild 47: Systematischer Aufbau des Simulationsmodells des Spritzgussproduktionssystems	170
Bild 48: Ersatzschaltbild des DC-Netzes der SGM	171
Bild 49: Betrachtete Systemzustände der SGM	173
Bild 50: Betrachtete Systemzustände des Trocknungsprozesses	174
Bild 51: Nettostrompreisverlauf und DC Busspannung für den Simulationszeitraum.....	176
Bild 52: Verlauf der logistischen und energetischen Komponente des Trockners	176
Bild 53: Verlauf der logistischen und energetischen Komponente der SGM	177
Bild 54: Verlauf der energetischen Komponente des Trockners in Abhängigkeit des Strompreises	178
Bild 55: Verlauf der energetischen Komponente der SGM in Abhängigkeit der Busspannung	178

Bild 56: Verlauf des Produktionsdrucks des Trockners	179
Bild 57: Verlauf des Produktionsdrucks der SGM.....	179
Bild 58: Schaltverhalten des Trockners in Abhängigkeit des Produktionsdrucks..	180
Bild 59: Schaltverhalten der SGM in Abhängigkeit des Produktionsdrucks.....	180
Bild 60: Verlauf des Lagerfüllgrads nach dem Trockner	181
Bild 61: Verlauf des Lagerfüllgrads nach den SGM	181
Bild 62: Stromkostenverlauf des Trockners in Abhängigkeit des Normalbetriebs	182
Bild 63: Stromkostenverlauf der SGM in Abhängigkeit des Normalbetriebs	182
Bild 64: Lösungsraum für Mindestbetriebsdauer und Mindestlagerbestand des Trockners.....	190
Bild 65: Lösungsraum für Mindestlagerbestand und Energiereferenzpreis des Trockners.....	192
Bild 66: Energiekostenreduktion gegenüber Normalbetrieb in Abhängigkeit von Lagermindestbestand und Energiereferenzpreis (Ladevolumen 300 kg)	193
Bild 67: Energiekostenreduktion gegenüber Normalbetrieb in Abhängigkeit von Lagermindestbestand und Energiereferenzpreis (Ladevolumen 900 kg)	194
Bild 68: Prozentualer Stromkostenverlauf in Bezug auf den Normalbetrieb des Trockners.....	196
Bild 69: Stromkosteneinsparungen des Trockners in Abhängigkeit des Marktüblichen Effektivzinssatzes bezogen auf ein Jahr	196

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bestandteile der Herstellkosten nach HGB	23
Tabelle 2: Übersicht der betrachteten Produktionssteuerungsverfahren	32
Tabelle 3: Ausgewählte Verfahren der Reihenfolgebildung	37
Tabelle 4 Standard Prozesszustände	46
Tabelle 5: Übersicht der Strompreiskomponenten für Deutschland	49
Tabelle 6: Märkte für Energieflexibilität	52
Tabelle 7: Wesentliche Präqualifikationsanforderungen	53
Tabelle 8: Untersuchte Ansätze der energiesensitiven Produktionsplanung	59
Tabelle 9: Untersuchte Ansätze der energiesensitiven Produktionssteuerung	67
Tabelle 10: Untersuchte Ansätze des optimierenden Lastmanagements	71
Tabelle 11: Bewertung der Ansätze der energiesensitiven Produktionssteuerung hinsichtlich der Anforderungen des Bilanz- und Objektbereichs	80
Tabelle 12: Bewertung der Ansätze der energiesensitiven Produktionssteuerung hinsichtlich der Anforderungen des Steuerungs- und Regelungssystems	81
Tabelle 13: Bewertung der Ansätze der energiesensitiven Produktionssteuerung hinsichtlich der Anforderungen an die Systemoptimierung	82
Tabelle 14: Bewertung der Ansätze der Laststeuerung hinsichtlich der Anforderungen des Bilanz- und Objektbereichs	84
Tabelle 15: Bewertung der Ansätze der Laststeuerung hinsichtlich der Anforderungen des Steuerungs- und Regelungssystems	85
Tabelle 16: Bewertung der Laststeuerung hinsichtlich der Anforderungen an die Systemoptimierung	86

Tabelle 17: Bewertung der Ansätze der energiesensitiven Produktionssteuerung hinsichtlich der Anforderungsklassen	87
Tabelle 18: Bewertung der Ansätze der Laststeuerung hinsichtlich der Anforderungsklassen	88
Tabelle 19: Klassifizierung der Teilnehmergruppen des Industrienetzes.....	97
Tabelle 20: Szenarien zur Veranschaulichung der Logistikkomponente.....	113
Tabelle 21: Erläuterungen zum Verhalten der Logistikkomponente	115
Tabelle 22: Ansätze für die Ermittlung des Energiereferenzwertes	117
Tabelle 23: Annahmen und Randbedingungen der Modellbildung	130
Tabelle 24: Anforderungen an die Flexibilisierung der DGM	140
Tabelle 25: Übersicht über Prozesszustände der Druckgießmaschine	145
Tabelle 26: Durchschnittliche Leistungsniveaus der Druckgießmaschine.....	146
Tabelle 27: Parametervariation des Basisszenarios des Druckgussproduktionssystems.....	152
Tabelle 28: Regressionsstatistik	153
Tabelle 29: Normierte Regressionskoeffizienten	153
Tabelle 30: Datenbasis zur Energiereferenzpreisvariation (Nettopreise)	157
Tabelle 31: Energiekosteneinsparung durch Energiereferenzpreisvariation gegenüber dem Normalbetrieb der DGM	158
Tabelle 32: Energiekostensparnis für die Variation der Mindestbetriebsdauer und der Lagergröße der DGM	160
Tabelle 33: Anforderungen an die Flexibilisierung der SGM.....	168
Tabelle 34: Anforderungen an die Flexibilisierung des Trockners	169
Tabelle 35: Durchschnittliche Leistungsniveaus in Abhängigkeit der Systemzustände der SGM	173

Tabelle 36: Untersuchte Fertigungsaufträge der Spritzgussproduktion.....	175
Tabelle 37: Parametervariation des Basisszenarios der Spritzgießproduktion	183
Tabelle 38: Regressionsstatistik	184
Tabelle 39: Normierte Regressionskoeffizienten	186
Tabelle 40: Datenbasis zur Energiereferenzpreisvariation (Nettopreise)	188
Tabelle 41: Energiekosteneinsparung durch Energiereferenzpreisvariation gegenüber dem Normalbetrieb des Trockners	189
Tabelle 42: Energiekostensparnis für die Variation von Mindestbetriebsdauer und Mindestlagerbestand des Trockners (Lagervolumen 300 kg).....	191
Tabelle 43: Energiekostensparnis für die Variation von Mindestbetriebsdauer und Mindestlagerbestand des Trockners (Lagervolumen 900 kg).....	191
Tabelle 44: Bewertung der dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Produktionssteuerung hinsichtlich der Anforderungsklassen.....	203

1 Einleitung

Eine sichere, nachhaltige und kostengünstige Energieversorgung gewinnt vor dem Hintergrund der Energiewende und der damit verbundenen schwankenden Bereitstellung von Energie auch in der Industrie an Bedeutung. Unternehmen sind aus Wettbewerbsgründen gezwungen, ihre Produktivität kontinuierlich zu steigern. Schwankende und steigende Energiepreise sowie eine begrenzte Energieverfügbarkeit werden weltweit zunehmend zu einem Kostenrisiko und rücken die Energieproduktivität in den Fokus vieler Unternehmen. Entscheidend ist es, diese Herausforderungen frühzeitig zu identifizieren und entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten. Energie ist Teil eines komplexen Systems aus Produktionsfaktoren, das es ganzheitlich zu optimieren gilt. (Sauer et al. 2016, S. 2)

Vor diesem Hintergrund greift die vorliegende Arbeit die Frage auf, wie ein Produktionssystem dezentral, automatisiert und energieflexibel gesteuert werden kann mit dem Ziel, die Energie- und damit auch die Produktionskosten nachhaltig zu senken. Gleichzeitig wird damit auch ein Beitrag zu einer Verbesserung der Nachhaltigkeit der Energieversorgung geleistet. Dabei sollen die Auslastung des Produktionssystems und die Termintreue der Aufträge nicht (negativ) beeinflusst werden.

Im Fokus der Arbeit stehen die Produktionssteuerung und die damit verbundenen wertschöpfenden Maschinen und Anlagen sowie die bestehende energetische Infrastruktur des Produktionssystems. Die Ergebnisse der Arbeit sind ein neuartiges Steuerungssystem und effiziente Regelalgorithmen, die es erlauben, das Produktionssystem energetisch zu optimieren und damit das Produktionssystem robust, zukunftsorientiert und nachhaltig zu betreiben.

1.1 Ausgangssituation

Die globale Wirtschaft befindet sich in einem massiven Wandel und nur Unternehmen, die die Dynamik und die Richtung des Wandels antizipieren, sind dauerhaft in

der Lage, entstehende wirtschaftliche Risiken zu minimieren und nachhaltig Wettbewerbsvorteile zu generieren.

Das Frankfurter Zukunftsinstitut, ein Mitbegründer der Trend- und Zukunftsforschung in Deutschland, identifiziert die zwölf Megatrends: Wissenskultur, Urbanisierung, Konnektivität, Individualisierung, Neo-Ökologie, New Work, Globalisierung, Gender Shift, Gesundheit, Mobilität, Silver Society und Sicherheit (Horx et al. 2019, S. 108). Diese Trends haben die globale Gesellschaft schon lange geprägt und werden dies zukünftig tun (Horx et al. 2019, S. 108–110).

Betrachtet man diese Megatrends aus der Perspektive eines produzierenden Unternehmens in Bezug auf die energetische Versorgung der Produktion, so sind insbesondere die Trends hinsichtlich Sicherheit, Konnektivität und Neo-Ökologie (Nachhaltigkeit) von Bedeutung.

Eine nachhaltige Produktion bekommt, aufgrund des wachsenden gesellschaftlichen Drucks, einen immer größeren Stellenwert und entwickelt sich folglich zu einem Wettbewerbsvorteil. Dabei wird nachhaltiges Wirtschaften zunehmend über den gesamten Produktlebenszyklus betrachtet, d.h. von der Produktentwicklung über die Produktion bis zum Recycling. Eine nachhaltige Energieversorgung aller Bereiche der Gesellschaft und damit auch der Produktion durch regenerative Energien ist vor allem in Deutschland Teil der Klimaschutz-Bemühungen. (Sauer et al. 2016, S. 4)

Die Konnektivität ist der bedeutendste Megatrend unserer Zeit. Die digitale Vernetzung dominiert den wirtschaftlichen Wandel und stellt produzierende Unternehmen vor große Herausforderungen. Um diese Herausforderungen erfolgreich zu meistern, brauchen Unternehmen neue Kompetenzen und ein ganzheitlich-systemisches Verständnis des digitalen Wandels (Horx et al. 2019, S. 87). Für die energetische Versorgung der Produktion liegt die Herausforderung darin, die einzelnen Verbraucher untereinander intelligent zu vernetzen und zeitgleich eine Vernetzung mit dem übergeordneten Energiesystem herzustellen.

Sicherheit bedeutet für Unternehmen, zum einen wirtschaftliche Stabilität und zum anderen natürlich auch der Schutz vor schädlichen externen Eingriffen. Insbesondere

durch die digitale Vernetzung ergeben sich zunehmend neue Angriffspunkte. In Bezug auf den Faktor Energie muss ein robustes Energiesystem in der Produktion geschaffen werden, das eine hohe Versorgungssicherheit und damit Produktionsausbringung gewährleistet.

Das Energiesystem ist, wie auch die Wirtschaft, „Spielball“ dieser Megatrends. Globalisierung, Nachhaltigkeit, aber auch politische Entscheidungen nehmen starken Einfluss darauf, wie wir unsere Energie erzeugen, verteilen und bepreisen.

Der Ausbau regenerativer Energien wird weltweit und in Deutschland insbesondere durch die Energiewende vorangetrieben. Die EU hat bereits 2007 beschlossen, dass der Anteil an erneuerbaren Energien (Strom, Wärme, Kraftstoffe) am Brutto-Endenergieverbrauch der EU-Staaten bis 2020 auf 20% steigen soll. Für Deutschland ist ein Anteil von 35% bis 2020 gegenüber 2000 festgesetzt. Bis 2030 sollen 50%, bis 2040 65% und bis 2050 80% erreicht werden. (Günther et al. 2019, S. 6)

Seit dem Jahr 2000 hat sich der Strompreis der deutschen Industrie verdreifacht (Bild 1). Grund hierfür sind im Wesentlichen die gestiegenen Umlagen und Steuern für Unternehmen, die nicht vom Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) befreit sind. Im gleichen Zeitraum stieg der Kostenanteil am Strompreis für Beschaffung, Netzentgelt und Vertrieb um etwa 40% (BDEW 2020, S. 24). Somit wird der Strompreis in Deutschland stark politisch beeinflusst und unterliegt, insbesondere durch die Ausgestaltung der EEG-Umlage, einer für Unternehmen nicht kalkulierbaren Entwicklung.

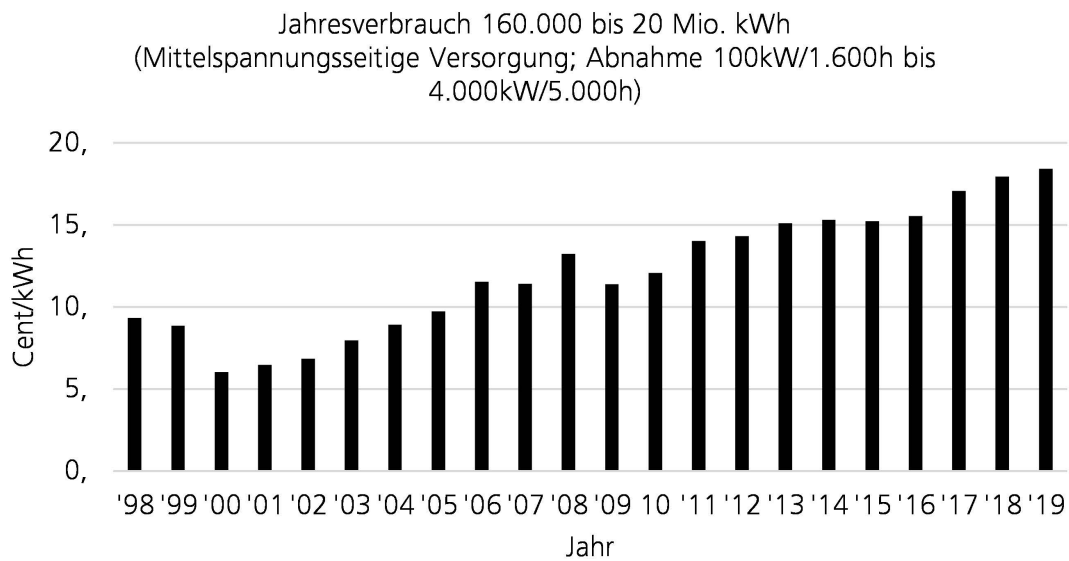


Bild 1 Industriestrompreisentwicklung (inklusive Stromsteuer) in Deutschland nach (BDEW 2020, S. 24)

Mit einem zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien wandelt sich die elektrische Energieinfrastruktur von einer zentralen hin zu einer zunehmend dezentralen Versorgung. Eine dezentrale Erzeugungsanlage ist gemäß § 3 Nr. 11 EnWG „eine an das Verteilernetz angeschlossene verbrauchs- und lastnahe Erzeugungsanlage“ (EnWG 2005, S. §3). Die Dezentralisierung von Erzeugungsanlagen führt dazu, dass Unternehmen vermehrt eigene Anlagen zur Energieproduktion aufbauen, um Kostenvorteile zu generieren und die Versorgungssicherheit zu verbessern. So kann eigenerzeugte Energie direkt genutzt und überschüssige Energie gespeichert oder in das Netz eingespeist werden.

Der Ausbau erneuerbarer Energien hat jedoch nicht nur Vorteile, sondern führt auch zunehmend zu Schwankungen in der Energieerzeugung in Abhängigkeit z.B. der Wetterlage. Entsprechend wirkt sich der Energiebezug zu Zeiten, an denen viel Energie verfügbar und der Energiepreis niedrig ist, positiv auf die Energiekosten der Unternehmen aus. Umgekehrtes gilt für den Energiebezug zu Zeiten, an denen wenig Energie verfügbar und der Energiepreis hoch ist. (Gellings et al. 2016, S. 1-4)

1.2 Problemstellung und Forschungsbedarf

Die bisherigen Ausführungen zeigen, dass produzierende Unternehmen mit Bezug auf den Faktor Energie zunehmend ein Interesse haben, Kosten zu senken und die Nachhaltigkeit zu steigern. Dazu benötigen Unternehmen Werkzeuge und Systeme, die diese in die Lage versetzen, solche Optimierungen vorzunehmen. Während die Verbesserung der **Energieeffizienz** bereits fester Bestandteil der energetischen Optimierung der Produktion ist, wird die **Flexibilisierung des energetischen Verbrauchs** in den meisten produzierenden Unternehmen noch nicht betrachtet.

Produzierende Unternehmen müssen sich auf einen **Paradigmenwechsel** im Bereich der energetischen Versorgung einstellen. Weg von einer zentralen, verbrauchsorientierten Erzeugung, hin zu einem Zusammenspiel aus dezentraler, fluktuierender Erzeugung, Speicherung und flexiblem Verbrauch. Dies wirkt sich nicht nur auf den physikalischen Aufbau der energetischen Infrastruktur aus, sondern führt auch zu einer Änderung der Tarifstrukturen. Um Anreize für eine Flexibilisierung der Verbraucherseite zu schaffen, wird sich die energetische Preisstruktur dynamisieren. (Häckel et al. 2019, S. 168–170)

Mit zunehmender Variabilität des Faktors Energie für die industrielle Produktion müssen, aufgrund der immer weiter steigenden Verfügbarkeitsdynamik, **automatisierte Lösungen** zur Flexibilisierung des Energieverbrauchs geschaffen werden. Energetische Flexibilität kann bereits in der Produktionsplanung mit einem Horizont von Wochen bis Tagen eingeplant werden und in der Produktionssteuerung im Zeithorizont von Tagen bis Minuten in die Feinplanung übertragen werden. Dabei liegt die Herausforderung in der Schaffung einer robusten energetischen und produktionstechnischen Infrastruktur, deren Betrieb mit integrierten und automatisierten Systemen geplant, gesteuert und optimiert wird.

Mit steigender Anzahl an Verbrauchern, Erzeugern und Speichern steigt ebenso die Komplexität, das Produktionssystem in **Echtzeit** und in Abhängigkeit des Produktionsflusses energieflexibel und **robust** zu steuern. Dabei greift die Industrie bisher auf zentral geregelte Systeme zurück (Meissner et al. 2017, S. 166). In statischen

und gut strukturierten Produktionsumgebungen erfolgt z.B. die Terminplanung von Aufträgen durch Einplanen der optimalen Verteilung der Aufträge auf die verfügbaren Ressourcen. Softwaretools können diese Art von Zuordnungsproblemen zielgerichtet und in einem angemessenen Zeitraum lösen. Die Suche nach einer optimalen Lösung wird jedoch mit einer steigender Anzahl von Aufträgen, Produktionsressourcen und Verbindungen zwischen den Produktionsressourcen immer komplexer.

Obwohl heuristische Ansätze annähernd optimale Lösungen aufzeigen können, treten mit zunehmend dynamischen Systemverhalten der Produktion immer wieder neue Probleme auf. Eine **zentrale** Planungseinheit kann nicht auf Änderungen reagieren, solange der Planungsprozess läuft. Der daraus resultierende Produktionsplan kann demzufolge während seiner Ausführung bereits veraltet sein.

Eine Lösung bieten **dezentrale, automatisierte Steuerungsansätze**. Sie ermöglichen es, dass einzelne Objekte Informationen selbstständig verarbeiten und Entscheidungen treffen. Dies führt zu einer Verschlankung der Planung und zu einer echtzeitnahen Produktionssteuerung. Dabei trifft jedes Objekt eigene Entscheidungen, indem es alle notwendigen Informationen, die in seiner Umgebung verfügbar sind, auswertet. Dies vermeidet umfangreiche und zeitaufwändige Berechnungen und bietet dazu die Möglichkeit, schnell auf plötzliche Veränderungen zu reagieren.

An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an und macht es sich zum Ziel, eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung der Produktion zu entwickeln, um die Energie- und damit auch die Produktionskosten nachhaltig zu senken.

1.3 Forschungsmethodik und wissenschaftstheoretische Positionierung

Eine fundierte wissenschaftliche Untersuchung erfordert eine systematische und strukturierte Vorgehensweise. Durch dies wird Wissenschaft definiert, was die Methode zum Kennzeichen der Wissenschaft macht. (Schnell et al. 2011, S. 2)

Die OECD unterscheidet zwischen der theoretischen oder experimentellen Grundlagenforschung, der angewandten Forschung sowie der experimentellen Entwicklung (OECD 2002, S. 2). Dementsprechend wird zur Gewinnung der Erkenntnisse theoretisch oder empirisch vorgegangen, wobei keine strikte Trennung möglich ist. Ulrich grenzt die angewandte Forschung über den direkten Bezug zur praktischen Problemstellung und der Erforschung anwendbarer Lösungen ab (Ulrich 2001, S. 71). Ausgangspunkt der angewandten Forschung ist das Praxisproblem, das durch wissenschaftliche Theorien aus der anwendungsorientierten oder theoretischen Grundlagenforschung gelöst wird.

Die Ingenieurwissenschaften sind den angewandten Wissenschaften zuzuordnen. Das Ziel des Erkenntnisgewinns liegt hier insbesondere in dem Gewinn von praktisch nützlichem Wissen, um real existierende Probleme zu lösen. Zuvor aufgestellte Hypothesen sollen dabei anhand von Realdaten getestet werden, um Aussagen von praktischem Wert machen zu können (Kubicek 1976, S. 3).

Die vorliegende Arbeit ist den Ingenieurwissenschaften zuzuordnen und basiert auf einer physikalischen, mathematischen und technikorientierten Grundlage (Czichos 2000, S. 13). Die Produktion markiert den Schwerpunkt dieser Arbeit, der um betriebswirtschaftliche Aspekte ergänzt wird (Bild 2). Die mathematisch-naturwissenschaftlichen Grundlagen dieser Arbeit werden aus den Bereichen der Mathematik und Physik bezogen. Die technologischen Grundlagen dieser Arbeit wiederum sind der Elektrotechnik, der Steuerungs- und Regelungstechnik sowie der Informatik zuzuordnen.

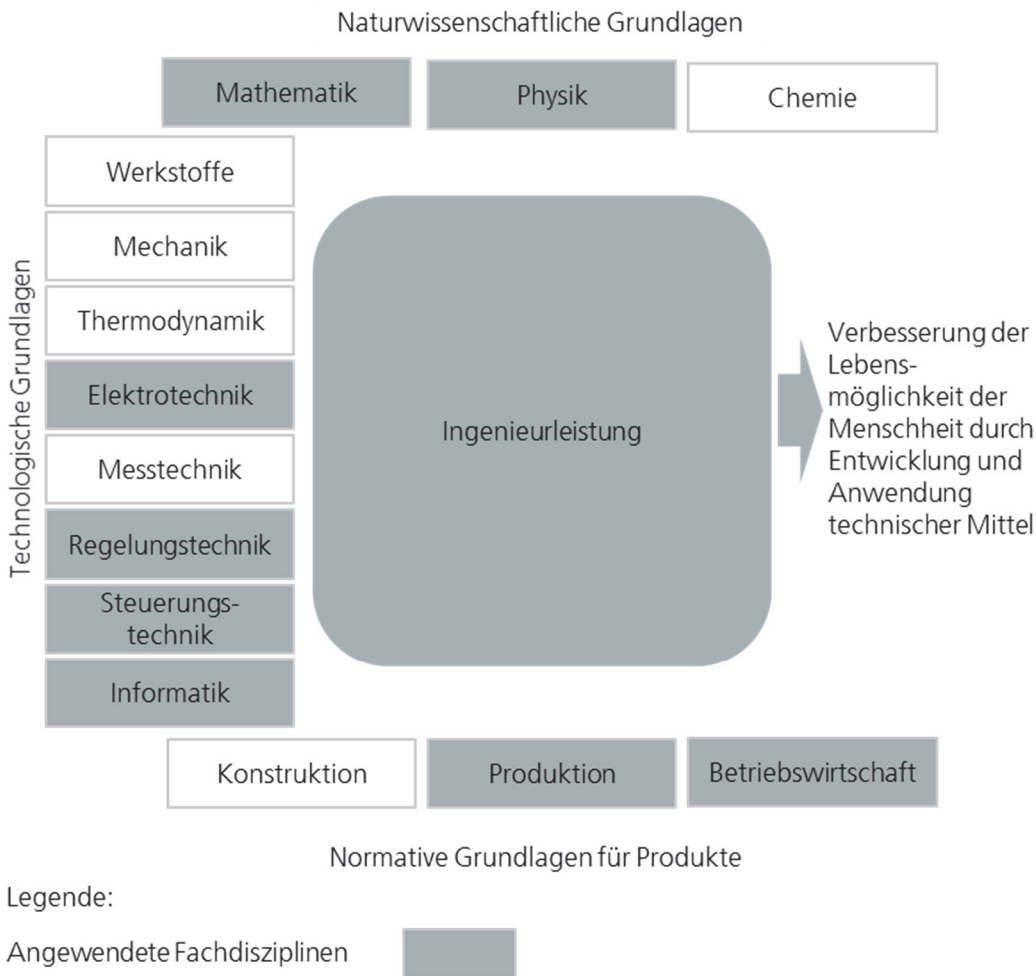


Bild 2: Angewendete Fachdisziplinen der Ingenieurwissenschaft nach (Czichos 2000, S. 14)

Das Vorgehen der Arbeit orientiert sich maßgeblich an dem von Ulrich entworfenen Forschungsprozess (Bild 3). Die Arbeit beginnt und endet mit der Problemerkennung. Keimzelle der Arbeit ist die aus der Praxis abgeleitete Forschungsfrage. Mithilfe ingenieurtheoretischer Grundlagen und dem aktuellen Stand der Forschung wird die Problemstellung der Arbeit bewertet und eingeordnet. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird im Hauptteil der Arbeit der Ansatz einer dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung der Produktion vorgestellt. Mithilfe von Praxisdaten wird ein Modell entwickelt, in dem ein Prototyp der Steuerung getestet wird.

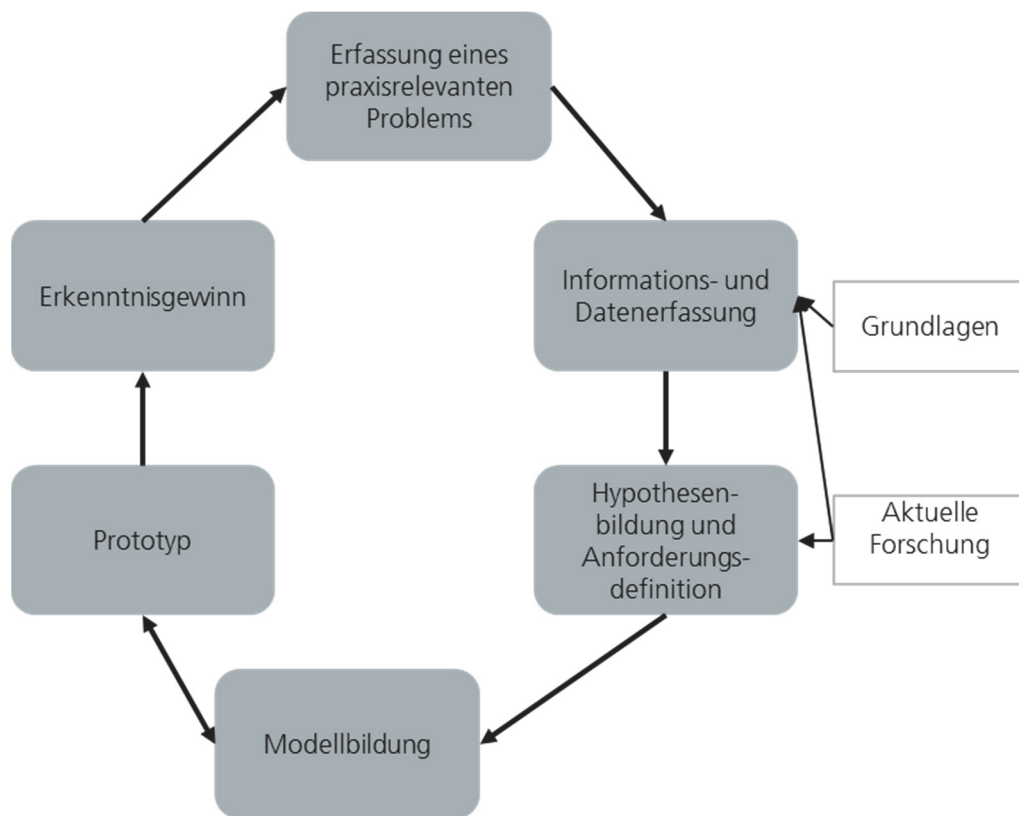


Bild 3: Forschungsstruktur der vorliegenden Arbeit nach (Ulrich 1981, S. 19–21)

1.4 Zielsetzung, Forschungsfrage und Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Produktionssteuerung. Im Fokus der Arbeit stehen dabei die Produktionssteuerung und die damit verbundenen wertschöpfenden Maschinen sowie die bestehende energetische Infrastruktur des Produktionssystems. Das Ergebnis der Arbeit ist ein Steuerungsansatz und Regelalgorithmen auf Maschinenebene, die es erlauben, die bestehende logistische Flexibilität in Abhängigkeit der Auslastung der Produktion zur Reduktion der Energiekosten zu nutzen.

Dieses Ziel wird durch die konsequente Beantwortung der zentralen Forschungsfrage erreicht:

Wie kann ein Produktionssystem dezentral, automatisiert und energieflexibel gesteuert werden?

Die zentrale Forschungsfrage wiederum kann in weitere Teilforschungsfragen untergliedert werden:

- 1. Was sind die relevanten Bestandteile eines Produktionssystems für eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Produktionssteuerung?*
- 2. Welche Anforderungen werden an eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Produktionssteuerung gestellt?*
- 3. Wie kann der Systementwurf einer dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Produktionssteuerung aufgebaut werden?*
- 4. Wie kann eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Produktionssteuerung implementiert und simulativ getestet werden?*

Die abgeleiteten Teilforschungsfragen spiegeln den Aufbau der Arbeit wieder, der sich methodisch am Forschungsprozess nach Ulrich orientiert (Ulrich 1981, S. 19–21). Die Grundlagen der Arbeit umfassen dabei die Definition des Produktionssystems an sich, das wirtschaftliche und logistische Zielsystem der Produktion, die energetische Versorgung der Produktion und abschließend die Schnittstelle zum energetischen Versorgungsnetz und dem damit verbundenen Thema der Energieflexibilität in der Industrie (Bild 4).

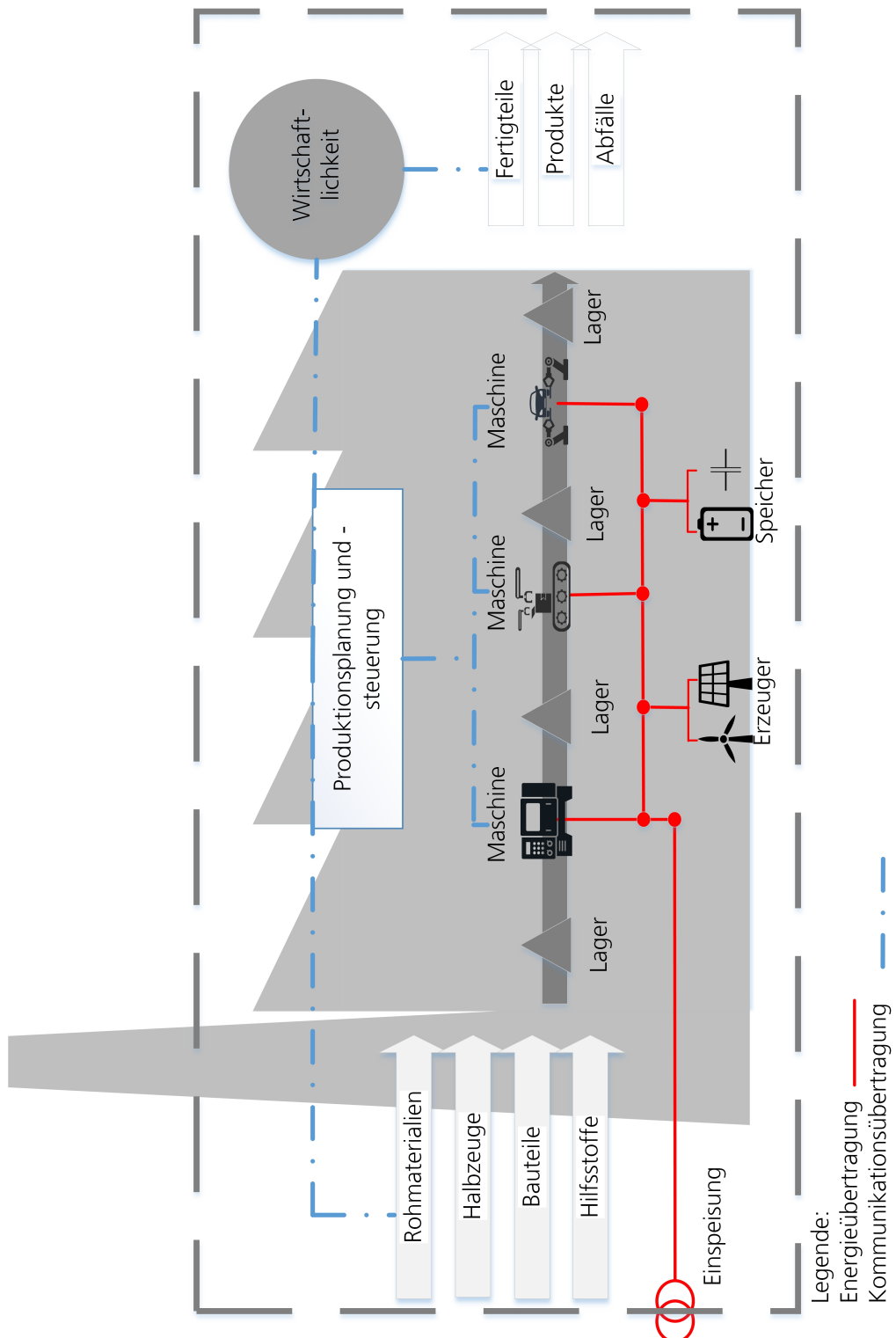


Bild 4: Betrachtungsraum der dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung

Der Kern der Arbeit fokussiert sich auf den Bereich der dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung. Dementsprechend wird der Stand der Technik, basierend auf den Grundlagen, weiter geschärft und beantwortet die erste der abgeleiteten Forschungsfragen.

Im nächsten Schritt erfolgt die Beantwortung der zweiten und dritten abgeleiteten Forschungsfragen. Abgeleitet aus dem Stand der Technik sowie detaillierten Vorstudien werden die Anforderungen an eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung der Produktion definiert. Darauf aufbauend wird ein Systementwurf abgeleitet, der die Regelungs- und Steuerungsparameter entsprechend der entwickelten Anforderungen beinhaltet und in Abhängigkeit produktionstechnischer Zielvorgaben optimiert.

Im letzten Schritt wird die vierte abgeleitete Forschungsfrage beantwortet, indem das entwickelte System in einer selbstentwickelten Simulationsumgebung getestet und bewertet wird. Damit wird letztendlich das Ziel dieser Arbeit, die Entwicklung einer dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Produktionssteuerung, erreicht.

Mit diesem neu konzipierten Steuerungssystem und den entsprechenden Regelalgorithmen wird es möglich, das entsprechende Produktionssystem energetisch zu optimieren und damit die Produktion robust, zukunftsorientiert und energieflexibel zu betreiben.

2 Grundlagen

Im Fokus der Arbeit liegt die Entwicklung einer dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung. In diesem Kapitel werden dazu die notwendigen Grundlagen erarbeitet. Im ersten Teil wird der Begriff des Produktionssystems definiert. Daraufaufgehend wird der Bereich der Produktionssteuerung analysiert und abschließend der Bereich der Energieflexibilität untersucht.

2.1 Produktionssysteme

Ein zentraler Bestandteil dieser Arbeit ist die Definition der relevanten Systemgrenzen vor dem Hintergrund der Problemstellung. Um diese sowohl auf physikalischer als auch auf konzeptioneller Ebene zu bestimmen, muss zunächst der Raum „Produktionssystem“ beschrieben werden. Darauf aufbauend werden die Automatisierungsebenen von Produktionssystemen identifiziert und abschließend wird die Energieversorgung von Produktionssystemen charakterisiert.

2.1.1 *Definition von Produktionssystemen*

Eine grundlegende Definition des Begriffes der Produktion liefert Erich Gutenberg im ersten Band seiner Reihe zum Thema *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre*. Demzufolge gilt: Menschliche Arbeitsleistung, Betriebsmittel und Werkstoffe sind produktive Faktoren. *„Diese stellen die Elemente dar, aus denen der Prozess der betrieblichen Leistungserstellung besteht und werden als betriebliche Elementarfaktoren bezeichnet. Somit ist eine Leistungserstellung, die außer Arbeitsleistung und Betriebsmittel auch den Faktor Wertstoff enthält, eine Produktion.“* (Gutenberg 1979, S. 3)

Betriebe sind Leistungen erbringende und austauschende Wirtschaftseinheiten, deren Kernfunktion die Produktion ist. Die moderne industrielle Produktion eines Betriebes ist ein komplexes, kaum noch überschaubares Wirkgefüge, insbesondere bei großen Unternehmen mit einem breiten und tiefen Erzeugnisspektrum, räumlich

verteilten Standorten und verschiedenen im Mix verwendeten Produktionstypen. (Dyckhoff 2006, S. 4)

Dyckhoff beschreibt das Produktionssystem aus betriebswirtschaftlicher Perspektive auf Basis seiner externen Einflussfaktoren und seiner Innenstruktur (Bild 5). Die Innenstruktur eines Produktionssystems wird durch seine Sub- und Teilsysteme und deren Beziehungen zueinander definiert. Die Subsysteme können dabei Werke, Anlagen, Baustellen oder einzelne Arbeitsplätze darstellen.

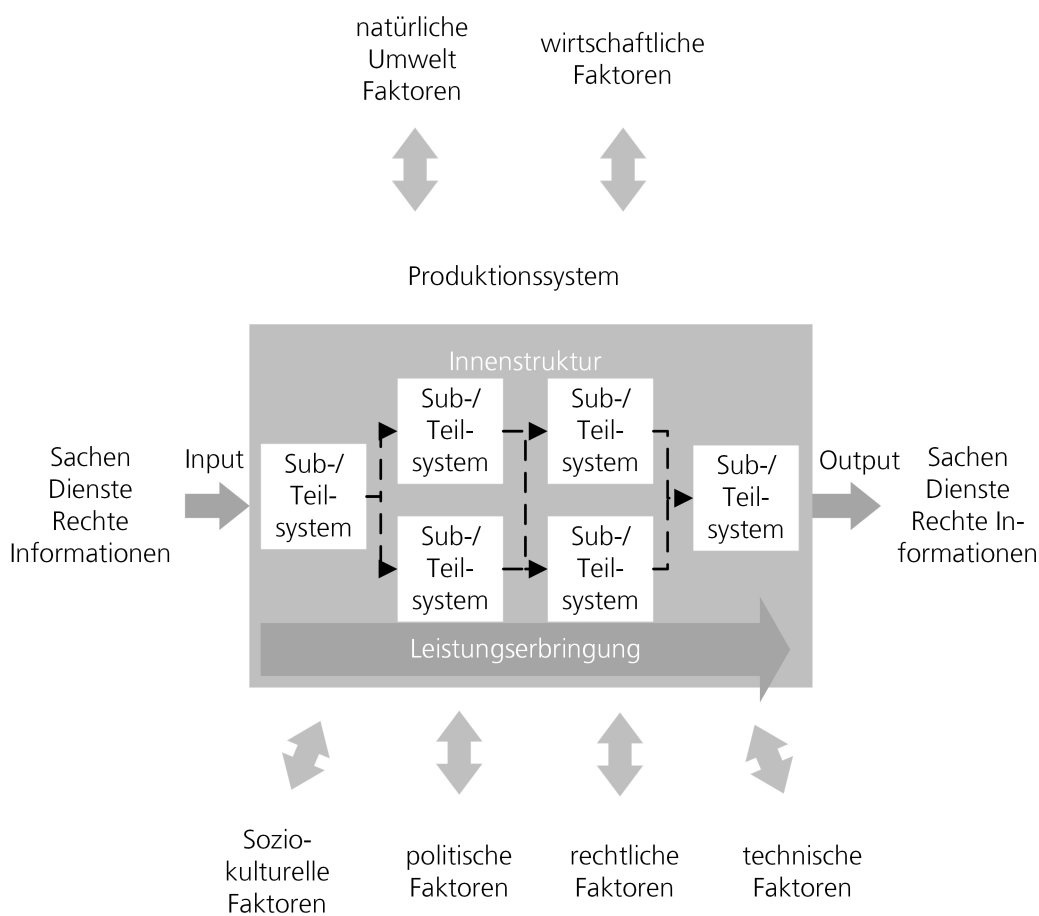


Bild 5: Das Produktionssystem nach (Dyckhoff 2006, S. 5)

Durch die Auswahl bestimmter Arten von Beziehungen werden Teilsysteme definiert, etwa das Materialflusssystem. Somit kann jedes Subsystem eines Betriebs selbst wieder als ein Produktions(sub)system definiert werden. Betriebliche Produktionssysteme bestehen oftmals aus einer Vielzahl verschiedener oder auch gleichartiger Produktionsprozesse, die nicht notwendigerweise am gleichen Produktionsstandort betrieben werden. Hinzu kommt eine geeignete Infrastruktur zur Vernetzung der Produktionsprozesse im Hinblick auf Material- und Informationsflüsse. (Dyckhoff 2006, S. 4)

Grenzt man den Betrachtungsraum auf einen Produktionsstandort ein, so ist das Produktionssystem durch ein einzelnes Werk oder eine einzelne Fabrik definiert. Die Subsysteme können in diesem Fall einzelne Produktionshallen, -anlagen oder Arbeitsplätze sein. Müller et.al. definiert aus der ingenieurtechnischen Perspektive die Fabrik (lateinisch *fabrica*, „Werkstatt“) als die Gesamtheit aller in einem räumlichen und funktionalen Zusammenhang stehender Einrichtungen, die dazu dienen, gewerbliche Erzeugnisse im industriellen Maßstab herzustellen. (Müller et al. 2009, S. 35) Der Begriff Fabrik wird insbesondere dann verwendet, wenn der produktionstechnische und produktionsorganisatorische Aspekt im Vordergrund steht. (Schmigalla 1995, S. 34)

Schmigalla beschreibt das Produktionssystem einer Fabrik durch Elemente, die sich den Produktionsfaktoren Material, Realkapital und Personal zuordnen lassen, sowie durch Elemente, die ihrer Natur nach stofflichen, energetischen, informationellen oder ökonomischen Charakters sind. Bei den Relationen sind Prozesse und Strukturen zu unterscheiden. (Schmigalla 1995, S. 368–369)

Eingangsgrößen des Produktionssystems sind Rohmaterialien, Halbzeuge, Bauteile, Hilfsstoffe und Energie. Diese werden durch den Produktionsprozess zu Fertigteilen, Produkten und Abfällen transformiert (Bild 6). Der Produktionsprozess setzt sich aus Fertigungsmitteln, Messmitteln und Transportmitteln zusammen und benötigt für den Betrieb Personal, Informationen und Räume (Westkämper 2006, S. 200).

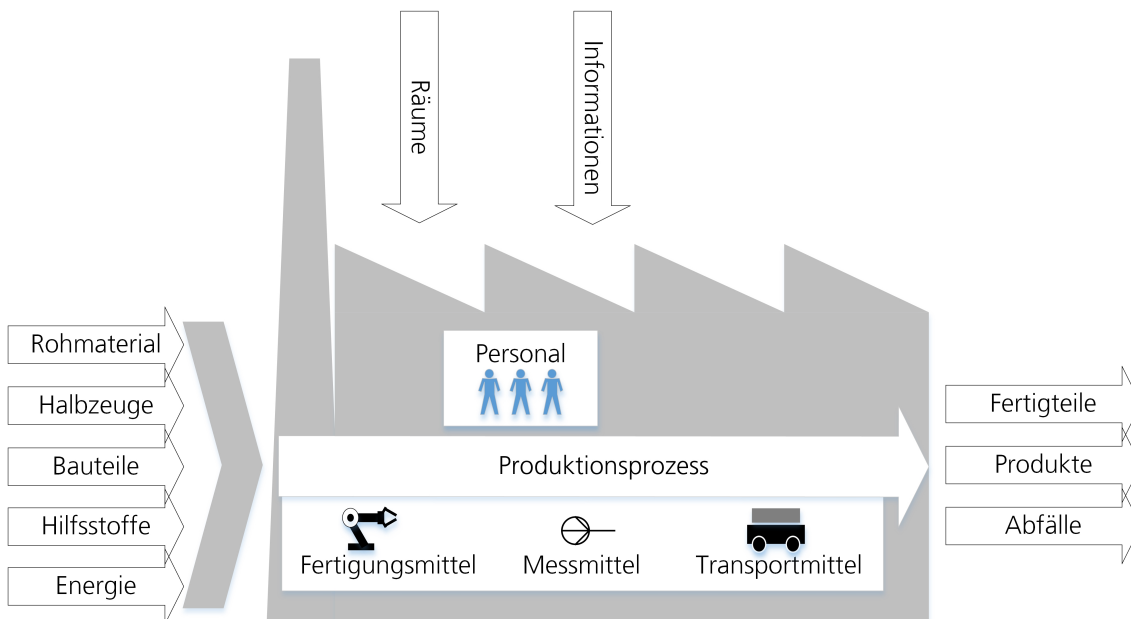


Bild 6: Elemente eines Produktionssystems nach (Westkämper 2006, S. 200)

Die unterschiedlichen Betrachtungsweisen und Betrachtungsebenen der Begriffe Fabrik, Produktion und Produktionssystem machen eine eindeutige Definition für diese Arbeit notwendig. Die Fabrik soll daher im Folgenden das Gesamtsystem aus Produktionssystem und Energiesystem beschreiben. Das Produktionssystem enthält die Betriebsmittel zur wertschöpfenden Transformation im Sinne der Produktion, wie durch Dyckhoff definiert (Dyckhoff 2006, S. 4).

2.1.2 Automatisierungsebenen von Produktionssystemen

Um einen durchgängigen Austausch von Informationen zwischen den Unternehmensfunktionen wie Fertigung, Planung, Materialwirtschaft, Personal und den EDV-Systemen logisch korrekt, komplett und zeitnah abzubilden, werden Unternehmen in hierarchische Ebenen untergliedert (Adams et al. 2007, S. 52) (Bild 7). In diesem Zusammenhang werden vier Unternehmensebenen unterschieden. Ebene vier entspricht der strategischen und taktischen Unternehmensführung und beinhaltet unter anderem die Langzeit-Planung, das Management von Produktionsstandorten oder die Logistik etc.. Ebene drei umfasst die operative Produktionsleitung von

Standorten und beinhaltet die Materialbestandsführung, die Instandhaltung und das Qualitätsmanagement. Ebene zwei umspannt Automatisierungs- und Kontrollsysteme und entspricht der Produktionsleitebene. Ebene eins enthält schließlich die Automatisierungsobjekte selbst. (DIN 62264-1; Meudt et al. 2017, S. 5)

Dabei kann die Ebene eins weiter in die Steuerungsebene und die Feldebene untergliedert werden. Somit kann zusätzlich die Ebene null, die die Fertigungsprozesse beschreibt, eingeführt werden (Roth 2016, S. 49). Darüber hinaus kann unterhalb der Prozessebene die Energieversorgung und deren Regelung als weitere Ebene im Energiekontext etabliert werden (Sauer et al. 2017, S. 213).

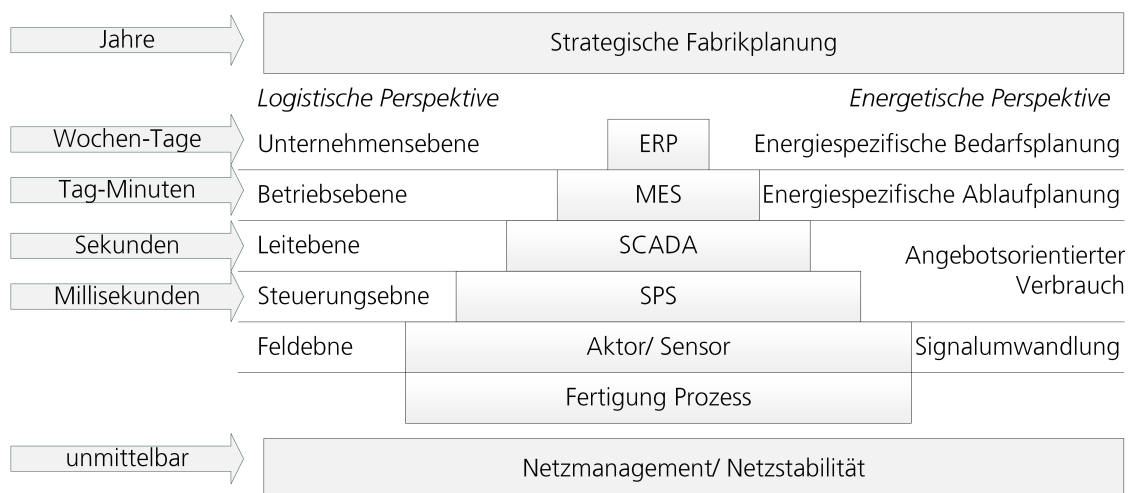


Bild 7: Die Erweiterung der Automatisierungspyramide um den Faktor Energie nach (DIN 62264-1)

2.1.3 *Energieversorgung von Produktionssystemen*

Energie wird in der Physik als gespeicherte Arbeit definiert und spielt in diesem Zusammenhang eine zentrale Rolle in unterschiedlichsten wissenschaftlichen Disziplinen wie der Technik, der Chemie, der Biologie oder der Wirtschaft. Für Pflanzen, Tiere und Menschen ist die Energie essenzielle Lebensgrundlage und bildet den Treibstoff für die industrielle Produktion, wie wir sie heute kennen. (Kurzweil 1999, S. 110–112)

In der Physik wird zwischen den Energieformen chemisch, elektrisch, elektromagnetisch, mechanisch, thermisch und der Kernenergie unterschieden (Kurzweil 1999, S. 127). Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auf die Form der elektrischen Energie. Die weiteren Energieformen werden nicht weiter betrachtet.

Es gibt unterschiedliche Arten von energetischen Verbrauchergruppen wie Haushalte, öffentliches Gewerbe, Handel und Dienstleistungen, Verkehr sowie die Industrie (BMW 2018, S. 4). Industrielle Verbraucher nehmen in diesem Zusammenhang eine Sonderrolle ein. Grundlegend sind industrielle Netze gleich aufgebaut wie Versorgungsnetze. Die Energieübertragung erfolgt auf der Hoch- bis zur Niederspannungsebene. Die Netze bestehen dementsprechend aus Zweigen, die über Transformatoren miteinander gekoppelt sind und Netzknoten mit integrierter Schalt- und Schutztechnik. (Herold 2011, S. 27–28)

Kiank und Samad definieren die Besonderheiten von Industrienetzen wie folgt: (Kiank et al. 2010, S. 12–15; Samad et al. 2012, S. 77–78)

- Industrienetze weisen sehr hohe elektrische Lasten pro Quadratmeter (Flächenlasten) auf. Darüber hinaus sind die Abstände zwischen den Netzknoten im Vergleich zum Übertragungsnetz sehr kurz. Damit erhöht sich das Verhältnis von der Anzahl der Schaltanlagen im Gegensatz zur Leitungslänge drastisch.
- Um das Wiederhochfahren großer motorischer Leistung zu gewährleisten, ist eine hohe Kurzschlussleistung und dementsprechend niedrige Netzimpedanz notwendig.

- Schaltgeräte werden vergleichsweise stark beansprucht. Gerade im Bereich der Blindleistungskompensation kann sich die Schaltzahl auf bis zu 100 Schaltungen pro Tag belaufen.
- Industrienetze sind reine Kabelnetze mit vergleichsweise kurzen Abständen zwischen einzelnen Stationen.
- Hochdynamischer Verbraucher können gravierende Netzurückwirkungen wie Spannungsschwankungen, Spannungseinbrüche, Spannungsunsymmetrien oder harmonische Spannungsverzerrungen verursachen.
- Bei der Existenz von Eigenerzeugungsanlagen sind Randbedingungen für den stabilen Parallelbetrieb des Industrie- und Versorgungsnetzes zu definieren. Damit ein stabiler Inselbetrieb bei Fehlern im Versorgungsnetz gewährleistet werden kann, ist oft ein Lastabwurfssystem notwendig, um den Verbrauch an die Erzeugung anzupassen.
- Die elektrischen Anlagen und Betriebsmittel weisen im Vergleich zu anderen Verbrauchergruppen eine Benutzungszahl auf.
- In Industrienetzen liegt eine besonders hohe Verknüpfung von Energieverteilung und Prozessführung vor. Um diese Verknüpfung zu gewährleisten, ist ein lückenloser Informationsfluss zwischen Schutz-, Leit- und Automatisierungssystemen unerlässlich.
- Hohe Anforderungen werden an die Versorgungszuverlässigkeit und -qualität gestellt. So ist das Vorsehen des n-1 Kriteriums hinsichtlich der Versorgungszuverlässigkeit zwingend erforderlich. Die Versorgungsqualität am Netzübergabepunkt wird von der Norm DIN EN 50160/A1:2016-02 definiert (DIN 50160). Die Anforderungen hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit werden hinsichtlich der Norm DIN EN 61000-1-2 definiert (DIN 61000-1-2).

Die Konzepte der Netzplanung von Industrienetzen sind historisch gewachsen und werden traditionell als AC-Netz realisiert (Kiank et al. 2010, S. 15). Um auf den Anwendungsfall bezogen die Energieeffizienz, -verfügbarkeit und Versorgungsqualität

zu verbessern, gibt es neue Konzepte für die Energieversorgung mit Gleichstrom (Weiß 2018, S. 1–24). Die Motivation für solche Systeme liegt insbesondere in der Reduktion der Spitzenleistung durch maschinenübergreifende Rekuperation, in der Reduktion von Netzurückwirkungen oder der Erhöhung der Versorgungsqualität (Kuhlmann et al. 2017, S. 798).

2.2 Produktionsplanung und -steuerung

Die Produktionsplanung und -steuerung spielt eine Schlüsselrolle für die vorliegende Arbeit. Daher werden im folgenden Kapitel, ausgehend von der Produktionslogistik und den Produktionskosten, die Produktionsplanung sowie die Produktionssteuerung beschrieben.

2.2.1 Produktionslogistik

Produkte und Fertigteile sollen in der richtigen Menge, Qualität und zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Ort dem Kunden zur Verfügung stehen, wobei minimale Kosten und optimaler Lieferservice zu gewährleisten sind. Dies setzt die technischen Grundfunktionen Lagern, Transportieren, Handhaben, Verteilen, Kommissionieren und Verpacken mit den dazugehörigen Funktionen der Informationsverarbeitung wie Erfassen, Speichern, Verarbeiten und Ausgeben voraus. Diese Funktionen sind entlang der Wertschöpfungskette von der Beschaffung über die Produktion bis zum Absatz, über Entsorgung und Wiederverwendung angelegt. (Wiendahl 2014, S. 250)

Die mit dem Management der Warenströme in der Produktion verbundene Logistik hat zum Ziel, eine hohe Logistikleistung bei gleichzeitig geringen Logistikkosten zu erreichen (Bild 8). Eine hohe Logistikleistung wird dabei durch eine hohe Liefertreue und eine kurze Lieferzeit definiert. Geringe Logistikkosten werden wiederum durch geringe Prozesskosten und geringe Kapitalbindungskosten definiert. Im Zentrum des logistischen Zielsystems steht in Abhängigkeit der Termintreue, der Durchlaufzeit, der Auslastung und der Bestände die Wirtschaftlichkeit des Unternehmens.

Die mit dem Management der Warenströme in der Produktion verbundene Logistik hat eine hohe Logistikleistung bei gleichzeitig geringen Logistikkosten zum Ziel (Bild 8). Eine hohe Logistikleistung wird dabei durch eine hohe Liefertreue und eine kurze Lieferzeit definiert. Geringe Logistikkosten werden wiederum durch geringe Prozesskosten und geringe Kapitalbindungskosten definiert. Im Zentrum des logistischen Zielsystems steht in Abhängigkeit der Termintreue, der Durchlaufzeit, der Auslastung und der Bestände die Wirtschaftlichkeit des Unternehmens.

Die Produktionsplanung und -steuerung hat zur Aufgabe, unter den Randbedingungen der Termintreue, der Durchlaufzeit, der Auslastung und der Bestände wirtschaftlich maximierend zu planen und zu steuern.

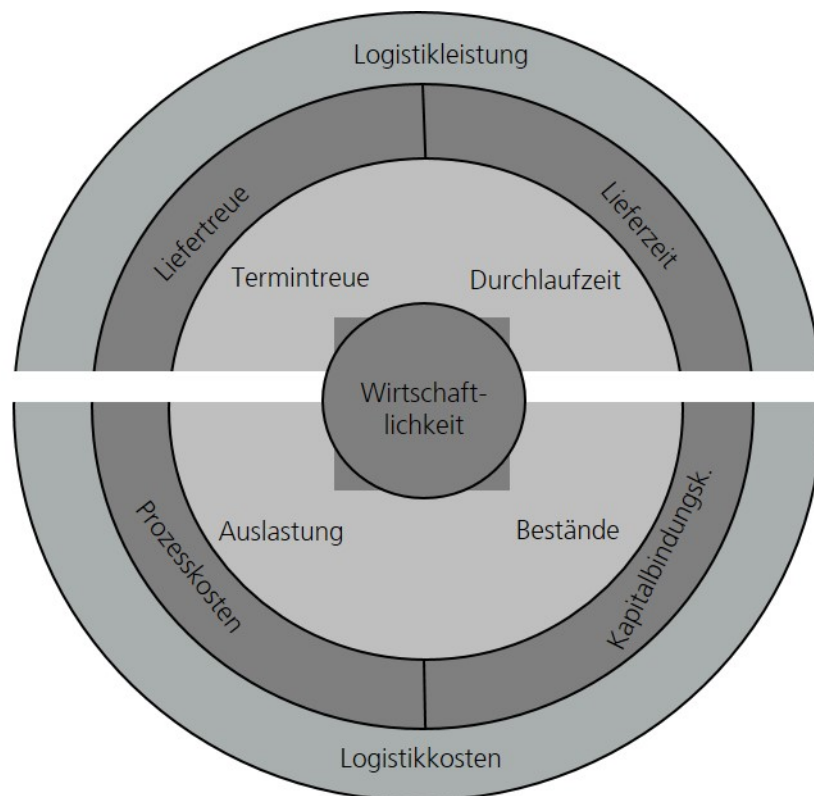


Bild 8: Zielsystem der Produktionslogistik nach (Wiendahl 2014, S. 251)

Die logistischen Zielgrößen haben dabei eine interne und einer externe Perspektive. Die interne Perspektive beschreibt die Zielgröße in ihrer Bedeutung für die eigentliche Fertigung. Dagegen beschreibt die externe Perspektive die Zielgröße hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Kunden eines Unternehmens (Lödding 2010, S. 19)

Die Durchlaufzeit eines Kundenauftrags wird in der externen Perspektive durch die Lieferzeit beschrieben. Sie wird als die Zeitdauer zwischen dem Auftragseingang und der Auslieferung eines Auftrags definiert und setzt sich aus den Bestandteilen Beschaffungszeit, Durchlaufzeit, Versandzeit, Lieferzeitpuffer, Belastungsverschiebung und Administrationszeit zusammen (Schönsleben 2002, S. 618). Der hohen Bedeutung der Lieferzeit ist auch der hohe Einfluss der Auftragsdurchlaufzeit als Kennzahl in der nach innen gerichteten Perspektive zu erklären, da diese direkt die mittlere Lieferzeit eines Unternehmens beeinflusst. Dabei entspricht die Auftragsdurchlaufzeit der Zeitdauer zwischen dem Bearbeitungsanfang und dem Bearbeitungsende des Fertigungsauftrags (Nyhuis 2012, S. 197). Dabei kann die Durchlaufzeit sowohl für die gesamte Prozesskette eines Auftrags als auch für einen einzelnen Arbeitsvorgang gemessen werden.

Die Termineinhaltung eines Kundenauftrags wird in der externen Perspektive durch die Lieferterminabweichung beschrieben. Sie wird aus der Differenz zwischen dem realisierten und dem geplanten Liefertermin gebildet und häufig als Liefertreue angegeben, als Prozentsatz der Aufträge, deren Lieferterminabweichung innerhalb eines vorgegebenen Toleranzfensters liegt. In der internen Perspektive wird die Terminabweichung analog zur Lieferterminabweichung als die Abweichung des tatsächlichen vom geplanten Bearbeitungsende beschrieben.

Neben der Leistung der Logistik beeinflussen auch die Produktionskosten die Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens. Diese werden im Folgenden erläutert.

2.2.2 Produktionskosten

Zur Beschreibung der Produktionskosten ist eine einheitliche Definition notwendig, da dieser Begriff in der betriebswirtschaftlichen Kostenrechnung nicht verwendet wird (Götze 2010, S. 32–36; Rütth 2012, S. 23).

In der vorliegenden Arbeit werden die Produktionskosten als die Summe der Kosten, die für die Herstellung der produzierten Produkte und deren Varianten anfallen, verstanden. Die Herstellkosten eines Produktes sind im deutschen Handelsgesetzbuch § 255 definiert (Fleischer 2018, S. 255). Dies sind die zentralen Kostenarten in der Produktion (Götze 2010, S. 99). Sie setzen sich aus den Material- und Fertigungskosten mit ihren jeweiligen Einzel- oder Gemeinkostenanteilen zusammen (Joos 2014, S. 102) (Tabelle 1).

Einzelkosten sind direkt einem Produkt zuweisbare Kosten. Gemeinkosten sind nicht direkt einem Produkt zuweisbare Kosten und werden entsprechend eines Verteilungsschlüssels auf die Produkte umgelegt. Dabei werden die Kosten durch den Umlaufbestand und die damit verbundenen Kapital-, Beschaffungs-, Lagerungs-, Wartungs- und Verwaltungskostenanteile der Materialgemeinkosten beeinflusst. Zudem beeinflusst die Auslastung einer Fertigung und damit auch die Zins-, Abschreibungs- und Betriebsmittelkostenanteile die Fertigungsgemeinkosten. (Götze 2010, S. 233; Lödding 2010, S. 32–37)

Tabelle 1: Bestandteile der Herstellkosten nach HGB (Röhle et al. 2015, S. 143)

<i>Bestandteile</i>	<i>Art der Aufwendungen</i>
Pflichtbestandteil	Materialeinzelkosten
	Fertigungseinzelkosten
	Sondereinzelkosten der Fertigung
	Notwendige Materialgemeinkosten
	Notwendige Fertigungsgemeinkosten
	Wertverzehr des Anlagevermögens, das bei der Herstellung eingesetzt wird
„Kann“-Bestandteil	Allgemeine Verwaltungskosten
	Aufwendungen für soziale Einrichtungen
	Freiwillige soziale Leistungen
	Aufwendungen für betriebliche Altersvorsorge
	Fremdkapitalzins unter bestimmten Voraussetzungen

Die Kosten für die benötigte Energie werden dabei häufig den Gemeinkosten zugewiesen (Friedl 2012, S. 453). Dies liegt daran, dass oft nur zentrale Stromzähler vorhanden sind und die Abrechnung gar nicht oder nur unvollständig auf Produktionsbereiche oder Maschinen heruntergebrochen werden kann.

Werden für die energetische Flexibilisierung des Produktionssystems Lager genutzt, um ähnlich des Prinzips eines Energiespeichers einzelne Prozesse energetisch zu entkoppeln, stehen die Energiekosteneinsparungen im Kontrast zu zusätzlich entstehenden Lagerkosten. Die Lagerzinsen zeigen den für ruhende Bestände aufzubringenden Kapitaldienst an. (Bichler et al. 2013, S. 1–8)

Grundlage für die Berechnung der Lagerzinsen ist der Lagerzinssatz, der durchschnittliche Lagerbestand und der Einstandspreis.

$$\text{Lagerzinssatz} = \frac{\text{marktüblicher Zinssatz} * \text{Lagerdauer}}{360} \quad (2.1)$$

Die Zinsrechnung basiert in Deutschland auf dem sogenannten „Bankenjahr“, was 360 Tagen entspricht.

Zur Ermittlung der Lagerzinsen wird der zuvor berechnete Lagerzinssatz mit dem durchschnittlichen Lagerbestand und dem Einstandspreis multipliziert.

$$\text{Lagerzinsen} = \frac{\text{Lagerzinssatz} * \text{durchschnittlicher Lagerbestand} * \text{Einstandspreis}}{100} \quad (2.2)$$

2.2.3 Produktionsplanung

Die Produktionsplanung plant die Produktion in Abhängigkeit des logistischen Zielsystems für die nächsten Planungsperioden. Lödding definiert in diesem Zusammenhang die Kernaufgaben der Produktionsplanung als die Produktionsprogrammplanung, die Produktionsbedarfsplanung, die Eigenfertigungsplanung, sowie die Fremdbezugsplanung (Lödding 2010, S. 81).

Die Produktionsprogrammplanung erstellt das Produktionsprogramm des Unternehmens, das für jedes Produkt und für jede Planungsperiode die zu erstellende Menge definiert. Damit wird die Liefermenge, der Netto-Primärbedarf, des Unternehmens

auf Basis des Absatzplans festgelegt. Der Absatzplan wird insbesondere auf Basis von Kundenaufträgen und Absatzprognosen erstellt.

Die Produktionsbedarfsplanung leitet wiederum aus dem Produktionsprogramm den erforderlichen Material- und Ressourcenbedarf ab. Dazu ist es in einem ersten Schritt erforderlich, den Sekundärbedarf an Rohstoffen und Vorprodukten zu ermitteln und Fertigungsaufträge zu generieren. In einem zweiten Schritt werden die Fertigungsaufträge terminiert und der Kapazitätsbedarf an den Ressourcen der Fertigung bestimmt.

Die Termin- und Kapazitätsplanung legt wiederum die Starttermine der Eigenfertigungsaufträge fest, ermittelt den Kapazitätsbedarf und führt bei Kapazitätsüberlastungen eine Kapazitätsabstimmung durch. Ergebnis sind zum einen Plan-Starttermine für die Aufträge und Plan-Bearbeitungstermine für die Arbeitsvorgänge. Zum anderen ergibt sich das Kapazitätsbedarfsprofil der Arbeitssysteme.

Die Eigenfertigungsplanung, auf Basis des Aachener PPS-Modells, umfasst die Losgrößenrechnung, die Feinterminierung und Reihenfolgebildung sowie die Verfügbarkeitsprüfung. Die Losgrößenrechnung beschreibt dabei die optimale Bestimmung der Losgröße in Abhängigkeit der damit verbundenen Produktionskosten, wie Rüst- und Lagerkosten. Die Feinterminierung plant zeitgenau die Arbeitsschritte betriebsmittelspezifisch und zusätzlich die Reihenfolge, in der die Aufträge bearbeitet werden.

2.2.4 Produktionssteuerung

Die Produktionssteuerung ist an der Schnittstelle zwischen planenden und ausführenden Bereichen in der Produktion angesiedelt. Wiendahl definiert in diesem Zusammenhang das Ziel der Produktionssteuerung als die Umsetzung der Vorgaben der Produktionsplanung auch bei – häufig unvermeidbaren – Störungen (Wiendahl 1997, S. 12).

Die Produktionssteuerung steht vor der Herausforderung, sowohl Zeit, Kosten und Qualität bei der Produktion eines Produktes zu optimieren, wobei ein elementarer

Zielkonflikt entsteht (Gutenberg 1979, S. 216). Die vier Zielgrößen Fertigungsdurchlaufzeit, Termintreue, Umlaufbestand und Auslastung sind nicht gleich, sondern zum Teil gegenläufig. Dabei muss die Fertigungssteuerung in Abhängigkeit der logistischen Zielsetzung das fertigungsspezifische Optimum zwischen kurzen Lieferzeiten, einer hohen Termintreue und einer hohen Kapazitätsauslastung finden.

Um die Wirkzusammenhänge zwischen den einzelnen Zielgrößen zu beschreiben, stellen Bechte und Wiendahl das Produktionssystem in einem Trichtermodell dar (Bechte 1984, S. 70–72; Wiendahl 1997, S. 291–295). Dabei sammeln sich in der Trichteröffnung die wartenden Aufträge und beschreiben den Auftragsbestand. Der Trichterhals definiert die Kapazität des Produktionssystems, und der genutzte Querschnitt beschreibt die aktuelle Leistung. Auf diese Weise werden die Zielgrößen Bestand, Durchlaufzeit und Leistung in einen logischen Bezug zueinander gebracht. Mittels eines Durchlaufdiagramms kann dieser Zusammenhang mathematisch beschrieben werden. (

Bild 9)

Im Durchlaufdiagramm wird die mittlere Leistung durch die Steigung der Abgangs- und Zugangskurve repräsentiert, der mittlere Bestand ergibt sich wiederum aus der Fläche zwischen den beiden Kurven und die mittlere Reichweite aus dem Verhältnis von mittlerem Bestand und mittlerer Leistung.

Aufbauend auf dem Grundzusammenhang des Trichtermodells entwickelte Nyhuis die Theorie der Produktionskennlinien (Nyhuis 2012, S. 36). Diese beschreiben den Zusammenhang der logistischen Zielgrößen Leistung, Durchlaufzeit, Übergangszeit und Reichweite in Abhängigkeit des Bestandes.

Die Produktionskennlinien werden in der betrieblichen Praxis zur logistischen Positionierung, das heißt zur Festlegung einer regelbaren Größe (z.B. Bestand) in Abhängigkeit von einer Zielgröße (z.B. Auslastung) eingesetzt. Dies ermöglicht eine zielpriorisierte Positionierung im Dilemma der Ablaufplanung zwischen niedrigen Beständen und Durchlaufzeiten einerseits und einer hohen Auslastung andererseits. (Nyhuis 2012, S. 173)

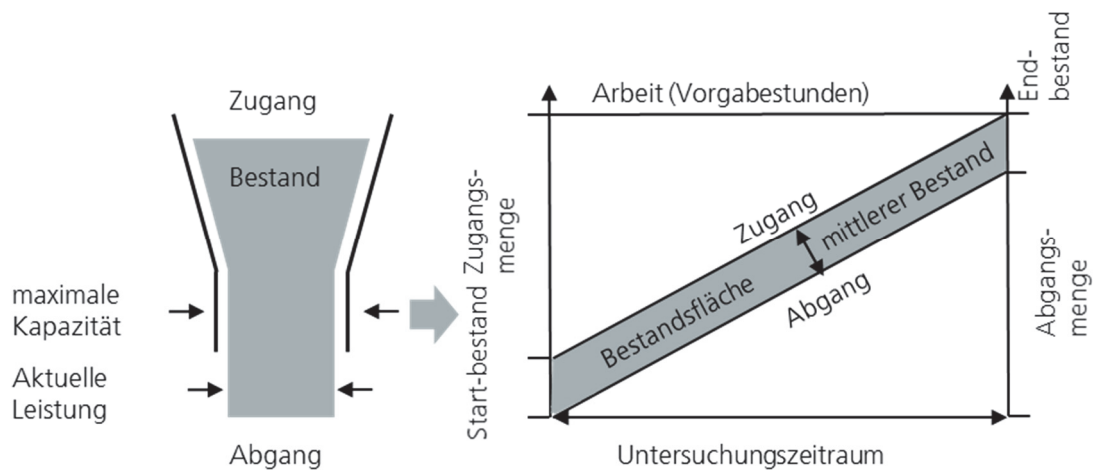


Bild 9: Trichtermodell und Durchlaufdiagramm einer Produktionsstation nach (Lödding 2010, S. 54)

Dabei ist bei der Anwendung der Kennlinienmodelle zu beachten, dass sie einen eingeschwungenen Betriebszustand voraussetzen. Schwankungen des Bestands und ein nicht paralleler Verlauf der Zugangs- und Abgangskurve schränken die Aussagekraft von Produktionskennlinien stark ein (Lödding 2010, S. 74–76).

Darauf aufbauend hat Lödding ein Wirkmodell entwickelt, das diese Aufgaben zu den logistischen Stellgrößen, Regelgrößen und Zielgrößen in Beziehung setzt (Lödding 2008, S. 227). Das Modell setzt sich aus den vier Elementen Aufgaben, Stellgrößen, Regelgrößen und Zielgrößen zusammen (Bild 10). Diese Elemente wiederum sind durch Wirkzusammenhänge miteinander verknüpft.

Die Aufgaben der Produktionssteuerung setzen sich aus der Auftragsfreigabe, der Kapazitätssteuerung, der Reihenfolgebildung und der Auftragserzeugung zusammen. Die Auftragsfreigabe legt den Zeitpunkt und die Reihenfolge fest, in der die Aufträge für die Fertigung freigegeben werden und definiert damit den Ist-Zugang der Produktion. Mit der Freigabe gehen die Aufträge somit von der Planungsphase in die Bearbeitungsphase über. (Lödding 2010, S. 7; Nyhuis 2012, S. 182)

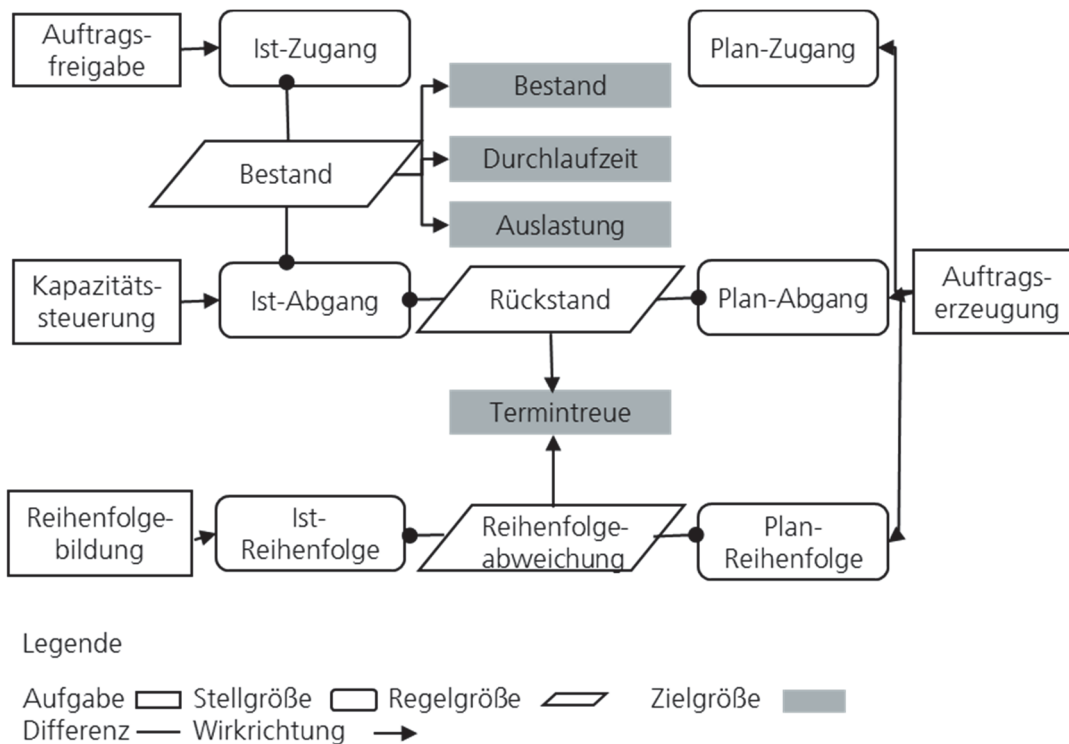


Bild 10: Modell der Fertigungssteuerung nach (Lödding 2008, S. 226)

Die Reihenfolgebildung bestimmt, in welcher Reihenfolge die Aufträge an einem Arbeitssystem abgearbeitet werden. Sie beeinflussen damit die Termintreue der Produktion sowie die Liefertreue eines Unternehmens. Unter bestimmten Randbedingungen kann die Reihenfolgebildung die Leistung der Fertigung erhöhen. (Nyhuis 2008, S. 227; Lödding 2010, S. 14)

Die Auftragserzeugung definiert die Planwerte für den Zugang und den Abgang der Produktion sowie die Plan-Reihenfolge. Die Auftragserzeugung ist damit Bestandteil der Produktionsplanung und bildet die logische Schnittstelle zur Produktionssteuerung. (Lödding 2010, S. 8)

2.2.5 Produktionssteuerung als Regelkreis

Die Idee, die Produktionssteuerung als Regelkreis zu betrachten, ist kein grundsätzlich neuer Ansatz (Wiendahl et al. 1993a, S. 265–268, 1993b, S. 352–354; Hackstein 1984, S. 30–31; Strack 1987, S. 10–12; Warnecke 1989, S. 110–115; Niehues 2017, S. 20). Im Vergleich zu einer Steuerung weist eine Regelung die Rückführung der

Regelgröße auf (DIN 60050-351). Diese Rückführung ist stets Bestandteil der Produktionssteuerung, auch wenn diese nur rudimentär ausgeprägt ist (Fischäder, S. 31). Aus diesem Grund kann die Produktionssteuerung und -regelung in dieser Arbeit äquivalent verwendet werden.

Die Regelgrößen der Produktionssteuerung sind definiert als Bestand, Rückstand und Reihenfolgeabweichung. Entsprechend der Regelungstheorie sind sie demnach zeitveränderliche Größen, die auf einem bestimmten Zielwert gehalten werden sollen. Die Regelgrößen werden über eine Messeinrichtung wieder zur Regeleinrichtung zurückgeführt (Bild 11), wobei der momentane Wert der Regelgröße als Istwert und der Wert der Führungsgröße w als Sollwert bezeichnet wird.

Die Abweichung der Regelgröße zur Führungsgröße ist dabei die Regeldifferenz. Die Regelgrößen der Fertigungssteuerung leiten sich entsprechend der Stellgrößen Ist-Zugang, Ist-Abgang, Plan-Abgang, Ist-Reihenfolge und Plan-Reihenfolge ab. Entsprechend der Regelungstheorie sind sie die Ausgangsgrößen der Steuer- oder Regeleinrichtung und zugleich Eingangsgröße der Regelstrecke. Die logistischen Zielgrößen Bestand, Auslastung, Durchlaufzeit und Termintreue werden wiederum durch die Regelgrößen beeinflusst. Der Bestand ist zugleich Regel- als auch Zielgröße und beeinflusst Durchlaufzeit und Auslastung der Produktion. Sowohl der Rückstand als auch die Reihenfolgeabweichung beeinflussen die Termintreue der Produktion.

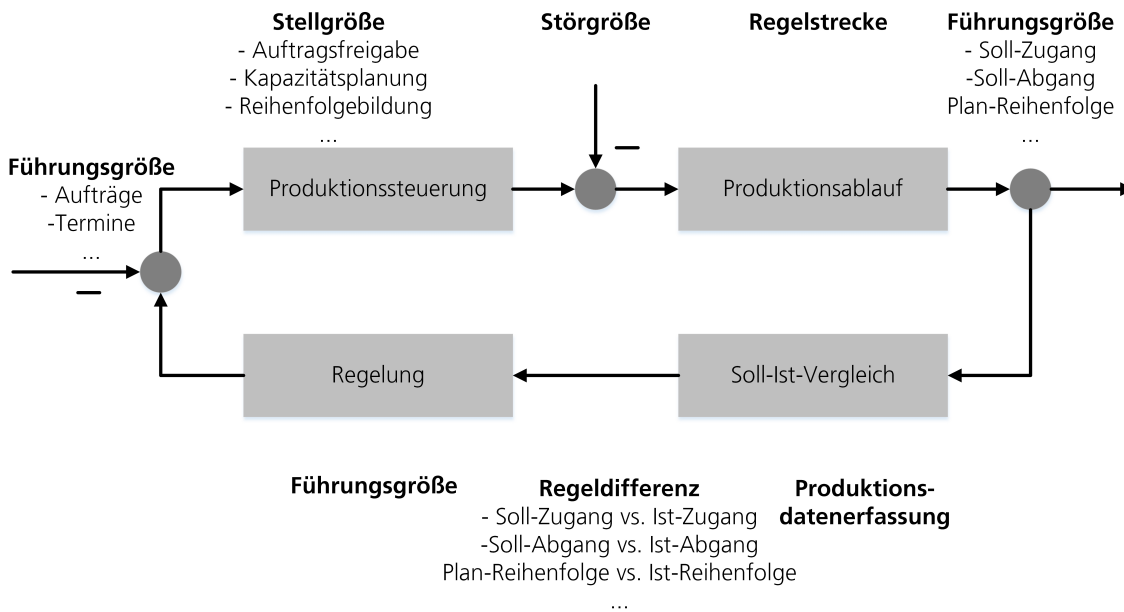


Bild 11: Controlling im Regelkreis der PPS

2.3 Ansätze der Produktionssteuerung

In dem folgenden Kapitel werden unterschiedliche Ansätze der Produktionssteuerung und deren Klassifizierung identifiziert und analysiert. Darauf aufbauend werden die Produktionssteuerungsansätze nach den Verfahren der Auftragserzeugung und Freigabe, der Kapazitätssteuerung und der Reihenfolgebildung untergliedert.

2.3.1 Ansätze zur Klassifizierung der Produktionssteuerung

In der Literatur finden sich unterschiedliche Methoden zur Klassifizierung der Ansätze der Produktionssteuerung. Diese dienen nicht nur der systematischen Untergliederung, sondern auch dem Ableiten einer möglichen Eignung eines Verfahrens für eine spezifische Fertigungsvariante.

Eines der am häufigsten eingesetzten Klassifizierungsverfahren ist die Untergliederung nach dem Push-Pull-Prinzip. Dabei werden Produktionssteuerungsverfahren danach unterschieden, ob Aufträge durch die Produktion geschoben (Push) oder

durch die Produktion gezogen (Pull) werden. Spearman et al. beschreiben den grundlegenden Unterschied, wonach Pull-Systeme den work in process (WIP) regeln und den Durchsatz messen und Push-Systeme den Durchsatz definieren, indem sie die Auftragsfreigabe regeln und den WIP messen (Spearman et al. 1989, S. 147-149). Jedoch besteht bisher kein allgemeingültiges Verständnis, da es Ansätze gibt, die sowohl Push- als auch Pull-Elemente vereinen (Spearman et al. 1990, S. 879; Grosfeld-Nir et al. 2002, S. 2559).

Ein weiteres Klassifizierungsverfahren stellt die Unterscheidung der Steuerungsverfahren in zentrale und dezentrale Verfahren dar (Scholz-Reiter et al. 2007, S. 713). Dabei werden die Steuerungsverfahren nach dem Ort ihrer Steuerungsentscheidungen unterschieden. Verfahren, bei denen eine zentrale Steuerungseinheit auf dezentral verteilte Steuerungsobjekte einwirkt, werden als zentral bezeichnet (Schulte 2009, S. 566). Bei Verfahren, deren Steuerungsmechanismus verteilt auf der Ebene der zu steuernden Objekte selber erfolgt, spricht man dagegen von dezentralen Steuerungsverfahren. (Willeke et al. 2017, S. 250) Dabei gilt, dass die Planungssicherheit und Planungsgenauigkeit zentraler Steuerungen maßgeblich von der Prognosegüte hinsichtlich z.B. der Auftragslage abhängt (Schukraft et al. 2015, S. 121–126).

Legt man die Regelungstheorie zugrunde, können die Ansätze der Produktionssteuerung basierend auf deren Regel- und Stellgrößen klassifiziert werden (Bild 11). Dabei werden die Verfahren häufig nach Auftragserzeugung, Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung, Kapazitätssteuerung sowie Material- und Informationsflussteuerung differenziert (Duffie et al. 2002, S. 379; Nyhuis et al. 2009, S. 239–241; Lödding 2010, S. 131–523; Niehues 2017, S. 21).

2.3.2 Verfahren der Auftragserzeugung und -freigabe

In der vorliegenden Arbeit werden die unterschiedlichen Verfahren nach zentralen sowie dezentralen, deren spezifischen Stell- und Regelgrößen und den Steuerungsaufgaben unterschieden (Tabelle 2). Eine Übersicht über bestehende Verfahren finden sich auch in (Wiendahl 1997, S. 258–357; Hochreiter 1999, S. 4–19; Arnold

2002, S. B3 26-40; Land 2004, S. 60–93; Lödding 2010, S. 131–523; Kienzle 2011, S. 22–35; Koether 2011, S. 87–167; Grinninger 2012, S. 121–141; Engelhardt 2015, S. 12–17; Niehues 2017, S. 19–21)

Tabelle 2: Übersicht der betrachteten Produktionssteuerungsverfahren

	Verfahren	Auftragsanzahlung	Auftragsfreigabe	Reihenfolgebildung	Kapazitätssteuerung	Material- und Informationsflusssteuerung
<i>Dezentral</i>	BOA		●			
	POLCA		●	●		●
	DFB		●			
	Kanban	●	●			●
	Push Kanban	●	●			●
	WLC		●			
	ALP		●	●		
	GPOLCA		●	●		●
	COBACABANA		●			●
	BGD		●			
<i>Zentral</i>	BBV	●	●			
	CONWIP		●			●
	Engpasssteuerung		●			●
	FSZ	●	●	●	●	
	MRP II	●	●	●	●	
	MRP					
	Basestock-Steuerung	●	●			

Die **Belastungsorientierte Auftragsfreigabe (BOA)**, wurde erstmals durch Bechte vorgestellt und durch Wiendahl zur Belastungsorientierten Fertigungssteuerung

rung (BOS-F) weiterentwickelt. Sie wird vorwiegend in der Einzel- und Kleinserienfertigung eingesetzt. Dabei wird durch Rückwärtsterminierung die sogenannte Liste dringender Aufträge ermittelt und in Abhängigkeit der Belastung einzelner Arbeitssysteme freigegeben. (Bechte 1984, S. 50-55; Wiendahl 1987b, S. 201–231, 1987a, S. 51–60; Koether 2011, S. 155–160)

Die von Suri entwickelte **Polca-Steuerung (Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorisation)** regelt paarweise den Bestand von Arbeitssystemen mithilfe paarspezifischer Polca-Karten. Dabei bezieht sich die Abkürzung „Polca“ auf die dezentralen Bestandsregelkreise zwischen den Arbeitssystemen. Arbeitssysteme, die über den Materialfluss direkt miteinander verbunden sind, bilden ein Paar. Jedem Paar werden Polca-Karten zugeordnet, die zur Bearbeitung von Aufträgen autorisieren. Damit ein Auftrag bearbeitet werden darf, muss eine entsprechende Polca-Karte verfügbar und zum anderen der Freigabezeitpunkt des Auftrags erreicht sein. (Suri 1998, S. 32–37; Lödding 2010, S. 407–410)

Die **DBF (Dezentrale bestandsorientierte Fertigungsregelung)** basiert auf dezentralen Bestandsregelkreisen zwischen den Arbeitssystemen der Produktion und ist eng an den Grundmechanismus der auf dem Arbeitssystem vorgelagerten Bestandsobergrenzen basierenden, dezentralen Bestandsregelung angelehnt. Dabei generiert ein zentrales PPS-System eine Liste dringlicher Aufträge. Die Auftragsfreigabe erfolgt für jeden Arbeitsvorgang dezentral, wobei der Bestand des jeweils folgenden Arbeitssystems entscheidend ist. (Lödding 2001, S. 47–65)

Die **Kanbansteuerung** ist einer der wesentlichsten Bestandteile des Toyota-Produktionssystems (Ōno 2005, S. 65-68). Die Kanbansteuerung beruht auf dem Prinzip, dass an einem Arbeitssystem ein Teil oder eine Variante immer dann nachproduziert wird, wenn die nachgelagerte Bestandsuntergrenze der Variante unterschritten wird. Dadurch werden eine Mindestlieferzeit und ein selbstregelnder Produktionsfluss implementiert. Aufgrund der japanischen Erfolge wird die Kanbansteuerung

seit den 1980er-Jahren sowohl in den USA als auch in Europa eingesetzt. Die Kanbansteuerung ist mittlerweile das neben der MRP-Steuerung am meisten verbreitete Steuerungssystem in der Industrie (Jodlbauer 2007, S. 191).

Die **Push-Kanbansteuerung** basiert grundlegend auf der Kanbansteuerung, wobei die Aufträge nicht durch die Produktion „gezogen“, sondern geschoben werden. Die Idee besteht darin, den Informationsträger Kanban zur Informationsflusssteuerung einzusetzen und damit die Vorteile, in Form von Visualität, Praktikabilität und Transparenz, auch für komplexe und turbulente Fertigungstypologie nutzbar zu machen. Dazu werden die Bestandsobergrenzen der „Dezentralen Bestandsregelung“ durch Zeitkanbans abgebildet und durch Regelkreise miteinander verknüpft. So entsteht ein vorwärtsorientiertes Kanbanregelkreisnetz, das den Materialfluss vollständig flexibel abbilden kann. (Kienzle 2011, S. 77)

Das Verfahren **WLC (Workload Control)** entspricht in seiner Arbeitsweise der BOA, wenn auch auf eine Abzinsung der Auftragszeiten verzichtet wird. Die Grundidee des Verfahrens liegt darin, dass Aufträge zurückgehalten werden, die bereits überlastete Arbeitssysteme durchlaufen würden. Entscheidungskriterium ist in diesem Zusammenhang der Bestand der Arbeitssysteme, wobei auch die Arbeitsinhalte von bereits freigegebenen Aufträgen berücksichtigt werden. (Lödding 2010, S. 355–373; Thürer et al. 2012, S. 939–953)

Die **GPOLCA (Generic Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization)** ist eine Weiterentwicklung der POLCA-Steuerung bezüglich stark variierender Nachfrage. Die Grundidee des Verfahrens besteht darin, dass jeder Arbeitsstation eine begrenzte Anzahl an Auftragskanbans zugeordnet wird und Aufträge erst dann freigegeben werden, wenn alle notwendigen Auftragskanbans zur Verfügung stehen. (Fernandes et al. 2006, S. 74–84)

Die **COBACABANA-Steuerung (Control of Balance by Card-based Navigation)** basiert auf dem Prinzip des Workload Control und realisiert kartenbasiert die belas-

tungsorientierte Auftragsfreigabe. Es wird ein Kartentyp pro Produktionsstufe verwendet, wobei die Karten die Kapazität beschreiben. (Land 2008, S. 99; Thüerer et al. 2015, S. 144)

Das **BBV (Bestellbestandsverfahren)** erzeugt Aufträge auf Basis eines Mindestbestands. Sofern der Fertigbestand diesen Mindestbestand unterschreitet, werden neue Aufträge zu Anpassung des Bestandsniveaus freigegeben. (Lödding 2010, S. 147–160)

Die **CONWIP-Steuerung (Constant Work in Process)** ist eine Weiterentwicklung der Kanban-Steuerung und wurde maßgeblich von Spearman und Hopp geprägt. Die Grundidee des Verfahrens ist es, das Bestandsniveau einer Produktion oder Produktionslinie konstant zu halten. Dies wird erreicht, indem die CONWIP-Steuerung einen Auftrag erst freigibt, wenn der Bestand der Produktionslinie die Bestandsgrenze unterschreitet. (Spearman et al. 1990, S. 879–892)

Die Grundidee der Engpasssteuerung beruht darauf, dass eine Kette nur so stark ist wie ihr schwächstes Glied. Auslastungsverluste im Engpass-Arbeitssystem führen zu Leistungsverlusten der gesamten Produktionslinie. Daher beruht die Engpasssteuerung auf dem Prinzip, dass ein neuer Auftrag für die Produktion erst freigegeben wird, wenn das Engpass-Arbeitssystem einen Auftrag fertiggestellt hat. (Lödding 2010, S. 334–354)

Das Verfahren der **FSZ-Steuerung (Fortschrittszahlen)** kombiniert das langfristige Ressourcenmanagement mit dem kurzfristigen Termin- und Materialmanagement und wird seit Jahrzehnten in der Automobilindustrie angewendet. Die Fortschrittszahlensteuerung teilt eine Produktion in frei wählbare Kontrollblöcke auf. Die an Termine gekoppelten Sollmengen dienen den einzelnen Bearbeitungsprozessen in Form von Fortschrittszahlen als Richtgröße zur Überwachung ihres stückzahlbezogenen Produktionsfortschritts. (Heinemeyer 1992, S. 161–185)

Die Grundidee des **MRP-Konzepts (Material Requirements Planning)** ist es, dass vom Bruttobedarf an Fertigprodukten, basierend auf der Plan-Durchlaufzeit und der

Stückliste, eine Rückwärtsterminierung für alle Materialien vorzunehmen. Die Planung erfolgt dabei „top-down“ und sukzessiv nach hierarchischen Planungsstufen. Das **MRP-II-Konzept** wiederum ist die Erweiterung des MRP-Konzeptes um die Kapazitätsplanung. Darin wird durch eine Gegenüberstellung von Kapazitätsnachfrage und -angebot an den einzelnen Arbeitssysteme ein Kapazitätsabgleich durchgeführt. Das Ergebnis eines MRP-Laufs sind terminierte Produktionsaufträge. (Wiendahl 2014, S. 279)

Die Grundidee der **Basestock-Steuerung** liegt darin, die Nachfrage des Endkunden unmittelbar an alle Arbeitssysteme der Fertigung weiterzuleiten. Dort wird daraufhin die Nachfertigung der entsprechenden Variante freigegeben. Für jedes Arbeitssystem und jede Variante wird ein Grundbestand (Basestock) definiert, die aus den Plan-Beständen abgeleitet werden können. Dabei wird dem Materialfluss entgegen vorgegangen. Somit stellen die Plan-Bestände die wesentlichen Verfahrensparameter dar. (Lödding 2010, S. 273)

2.3.3 *Verfahren der Kapazitätssteuerung*

Die Kapazitätssteuerung verfolgt die Anpassung des Kapazitätsangebots an den vorliegenden Kapazitätsbedarf. In diesem Zusammenhang können die zwei grundlegenden Ansätze der Rückstandsregelung sowie der Leistungsmaximierenden Kapazitätssteuerung unterschieden werden.

Ziel der **Leistungsmaximierenden Kapazitätssteuerung** ist die optimale Auslastung der Fertigungsengpässe. Dabei wird im Gegensatz zur Engpasssteuerung nicht die Belastung der Engpassarbeitssysteme selber, sondern die Kapazität des engpassvorgelagerten Fertigungsabschnitts gesteuert. So soll eine leistungsmaximale Versorgung der Engpassarbeitssysteme erzielt werden. (Lödding 2010, S. 511)

Die **Rückstandsregelung** misst den zeitlichen oder mengenmäßigen Produktionsrückstand an einem Steuerungsobjekt in Abhängigkeit der Planparameter. In Abhängigkeit der gemessenen Differenz wird die Kapazität des Steuerungsobjekts als

Stellgröße angepasst. Voraussetzung für ihre Anwendung ist eine ausreichende Kapazitätsflexibilität und eine aussagefähige Rückstandsmessung. (Lödding 2010, S. 479–497)

2.3.4 Verfahren der Reihenfolgebildung

Die Reihenfolgebildung definiert, welcher Auftrag in der Warteschlange vor einem Arbeitssystem als nächstes bearbeitet werden soll. Dazu priorisiert sie jeden Auftrag nach definierten Kriterien. Der Auftrag mit der höchsten Priorität ist am dringendsten und wird als erstes bearbeitet. Primäre Aufgabe der Reihenfolgebildung ist es, die Ist-Reihenfolge der Aufträge an die Plan-Reihenfolge anzupassen, um so eine hohe Termintreue sicherzustellen. (Lödding 2010, S. 443)

In der Literatur kann eine Vielzahl von Verfahren zur Priorisierung von Fertigungsaufträgen identifiziert werden (Tabelle 3).

Im Rahmen der FIFO-Regel werden die Fertigungsaufträge in ihrer Ankunftsreihenfolge abgearbeitet.

Die FPS-Regel priorisiert den Auftrag mit dem frühesten Plan-Starttermin am jeweiligen Arbeitssystem.

Tabelle 3: Ausgewählte Verfahren der Reihenfolgebildung

<i>Verfahren</i>	<i>Prioritätskriterium</i>	<i>Logistisches Ziel</i>
First In First Out (FIFO)	Eingangsreihenfolge	Termintreue
Frühester Plan-Starttermin (FPS)	Dringlichster Vorgangstermin	Termintreue
Frühester Plan-Endtermin (FPE)	Dringlichster Liefertermin	Termintreue
Geringster Restschlupf	Geringste Restschlupf	Termintreue
Kürzeste Durchlaufzeit	Kürzeste Durchlaufzeit	Durchlaufzeit

Die FPE-Regel weist dem Auftrag mit dem frühesten Plan-Endtermin am jeweiligen Arbeitssystem die höchste Priorität zu und unterscheidet sich nur in bestimmten Fällen von der FPS-Regel.

Die Schlupfzeitregel priorisiert den Auftrag mit dem geringsten Schlupf, wobei der Schlupf die Zeitdauer bis zum Plan-Fertigstellungstermin des Auftrags, die nicht für die Bearbeitung oder für eventuelle Mindestübergangszeiten benötigt wird, definiert. (Lödding 2010, S. 446–447)

Bei dem Verfahren der kürzesten Durchlaufzeit werden die Fertigungsaufträge anhand ihrer Durchlaufzeit priorisiert (Seitz 1962, S. 167–192).

In der Literatur existieren weitere Ansätze zur Produktionssteuerung, die in der vorliegenden Arbeit nicht detaillierter betrachtet werden sollen. Dazu zählen unter anderem die Verfahren der Material- und Informationsflussteuerung (Kienzle 2011, S. 33) oder auch Ansätze hinsichtlich der Modularisierung und adaptiver Produktionssteuerungen (Engelhardt 2015, S. 39–41).

2.3.5 Dezentrale und automatisierte Produktionssteuerung

Eines der großen Ziele von Industrie 4.0 liegt in der Reduktion der Stückkosten, um so die Rentabilität von Unternehmen zu steigern (Schuh et al. 2014, S. 53). Darüber hinaus sollen die Produktionssysteme flexibler auf Kundenwünsche reagieren können, was zu geringen Losgrößen führt und somit zusätzlich die Komplexität erhöht (Dombrowski et al. 2014, S. 101). Um diese zunehmende Komplexität beherrschen zu können, werden zunehmend Produktionsstrukturen dezentralisiert, automatisiert und autonomisiert (Bauernhansl 2017, S. 10).

Der Ansatz, die Steuerung der Produktion zu dezentralisieren, ist dabei nicht neu. Wie die Analyse der Steuerungsverfahren zeigt, wurden solche Ansätze schon vor vielen Jahren untersucht. Die Motivation lag darin, dass die Struktur von zentralen Steuerungsansätzen in einer frühen Phase des Designs festgelegt wird und Änderungen zu einem späteren Zeitpunkt nur schwer möglich sind (Meissner et al. 2017, S. 168).

Im Kontrast zu zentralen Ansätzen wird bei dezentralen Ansätzen die Fähigkeit, Entscheidungen zu treffen, von einer zentralen Kontrolleinheit auf die Elemente des Produktionssystems übertragen. Dazu müssen die einzelnen Elemente mit Hilfe der

nötigen Informationen befähigt werden, diese zu verarbeiten und zu bewerten. Dies führt zu verkürzten Entscheidungswegen und verkürzten Reaktionszeiten. Dezentrale Entscheidungsfindung benötigt aufgrund des begrenzten Umfangs der Entscheidungen der einzelnen Elemente weniger Rechenkapazität und eignet sich demnach am besten für hochdynamische Systeme, bei denen häufig Korrekturen erforderlich sind (Hülsmann et al. 2011, S. 111). Schnelle Reaktionen verbessern dabei die Stabilität von Plänen und Lieferterminen (Meissner et al. 2017, S. 168). Trotz dieser Vorteile weisen dezentrale Steuerungssysteme auch Nachteile auf. Eines der größten Probleme entsteht dabei durch mögliche Zielkonflikte zwischen einzelnen Elementen, da jedes von ihnen seine eigenen Ziele verfolgt (Franke et al. 2010, S. 1076).

In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus darauf, ein System zu entwickeln, das selbstständig handelt, komplexe Aufgaben löst und auf unvorhersehbare Ereignisse automatisiert reagiert.

2.4 Energieflexibilität

Eine der großen Herausforderungen bei der Etablierung einer nachhaltigen Energieversorgung ist die Volatilität auf Seiten vieler erneuerbarer Energiequellen. Wird die Stromversorgung, wie im Energiekonzept der Bundesregierung vorgesehen, bis 2050 überwiegend auf erneuerbare Energien umgestellt, muss ein System geschaffen werden, das die zunehmend fluktuierende Erzeugung ausgleichen kann (Elsner et al. 2015, S. 11–13). Um das Energiesystem in einem ständigen Gleichgewicht zu halten, bedarf es voraussichtlich großer Mengen an Energiespeicherkapazitäten sowie einer steigenden Anzahl von Regelungseingriffen auf der Erzeugerseite (BDEW 2019b, S. 4). Zur Reduktion der erforderlichen Investitionen wird ein Paradigmenwechsel im Energiesystem angestrebt: Weg von einer zentralen, verbrauchsorientierten Erzeugung, hin zu einem Zusammenspiel aus dezentraler, fluktuierender Erzeugung, Speichern und flexiblem Verbrauch (Canzler 2018, S. 461).

2.4.1 *Definition Energieflexibilität*

Der klassische Modus Operandi des Energiesystems ist unidirektional und top-down. Großkraftwerke speisen Energie in das Versorgungsnetz und halten Erzeuger- und Verbraucherseite zu jedem Zeitpunkt in Balance. Dieses Gleichgewicht zu gewährleisten, wird im Rahmen einer zunehmenden Dezentralisierung und Fluktuation in der Energieerzeugung zu einer immer komplexeren und hochdynamischen Aufgabe.

Die Verbraucherseite aktiv mit in die Balance des Energiesystems einzubeziehen, ist kein grundsätzlich neuer Ansatz. Der Begriff des Demand Side Management (DSM) wurde Anfang der 1980er-Jahre in den USA geprägt und findet im Zuge der Energiewende auch im deutschsprachigen Raum verstärkten Gebrauch. DSM liegt die Annahme zugrunde, dass es kostengünstiger ist, eine Last intelligent zu beeinflussen, als ein neues Kraftwerk zu bauen oder Energiespeicher zu installieren. (Palensky et al. 2011, S. 381–382)

DSM umfasst dabei die Planung, die Implementierung und das Monitoring von Effizienz- und Flexibilitätsmaßnahmen auf der Verbraucherseite zur Änderung des Lastprofils des Verbrauchers (Kreith et al. 2007, S. 2–23).

Dabei wird Flexibilität in einem zunehmend turbulenten Marktumfeld zu einem immer wichtigeren Stellhebel. Aufgrund der zunehmenden Komplexität der Produktionsaufgaben und der kontinuierlichen Zunahme von Produktvarianten befinden sich Produktionssysteme in einem Umfeld, das von großer Unsicherheit geprägt ist (Abele et al. 2007, S. 87). Diese Unsicherheit stellt produzierende Unternehmen vor große Herausforderungen und enthält hohe Risiken. Um sich an solche Unsicherheiten anpassen zu können, benötigen Unternehmen eine ausreichende Flexibilität. Energieflexibilität kann in diesem Zusammenhang – *„als die Fähigkeit, sich schnell und mit sehr geringem Aufwand an Änderungen des Energiemarktes anzupassen“* – beschrieben werden (Reinhart et al. 2012, S. 623; GraBl 2015, S. 27). Energieflexibilität ist somit ein Weg, um mit diesen Unsicherheiten hinsichtlich des Faktors Energie umzugehen.

Dabei können Maßnahmen zur flexiblen Anpassung des Energieverbrauchs an Signale aus dem Energiemarkt in Abhängigkeit von Steuerungsgranularität und Netzinteraktion beschrieben werden (Bild 12).

Die Basis bilden Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz. Sie umfassen alle dauerhaften Systemoptimierungen zur Steigerung der Energieproduktivität und reichen vom Austausch von Querschnittstechnologien bis hin zur Optimierung des Energiebezugs auf Maschinenkomponentenebene.

Der kostenorientierte Nutzungszeitraum, auch Time-of-Use (TOU) genannt, beschreibt eine tageszeitabhängige Preisgestaltung über weite Stundenblöcke (z.B. On-Peak = sechs Stunden für den Sommer-Wochentagnachmittag; Off-Peak = alle anderen Stunden in den Sommermonaten). Die Preise werden dabei für jeden Zeitraum vorgegeben und bleiben konstant. (Qiu et al. 2018, S. 418)

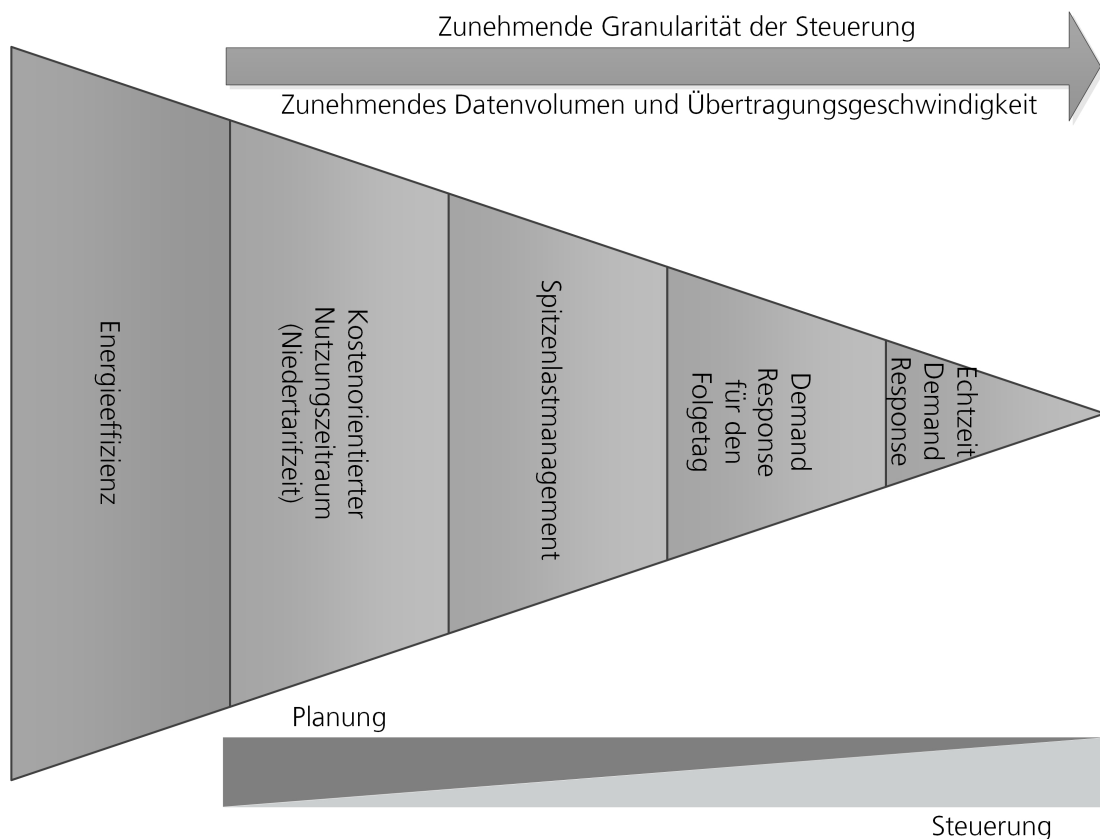


Bild 12: Ebenen des Demand Side Management in Anlehnung an (Palensky et al. 2011, S. 382; Samad et al. 2012, S. 80)

Spitzenlastmanagement, auch Daily Peak Load Management oder auch Critical Peak Pricing (CPP) genannt, ist eine ereignisbasierte Erweiterung der TOU-Systems. Dabei werden die Preise für den Stromverbrauch während der Spitzenzeiten an ausgewählten Tagen variiert. Eine CPP-Periode wird vorzeitig angekündigt, in der Regel einen Tag vorab. (Wang et al. 2016, S. 44; Yang et al. 2018, S. 1066)

Von Roon und Grobmaier definieren Demand Response als *„eine kurzfristige und planbare Veränderung der Verbraucherlast als Reaktion auf Preissignale im Markt oder auf eine Aktivierung im Rahmen einer vertraglichen Leistungsreserve. Diese Marktpreise oder Leistungsabrufe werden durch ungeplante, unregelmäßige oder extreme energiewirtschaftliche Ereignisse ausgelöst.“* (Roon et al. 2010, S. 2)

Im Wesentlichen wird Demand Response in die beiden Bereiche anreiz- und preisbasiert untergliedert: (Deng et al. 2015, S. 572; Yu et al. 2015, S. 879)

- Bei anreizbasierten Programmen erhalten die Verbraucher für eine positive oder negative Laständerung eine Vergütung, die zusätzlich und unabhängig zum Energiepreis ist.
- Preisbasierte Programme bieten den Nutzern zeitabhängig variable Energiepreise. Die Idee besteht darin, dass die Verbraucher dynamisch ihre Energieverbrauchsmuster entsprechend der Varianz der Strompreise anpassen, anstatt ihre Lasten durch externe Regelungseingriffe beeinflussen zu lassen.

Im deutschsprachigen Raum wird synonym zu den Begriffen des Demand Side Management und des Demand Response der Begriff des Lastmanagements verwendet (Klobasa 2009, S. 27; DENA 2012, S. 8–9). In dieser Arbeit wird der Begriff synonym zur Definition des Demand Response nach von Roon und Grobmaier verwendet.

2.4.2 **Energieflexibilitätsmaßnahmen**

Eine Flexibilitätsmaßnahme ist eine *„bewusste Aktion zur Durchführung eines definierten Zustandswechsels“* (Graßl 2015, S. 56) in einem Produktionssystem. Sie umfasst den Zustandswechsel einer Produktionsstation und die damit verbundenen Wechselwirkungen im Produktionssystem (Reinhart et al. 2014, S. 314). In diesem

Zusammenhang können neun Kategorien von Flexibilitätsmaßnahmen unterschieden werden (Graßl et al. 2014, S. 130; Graßl 2015, S. 59):

- der Wechsel des Energieträgers, z.B. von Strom zu Gas und umgekehrt
- der Einsatz von Energiespeichern
- die Unterbrechung des Produktionsprozesses
- die Änderung der Produktionsreihenfolge
- das Verschieben von Auftragsstarts
- das Anpassen der Maschinenbelegung
- das Anpassen von Prozessparametern
- das Anpassen von Schichtzeiten
- das Verschieben von Pausenzeiten

Ziel einer Flexibilitätsmaßnahme ist dabei die aktive Änderung des Leistungs- und Energiebezugs. Die Leistungsänderung kann sowohl positiv sein, was aus Sicht des Energienetzes negativer Regelleistung entspricht, als auch negativ, was aus Sicht des Energienetzes positiver Regelleistung entspricht. Aus Unternehmenssicht lassen sich drei Arten der Laständerung unterscheiden: (Langrock et al. 2015, S. 44)

- Der Lastverzicht ist eine Reduktion der Leistungsaufnahme im Vergleich zum Referenzbetrieb. Lastverzicht kann sowohl eine verringerte Leistungsaufnahme als auch das vollständige Ausschalten sein, bei dem es keinen Lastnachholbedarf gibt.
- Die Lasterhöhung entspricht einer Erhöhung der Leistungsaufnahme im Vergleich zum Referenzbetrieb ohne Lastnachholbedarf.
- Bei der Lastverschiebung ist eine temporär erhöhte oder verringerte Leistungsaufnahme mit jeweiligem Lastnachholbedarf gegeben.

Die zeitlichen Eigenschaften einer Laständerung im Sinne der Energieflexibilität sind für eine vollständige Beschreibung essenziell. In diesem Zusammenhang können eine Vielzahl von Zeitintervallen zur Beschreibung von Energieflexibilität differenziert werden (Bild 13).

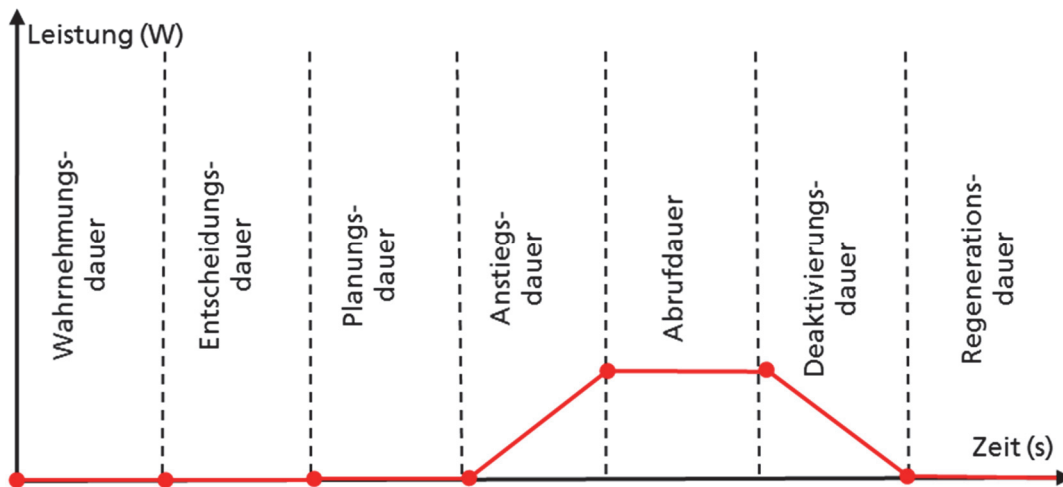


Bild 13: Zeitintervalle zur Beschreibung einer Flexibilitätsmaßnahme nach (Eisenhauer et al. 2018, S. 5)

Die Wahrnehmungsdauer beschreibt das Zeitintervall, welches „vom Eintritt bis zur Wahrnehmung einer Umweltveränderung vergeht“ (Hernández Morales 2003, S. 49).

Die Entscheidungsdauer gibt die Zeit an, die von der Wahrnehmung einer Umweltveränderung bis zur Entscheidung für eine Flexibilitätsmaßnahme vergeht. (Hernández Morales 2003, S. 48)

Die Planungs-dauer charakterisiert die benötigte Zeitspanne von der Entscheidung zur Notwendigkeit einer Flexibilitätsmaßnahme bis zur Beendigung aller damit einhergehenden planerischen Tätigkeiten im Prozess- und Fertigungsablauf. (Hernández Morales 2003, S. 48)

Die Anstiegsdauer definiert die Zeitspanne von Einsetzen der Laständerung bis zum Erreichen des gewünschten Laständerungsniveaus. (Langrock et al. 2015, S. 204)

Die Abrufdauer beschreibt die minimale und maximale Zeitspanne von der vollständig ausgebildeten Laständerung bis zum Beginn der Deaktivierung der Flexibilitätsmaßnahme. (Langrock et al. 2015, S. 204)

Die Deaktivierungsdauer umfasst das Zeitintervall vom Beginn der Deaktivierung einer zuvor vollständig ausgebildeten Flexibilitätsmaßnahme bis zur Rückkehr zum Ausgangsniveau. (Langrock et al. 2015, S. 223)

Die Regenerationsdauer ist die Zeitspanne, die vergehen muss, um nach der Deaktivierung einer Flexibilitätsmaßnahme diese wieder durchführen zu können. (Graßl 2015, S. 22)

Zusätzlich zu den Zeitparametern sollte die zugelassene Abrufhäufigkeit der Nutzung einer Flexibilitätsmaßnahme pro Jahr erfasst werden. Die Abrufhäufigkeit ist zusammen mit der Abrufdauer und der flexibilisierbaren Leistung ausschlaggebend für die Ermittlung der flexibilisierbaren Energie für einen gewählten Betrachtungszeitraum. Weiterhin ermöglicht die Kenntnis der Abrufhäufigkeit eine Umlage von Investitionen auf die einzelne Durchführung einer Flexibilitätsmaßnahme.

Zur Quantifizierung der Kosten, welche durch die Bereitstellung oder Durchführung einer Flexibilitätsmaßnahme entstehen, werden nur zusätzlich entstehende Aufwendungen betrachtet. Die im regulären Betrieb anfallenden Kosten werden hierbei nicht berücksichtigt. (Eisenhauer et al. 2018, S. 5)

Die Kosten der Flexibilität können in zwei Bereiche untergliedert werden (Graßl 2015, S. 23). Einerseits müssen Investitionen getätigt werden, um das Flexibilitätspotenzials zu erschließen. Diese befähigen das vorhandene Produktionssystem, die Leistungsaufnahme gezielt zu verändern und ermöglichen es damit, eine energetische Flexibilität abzurufen. (Eisenhauer et al. 2018, S. 5)

Andererseits entstehen Kosten bei der Durchführung der Flexibilitätsmaßnahme. Diese sind stets der jeweiligen Flexibilitätsmaßnahme zugeordnet. Sie müssen zeitlich und organisatorisch in direktem Zusammenhang zu der entsprechenden Flexibilitätsmaßnahme stehen und können daher einem Zeitparameter zugeordnet werden. (Eisenhauer et al. 2018, S. 6)

Diese Arbeit fokussiert im Folgenden auf die prozessabhängigen Flexibilitätsmaßnahmen „Unterbrechung des Produktionsprozesses“ und „Anpassen von Prozessparametern“. Diese Maßnahmen gehen mit einer Änderung des Betriebszustands des Prozesses einher. Vor diesem Hintergrund werden mehrere verschiedene Standardzustände des Prozesses im Rahmen dieser Arbeit unterschieden (Tabelle 4).

Tabelle 4 Standard Prozesszustände nach (Haag 2013, S. 75–76)

<i>Zustand</i>	<i>Definition</i>
Work	Ressource in Betrieb / Online
Warm-UP	Ressource fährt an / Warmlauf / Hochlauf des Systems
Wait	Ressource wartet auf Systemeingabe
Block	Ressource blockiert
Error	Unterbrechung des Betriebs / Fehler / Störung
Setup	Ressource wird eingerichtet / umgerüstet / konfiguriert
Off/Standby	Ressource außer Betrieb / Offline / Standby
Save	Energiesparmodus

2.4.3 *Energiewirtschaft und -versorgung*

Die Elektrizitätswirtschaft produziert, handelt und verteilt elektrische Energie. Das Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) bildet die regulatorische Grundlage der Elektrizitätswirtschaft und dient der:

- „möglichst sicheren, preisgünstigen, verbraucherfreundlichen, effizienten und umweltverträglichen leitungsgebundenen Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität und Gas, die zunehmend auf erneuerbaren Energien beruht.“ (EnWG 2005, S. 1)
- „Sicherstellung eines wirksamen und unverfälschten Wettbewerbs bei der Versorgung mit Elektrizität und Gas und der Sicherung eines langfristig angelegten, leistungsfähigen und zuverlässigen Betriebs von Energieversorgungsnetzen.“ (EnWG 2005, S. 1)
- „Umsetzung und Durchführung des Europäischen Gemeinschaftsrechts auf dem Gebiet der leitungsgebundenen Energieversorgung.“ (EnWG 2005, S. 1)

Die Versorgung mit elektrischer Energie ist ein komplexes Geflecht, das auf physikalischer Ebene Erzeuger und Verbraucher über Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetze verbindet. Dem überlagert findet sich auf organisatorischer Ebene wiederum ein Zusammenspiel unterschiedlicher Rollen, die vertraglich zueinander gebunden sind (Bild 14).

Bei den Netzbetreibern wird zwischen Übertragungs- und Verteilnetzbetreibern unterschieden. Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) betreiben Höchstspannungsnetze mit Spannungen von 380 kV sowie 220 kV und sind über Netzkuppelleitungen zum deutschen Verbundnetz zusammengeschlossen. Sie tragen die Verantwortung für die Spannungs- und die Frequenzhaltung, dem Versorgungswiederaufbau und dem Ausgleich von Fahrplanabweichungen in ihrer Regelzone. Verteilnetzbetreiber (VNB) betreiben Netze von 110 kV abwärts und versorgen die Endkunden und Weiterverteilern mit Strom. Sie tragen die Verantwortung für den Netzbetrieb und dürfen dabei keinerlei Stromlieferanten- oder Händlerfunktionen ausüben. (Konstantin 2009, S. 56)

Erzeuger setzen sich aus Verbundunternehmen mit eigenem Kraftwerkspark, unabhängige Stromerzeuger und Kleinproduzenten zusammen. Sie produzieren und liefern Strom an Händler und Großkunden. (Konstantin 2009, S. 43)

Bilanzkreise sind ein zentraler Bestandteil des liberalisierten Strommarktes wie wir ihn heute kennen. Einspeisungen und Entnahmestellen müssen jeweils eindeutig einem Bilanzkreis zugeordnet werden, wobei Stromkunden durchaus mehrere Entnahmestellen haben können. Lieferanten können mehreren Bilanzkreisen angehören, aber auch in jeder Regelzone, in die sie liefern, einen eigenen Bilanzkreis bilden. Dabei muss jeder Bilanzkreis immer vollständig innerhalb einer Regelzone liegen. Ein Bilanzkreis muss darüber hinaus einen Bilanzkreisverantwortlichen (BKV) stellen, der garantiert, dass der Verbrauch ausbalanciert wird. (Heuck et al. 2013, S. 493–495)

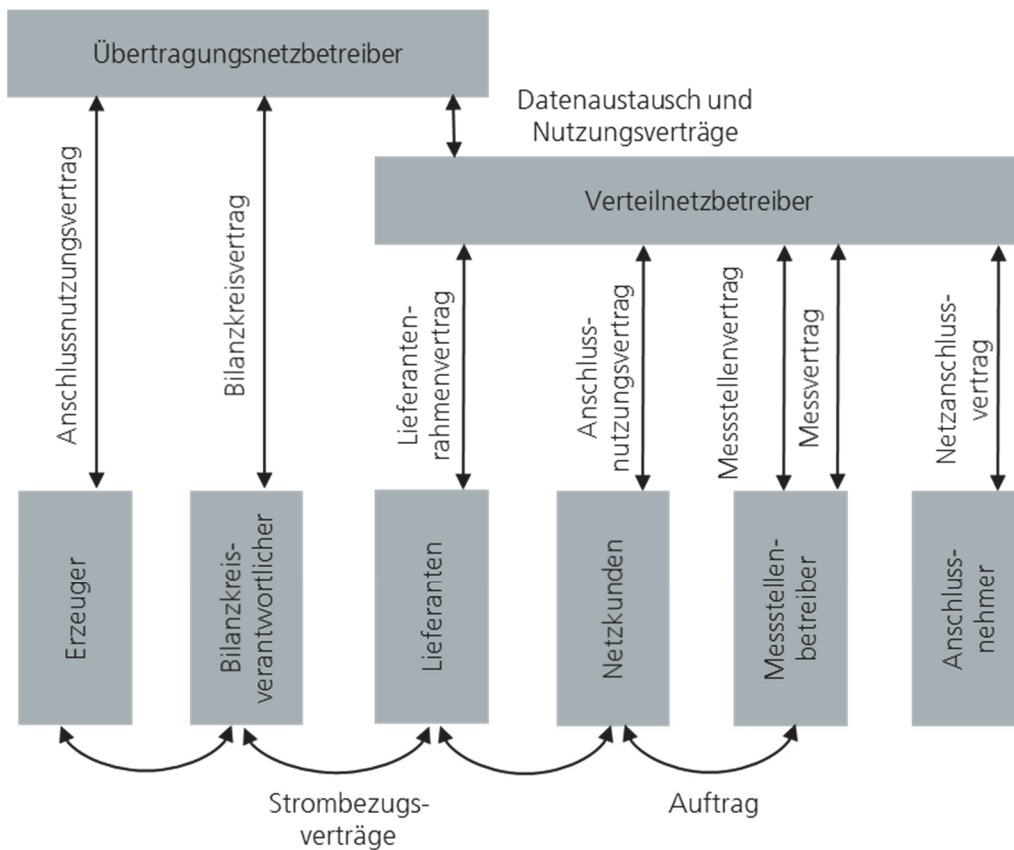


Bild 14: Elektrizitätswirtschaftliche Vertragsbeziehungen nach (Heuck et al. 2013, S. 494)

Lieferanten können sowohl Kraftwerksbetreiber oder Händler sein, die überall in Deutschland Energie einkaufen und an Netzkunden weiterverkaufen dürfen. Lieferanten sind gegenüber den Übertragungsnetzbetreibern bilanzkreisverantwortlich. Diese müssen u.a. Fahrpläne für ihre Entnahme und Einspeisestellen im ¼-Stunden-takt an den Bilanzkoordinator der entsprechenden Regelzone liefern. (Konstantin 2009, S. 54–55)

Bisher nimmt die industrielle Produktion die Rolle des Verbrauchers im System ein. Doch zunehmend agieren diese auch als Erzeuger, bilden einen eigenen Bilanzkreis und nehmen aktiv als Händler an der Energiebörse teil.

2.4.4 *Industriestrompreis*

Energiepreise sind für viele Unternehmen ein Stellhebel zur Wahrung ihrer Wettbewerbsfähigkeit. Um die Energiewende in Deutschland zu finanzieren, werden die

Kosten insbesondere über die Strompreise auf die Endverbraucher umgelegt. Eine große Zahl von Steuern und Umlagen erhöht den Strompreis und damit die Stromkosten der Industrie. In diesem Zusammenhang hat die Bundesregierung unterschiedliche Ausnahmeregelungen eingeführt, damit die energieintensive Industrie ihre Wettbewerbsfähigkeit am Produktionsstandort Deutschland aufrechterhalten kann. (Lutz et al. 2015, S. 1)

Der Strompreis, den die Endverbraucher Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistung und Industrie bezahlen, setzt sich aus unterschiedlichen Komponenten zusammen (Tabelle 5).

Tabelle 5: Übersicht der Strompreiskomponenten für Deutschland nach (Grave et al. 2015, S. 4)

<i>Strompreiskomponenten</i>	
Erzeugungskosten	Großhandelspreis (Strombörse EEX)
	ETS-Kosten (Zertifikate)
Netznutzungskosten	Netzentgelte (Netzbetreiber, Messstellenbetrieb, Messung und Abrechnung)
	Konzessionsabgabe
Steuern	Stromsteuer
Umlagen und Quoten	EEG-Umlage
	Haftungsumlage (offshore Wind)
	KWK-Umlage
Sonstige Komponenten	Mehrwertsteuer

Je nach Vergünstigungen, die für ein Unternehmen in der Kategorie des Abnahmefalls von 24 GWh pro Jahr maximal möglich sind, ergeben sich stark unterschiedliche Belastungen, durch nicht vom Lieferanten beeinflussbare Preisbestandteile. Der Gesamtpreis betrug 2017 ohne Umsatzsteuer im Mittel 15,30 Cent pro Kilowattstunde für den Abnahmefall von 24 GWh pro Jahr ohne Vergünstigungen. Die Umlagen beliefen sich auf insgesamt 7,08 ct/kWh, wovon die EEG-Umlage 6,79 ct/kWh betrug. Der vom Lieferanten beeinflussbare Preisbestandteil lag bei 3,71 Cent pro Kilowattstunde und setzt sich zusammen aus Beschaffung, Vertrieb und Marge. Die Nettonetzentgelte betragen 2,33 Cent pro Kilowattstunde, die Messungen und der Messstellenbetrieb 0,03 Cent pro Kilowattstunde, die Konzessionsabgabe 0,10 Cent pro Kilowattstunde und die Stromsteuer 2,05 Cent pro Kilowattstunde. (Bundesnetzagentur 2018, S. 271–275)

Das Kleingewerbe hat ähnliche Stromtarife wie die Haushalte. Großverbraucher erhalten Sondertarife, die jeweils individuell ausgehandelt werden können. Ein solcher Tarif beinhaltet unter anderem (Müller et al. 2009, S. 96):

- den Grundpreis für den Anschluss, die Verbrauchsmessungen, die Miete eines Transformators etc.,
- den Arbeitspreis, der getrennt für den Verbrauch z.B. zu Hochtarif- und Niedertarifzeiten berechnet werden kann,
- der Leistungspreis, der in Abhängigkeit eines bestimmten Intervalls (z. B. ein Jahr oder ein Monat) und der maximale bezogenen Leistung (gemittelt über 15 Minuten) berechnet wird,
- der Blindleistungsbedarf, der oft in Abhängigkeit der Wirkleistung berechnet wird.

Bild 15 zeigt die Entwicklung der unterschiedlichen Strompreiskomponenten im Intervall von 2014 bis 2019.

Jahresverbrauch 160.000 bis 20 Mio. kWh
(Mittelspannungsseitige Versorgung; Abnahme 100kW/1.600h bis
4.000kW/5.000h)

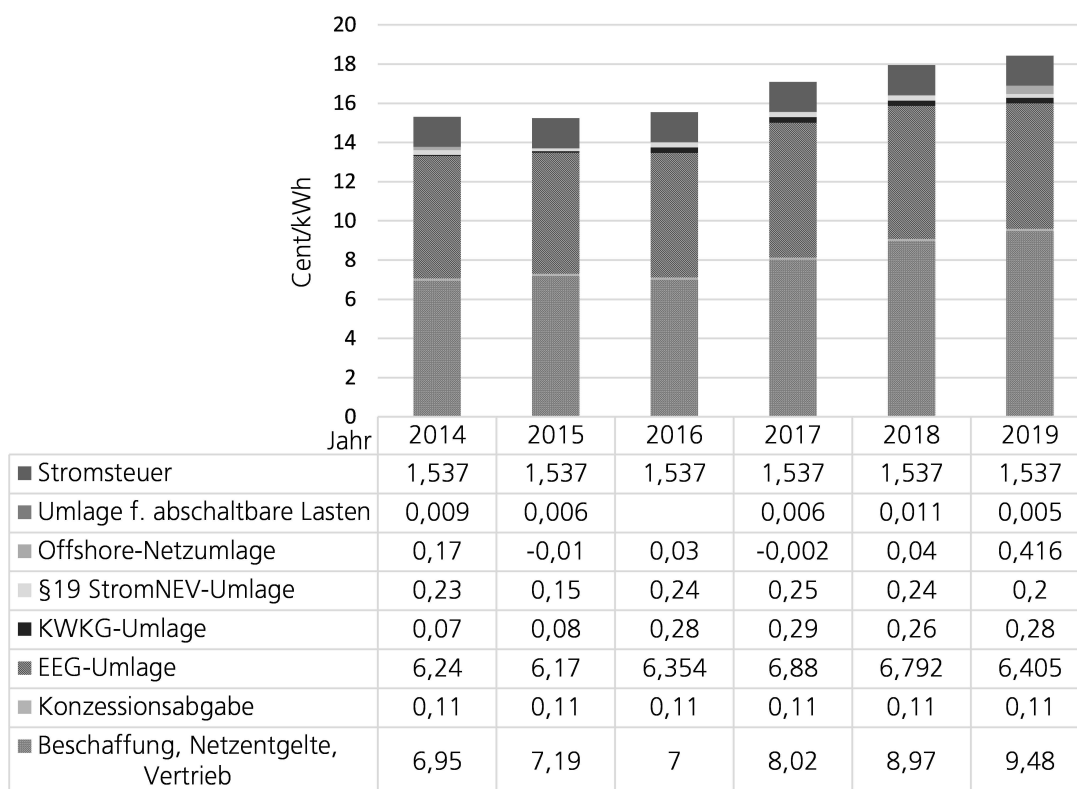


Bild 15 Entwicklung der Industrie-Strompreis-Bestandteile in Deutschland nach (BDEW 2020, S. 24)

Energieflexibilität kann in diesem Zusammenhang eingesetzt werden, um den Beschaffung und Netzentgelte zu reduzieren. Darüber hinaus kann die energetische Flexibilität eingesetzt werden, um die benötigte elektrotechnische Infrastruktur wie Transformatoren, Schalt- und Schutzelemente oder energetische Speicher zu reduzieren.

2.4.5 Märkte für Energieflexibilität

In Deutschland existieren bereits heute unterschiedliche Märkte, um industrielle Energieflexibilität zu vermarkten. Dabei kann zwischen anreizbasierten und preisbasierten Märkten unterschieden werden (vgl. Kapitel 2.4.1).

Der Energy-Only-Markt kann den preisbasierten Märkten zugeordnet werden (Tabelle 6). Auf dem Markt für Systemdienstleistungen wird zwischen der Vorhaltung von Leistung und ihrem tatsächlichen Abruf unterschieden. Auf dem Energy-Only-Markt hingegen wird die tatsächliche Stromlieferung bis kurz vor ihrer physischen Lieferung gehandelt (Häfner 2018, S. 632).

Tabelle 6: Märkte für Energieflexibilität nach (Häfner 2018, S. 632)

<i>Märkte für anreizbasierte Systemdienstleistungen</i>	<i>Preisbasierte Energy-Only-Märkte</i>
Regelleistungsmarkt	Terminmarkt
Abschaltbare Lasten	Day-Ahead-Markt
Zuschaltbare Lasten	Intraday-Markt

Die deutschen Märkte für Systemdienstleistungen werden von den vier Übertragungsnetzbetreibern (50 Hertz, Amprion, TenneT und Transnet BW) betrieben. Das Leistungsgleichgewicht zwischen Stromerzeugung und -abnahme in ihrer Regelzone muss dabei ständig in Balance gehalten werden. (Consentec GmbH 2014, S. 1–3)

Es werden die drei Regelenergiemärkte Primärregelleistung, Sekundärregelleistung und Minutenreserveleistung unterschieden. Auf allen drei Märkten wird sowohl mit positiver als auch mit negativer Leistung separat gehandelt. Diese unterscheiden sich dabei insbesondere hinsichtlich der Anforderungen an Abrufdauer, Aktivierungszeit, Mindestleistung und Steuerung. Aus diesem Grund müssen Anlagen, die am Regelenergiemarkt teilnehmen, präqualifiziert werden. (Netzregelverbund 2018)

Die höchsten Präqualifikationsanforderungen fallen für die Primärregelleistung an, da sie innerhalb von max. 30 Sekunden verfügbar sein muss (Tabelle 7). Für die industrielle Energieflexibilität eignen sich aufgrund dieser Anforderungen v. a. die Sekundärregelleistung und die Minutenreserveleistung (Bertsch et al. 2017, S. 14). Über tägliche Auktionen werden die Flexibilitätsoptionen an den günstigsten Anbieter vergeben. Die Vergütung erfolgt dabei über einen Leistungspreis (das Vorhalten einer flexiblen Last) und einen Arbeitspreis (Abruf der flexiblen Last) (Consentec GmbH 2014, S. 21–24; Netzregelverbund 2018).

Tabelle 7: Wesentliche Präqualifikationsanforderungen nach (Bertsch et al. 2017, S. 7; Häfner 2018, S. 633)

<i>Anforderungen</i>	<i>Primärregelleistung</i>	<i>Sekundärregelleistung</i>	<i>Minutenreserve</i>
Abrufdauer	bis zu 15 Min.	30 Sek. bis 15 Min.	15 Min. bis mehrere Stunden
Aktivierungszeit	max. 30 Sek.	max. 5 Min.	max. 15 Min.
Steuerung	automatisch	automatisch	manuell
Mindestleistung	1 MW	5 MW	5 MW

Einen weiteren Markt für Flexibilität eröffnet die Verordnung für abschaltbare Lasten (AbLaV). Dabei wird zwischen sofort abschaltbaren Lasten mit einer Aktivierungszeit von maximal 350 Millisekunden und schnell abschaltbaren Lasten mit einer Aktivierungszeit von maximal 15 Minuten unterschieden (AbLaV 2016§ 5). Voraussetzung sind u.a. eine Mindestleistung von 5 MW und eine vollautomatische Steuerung (EnWG 2005§13i). Die Flexibilitätsanbieter schließen einen Rahmenvertrag mit dem jeweiligen Übertragungsnetzanbieter und können anschließend an wöchentlichen Ausschreibungen teilnehmen (AbLaV 2016§3 und §15; Netzregelverbund 2018).

Seit dem 1. Januar 2017 können Betreiber von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK) im Falle von Netzengpässen die Stromeinspeisung aus KWK-Anlagen reduzieren und den benötigten Wärmebedarf durch Power-to-Heat-Anlagen aus dem öffentlichen Netz decken. (EnWG 2005, §13; Bertsch et al. 2017, S. 14)

Eine preisbasierte Vermarktung von energetischer Flexibilität erfolgt über die unterschiedlichen Energy-Only-Märkte. Diese folgen einer festen zeitlichen Reihenfolge (Bertsch et al. 2017, S. 3).

Am Terminmarkt werden Produkte (Futures und Optionen) lang- bis mittelfristig gehandelt (bis zu sechs Jahre im Voraus). Es handelt sich hierbei um standardisierte Verträge, welche die zu liefernde Energiemenge, die Lieferperiode sowie den Preis spezifizieren. Das Erfüllen der Verträge ist bei Futures eine Pflicht, bei Optionen ist es für den Käufer ein Recht ohne Ausübungszwang. Die Lieferperioden reichen von einzelnen Tagen bis hin zu ganzen Jahren. (Bertsch et al. 2017, S. 3; Häfner 2018, S. 632)

Am Day-Ahead-Markt erfolgt der Handel für den darauffolgenden Tag. Es werden Kontrakte gehandelt, die eine Lieferperiode für einen ganzen Tag (Baseload), für die Haupthandelszeit (Peakload, nur werktags von 9 bis 20 Uhr) oder für einzelne Stunden definieren. (Häfner 2018, S. 633)

Am Intraday-Markt wird bis kurz vor physischer Lieferung (z.B. 30 min an der EPEX Spot für den deutschen Raum) Energie in z.B. 15 Minuten-Kontrakten gehandelt. (Häfner 2018, S. 633)

Die Voraussetzung zur Teilnahme am Börsenhandel ist unter anderem eine technische Anbindung an die Handelssysteme, ein haftendes Eigenkapital von mindestens 50.000 Euro, die Fortbildung von Personal zu EEX-Börsenhändlern und die Anerkennung als Handelsteilnehmer durch die European Commodity Clearing AG (Netzregelverbund 2018).

2.5 Zwischenfazit

Im zurückliegenden Kapitel wurden die Grundlagen der vorliegenden Arbeit hinsichtlich des Bezugsraums (Produktionssystems), der Produktionsplanung und -steuerung sowie der industriellen Energieflexibilität erarbeitet.

Damit kann die Forschungsfrage eins beantwortet werden: *Was sind die relevanten Bestandteile eines Produktionssystems für eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Produktionssteuerung?*

Im ersten Schritt wurde die Fabrik als das Gesamtsystem aus Produktions- und Energiesystem definiert, wobei das Produktionssystem die Betriebsmittel zur wertschöpfenden Transformation im Sinne der Produktion beinhaltet. Das Energiesystem der Fabrik dient der Versorgung des Produktionssystems mit unterschiedlichen Energieformen. Die vorliegende Arbeit fokussiert sich in diesem Zusammenhang auf die elektrische Energie.

Im zweiten Schritt wurden die Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung betrachtet. Aufbauend auf der Produktionslogistik und den damit verbundenen Produktionskosten wurden die Grundsätze der Produktionsplanung und -steuerung analysiert. Für die vorliegende Arbeit gilt, dass die Begriffe Produktionssteuerung und Produktionsregelung äquivalent verwendet werden.

Im dritten Schritt wurden die grundlegenden Ansätze der Produktionssteuerung in zentrale und dezentrale Verfahren untergliedert und hinsichtlich ihrer Steuerungs- und Regelgrößen klassifiziert.

Im vierten und letzten Schritt wurde der Begriff der Energieflexibilität definiert. In dieser Arbeit soll er als eine kurzfristige und planbare Veränderung der Verbraucherlast als Reaktion auf Preissignale im Markt oder auf eine Aktivierung im Rahmen einer vertraglichen Leistungsreserve verstanden werden. Zur flexiblen Beeinflussung des Energieverbrauchs des Produktionssystems konnten unterschiedliche Flexibilitätsmaßnahmen identifiziert werden. Der Fokus liegt auf den prozessabhängigen Flexibilitätsmaßnahmen „Unterbrechung des Produktionsprozesses“ und „Anpassung von Prozessparametern“.

Die beschriebenen Untersuchungen legen die Basis für die Anforderungsdefinition einer dezentralen energieflexiblen Steuerung und die darauf aufbauende Bewertung der im Stand der Technik identifizierten Ansätze.

3 Stand der Forschung und Technik

Die Flexibilisierung des Energieverbrauchs hat in Deutschland, insbesondere vor dem Hintergrund der Energiewende, eine hohe Relevanz. Dies spiegelt sich in der damit verbundenen Forschung wieder. So entstehen zahlreiche Ansätze zur Identifikation und Bewertung oder auch zur technologischen Weiterentwicklung von energetischer Flexibilität und damit verbundenen Flexibilitätsmaßnahmen. Dabei ist die Flexibilisierung des Energieverbrauchs nicht nur ein deutsches Thema. Sie wird vielmehr weltweit etabliert und wird laufend beforscht.

Zur Aufarbeitung des Stands der Technik wird im ersten Schritt das methodische Vorgehen der Recherchearbeit vorgestellt. Darauf aufbauend werden die unterschiedlichen Ansätze kurz dargelegt und erläutert.

3.1 Methodisches Vorgehen

Um die bestehenden Arbeiten zum Thema Energieflexibilität in der Produktion strukturiert analysieren zu können, wurde, basierend auf den in Kapitel 2.4 erarbeiteten Grundlagen, eine Relevanzanalyse vorgenommen (Bild 16). Dabei wird, ausgehend vom Forschungsfeld des Demand Side Management, die Literatur mit den Schwerpunkten Energieeffizienz und Energieflexibilität unterschieden. Fokussiert man sich nun auf den Bereich der Energieflexibilität, so finden sich einerseits Veröffentlichungen, die sich auf die Netzinfrastruktur beziehen, und andererseits Veröffentlichungen, die sich auf die Verbrauchseite beziehen. Die Verbrauchseite kann wiederum in industrielle und nicht-industrielle Verbraucher untergliedert werden. In dieser Arbeit wird der Stand der Technik, aufbauend auf Relevanzlevel 3 und mit besonderem Schwerpunkt auf Relevanzlevel 4, dargestellt.

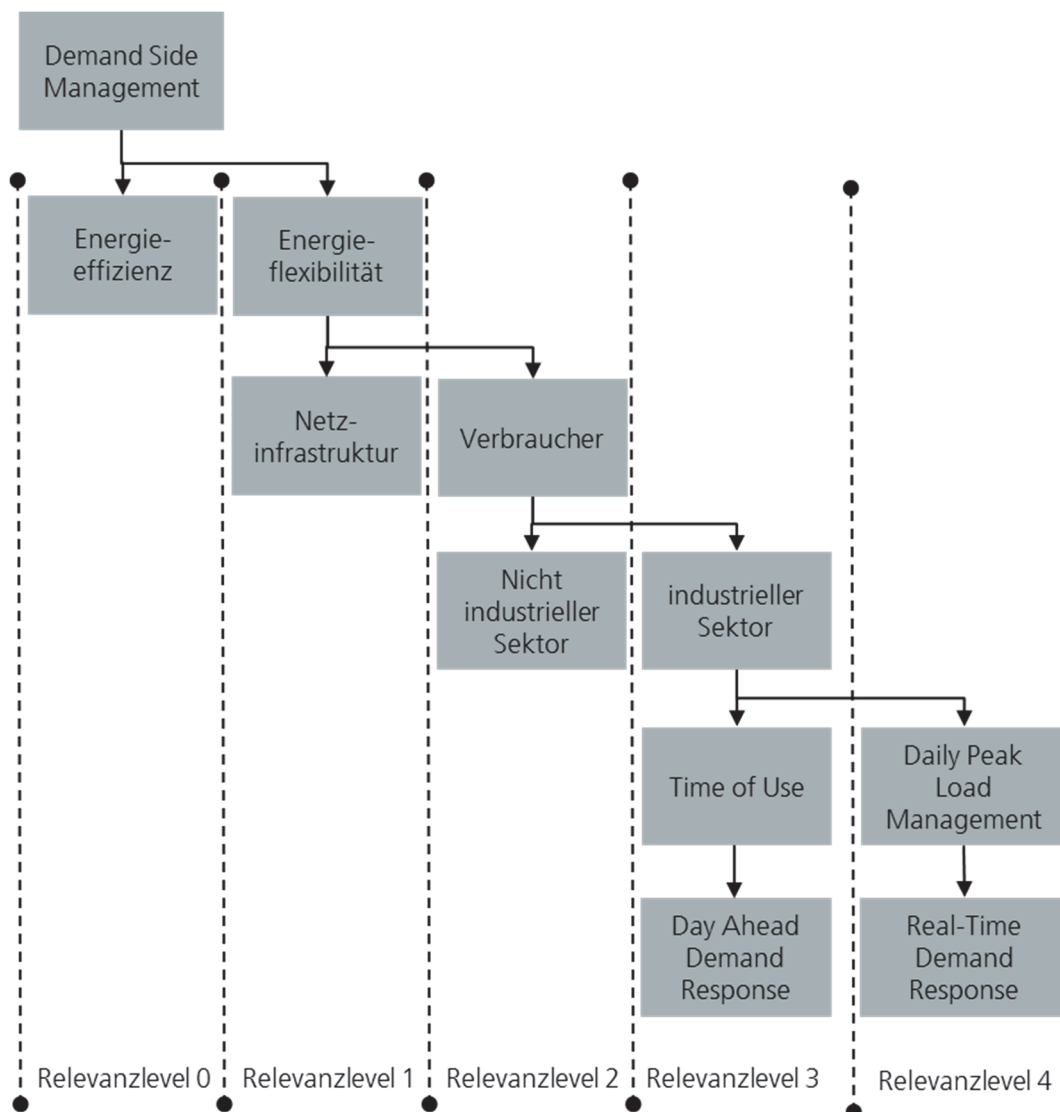


Bild 16: Relevanzanalyse der Literatur

3.2 Bestehende Ansätze im Untersuchungsbereich

Im Folgenden werden die untersuchten Ansätze zur energiesensitiven Produktionsplanung und -steuerung untergliedert nach Produktionsplanung, Produktionssteuerung und Laststeuerung analysiert.

3.2.1 *Energiesensitive Produktionsplanung*

Die Produktionsplanung mit ihren Kernaufgaben Produktionsprogrammplanung, Produktionsbedarfsplanung, Eigenfertigungsplanung sowie Fremdbezugsplanung

plant die Produktion in Abhängigkeit des logistischen Zielsystems für die nächsten Planungsperioden voraus. (Lödding 2010, S. 81)

Aus der energetischen Perspektive sind dabei insbesondere Produktionsbedarfs- als auch die Eigenfertigungsplanung von besonderer Bedeutung. Die Produktionsbedarfsplanung leitet aus dem Produktionsprogramm den erforderlichen Material- und Ressourcenbedarf ab.

Die Eigenfertigungsplanung, auf Basis des Aachener PPS-Modells, umfasst die Losgrößenrechnung, die Feinterminierung und Reihenfolgebildung sowie die Verfügbarkeitsprüfung, die durch geschickte energiewirtschaftliche Optimierung die Energiekosten der Produktion senken können.

Im Folgenden wird, mit dem Fokus auf der Eigenfertigungsplanung, die Integration des Faktors Energie untersucht. Die identifizierten Ansätze werden entsprechend ihrer Schwerpunktaufgabe dem Jahr der Veröffentlichung und ihrer Relevanz für die vorliegende Arbeit untergliedert (Tabelle 8).

Tabelle 8: Untersuchte Ansätze der energiesensitiven Produktionsplanung

<i>Autor</i>	<i>Schwerpunktaufgabe</i>	<i>Relevanzlevel</i>
Ashok & Banerjee (2001)	Belegungsplanung	3
Junge (2007)	Belegungsplanung	3
Rager (2008)	Belegungsplanung	3
Fang et al. (2011)	Belegungsplanung	3
Weinert (2011)	Belegungsplanung	3
Buzzerone et al. (2012)	Belegungsplanung	3
Artigues et al. (2013)	Belegungsplanung	3
Böning et al. (2013)	Belegungsplanung	3
Emec et al. (2013)	Belegungsplanung	3
Küster et al. (2013)	Belegungsplanung	3
Le & Pang (2013)	Belegungsplanung	3
Luo et al. (2013)	Belegungsplanung	3
Wang & Li (2013)	Belegungsplanung	3
Bego et al. (2014)	Belegungsplanung	3
Große Böckmann (2014)	Belegungsplanung	3
Shrouf et al. (2014)	Belegungsplanung	3
Liu (2014, 2015)	Belegungsplanung	3
Gong (2015)	Belegungsplanung	3
Eberspächer (2016)	Belegungsplanung	3
Schlechtendahl (2016)	Belegungsplanung	3
Keller (2015, 2016, 2018))	Belegungsplanung Losgrößenbildung	3
Nayak et al. (2019)	Reihenfolgebildung Belegungsplanung	3

Ashok & Banerjee (2001) verringern Stromkosten durch Lastverschiebung unter „Time-of-Use“-Stromtarifen und definieren produktionslogistische Randbedingungen. Der Algorithmus nutzt das Verfahren der linearen Optimierung, um ein kostenoptimales Produktionsprogramm für eine Zementmühle zu erstellen. (Ashok et al. 2001, S. 879–884)

Junge 2007 untersucht den Ansatz einer energieeffizienten Produktionssteuerung, welche die Wechselwirkung zwischen Emissionen, Lüftung und Wärmeverlusten optimiert. Das Ziel dieses Ansatzes ist die Senkung des Energiebedarfs und die daraus resultierenden Auswirkungen auf die logistischen und wirtschaftlichen Zielgrößen zu minimieren. Die Maschinenbelegungsplanung wird auf Basis der folgenden Freiheitsgrade energetisch optimiert:

- Zuordnung Auftrag zu Maschine
- Reihenfolge der Aufträge auf der Maschine
- Variation der Losgröße
- Terminierung (Vor-/ Rückwärts)

Eine Simulation in der kunststoffverarbeitenden Industrie kommt zum Ergebnis, dass sich bei Reduzierung des Heizenergiebedarfs gleichzeitig die logistischen Zielgrößen Durchlaufzeit und Bestand verschlechtern. In Deutschland überwiegen die höheren Lagerhaltungskosten und die durch kleinere Losgrößen gestiegenen Rüstkosten die eingesparten Energiekosten. An Standorten mit geringeren Lohnkosten und steigenden Energiepreisen ist die energieorientierte PPS sinnvoll. (Junge 2007, S. 84–93)

Rager (2008) entwirft eine energieorientierte Produktionsplanung. Kernelement ist dabei die energieorientierte Maschinenbelegungsplanung. Das Zielsystem enthält sowohl technische als auch betriebswirtschaftliche Aspekte. Für das zugrunde liegende kombinatorische Optimierungsproblem werden heuristische Lösungsansätze auf Basis evolutionärer Algorithmen entworfen und anhand eines Beispiels aus der Textilindustrie bewertet. (Rager 2008, S. 43–99)

Fanga et al. 2011 entwickeln einen Algorithmus, der die Betriebsgeschwindigkeit einer Maschine als unabhängige Variable in die Belegungsplanung integriert. Damit soll die Spitzenlast und der Energieverbrauch reduziert werden. Am Beispiel einer Gusseisenplattenproduktion werden unterschiedliche Schnittgeschwindigkeiten einer Maschine modelliert. Allerdings kann das Modell aufgrund des großen Rechenaufwands nicht im industriellen Maßstab verwendet werden. (Fang et al. 2011, S. 234–238)

Weinert 2011 beschreibt in seiner Arbeit die Methode der „Energy Blocks“, mit der man den Energieverbrauch in einer Fabrik genauer vorhersagen kann. Die vorgeschlagene Energy-Blocks-Planungsmethodik wurde entwickelt, um die Kriterien der Energieeffizienz und -wirksamkeit in die Produktions- und Ablaufplanung auf verschiedenen Aggregationsebenen von einzelnen Maschinenkomponenten bis hin zu Wertschöpfungsnetzwerken zu integrieren. Basierend auf der Aggregation aller Maschinenverbräuche wird eine Vorhersage möglich, wieviel Energie zu welchem Zeitpunkt benötigt wird.

Mit der Einführung von Energy Blocks als elementares Planungstool kann das Energiemanagement analytisch durchgeführt werden. (Weinert et al. 2011, S. 41–44)

Bruzzone et al. 2012 beschreibt einen Ansatz der energiesensitiven Belegungsplanung. Ziel dieses Ansatzes ist es, den Energieverbrauch zu reduzieren, ohne die im Referenzzeitplan bereitgestellte Zuordnung und Reihenfolge der Aufträge zu ändern. Dabei werden die folgenden Zielgrößen untersucht:

- Minimierung der Spitzenleistung in der Werkstatt
- Begrenzung der Verschlechterung der Planungsziele (Verspätung und Minimierung der Laufzeit)

Auf Basis eines Modells wird die Spitzenleistung einer Fertigungsstätte für einen definierten Zeitraum gesteuert. Das Ergebnis ist, dass der Ansatz den strengen Anforderungen an den Energiebedarf des Anwendungsbeispiels gerecht werden kann, während die ursprünglichen Termin- und Bearbeitungsziele so weit wie möglich erhalten bleiben. (Bruzzone et al. 2012, S. 459–462)

Pechmann et al. (2012) stellen eine Planungssoftware vor, die zusätzlich zu den üblichen Planungskriterien das Lastprofil der Produktion glättet sowie die Energieeffizienz berücksichtigt. Darüber hinaus erstellt die Software eine 24-Stunden-Lastprofilvorhersage auf Basis des aktuellen Produktionsplans, die an den Energieversorger übergeben werden kann. Die Lastnivellierung erfolgt im Nachgang zur rückwärts-terminierten Maschinenbelegungsplanung. Dabei wird zwischen einer manuellen

zeitlichen Verschiebung der Arbeitsschritte und einer Wahl von alternativen Ressourcen für einzelne Arbeitsschritte unterschieden. Eine algorithmusbasierte Problemoptimierung bleibt jedoch aus. (Pechmann et al. 2012, S. 491–494)

Artigues et al. 2013 untersucht am Beispiel einer Gießerei, in der Metall in Induktionsöfen geschmolzen wird, die Vermeidung von unregelmäßigen Stromspitzen. Die Produktionsplanung soll den Energieverbrauch als zentrales Element betrachten, um die Produktion energetisch auf dem gewünschten Niveau zu halten. Hierzu wird ein zweistufiger Ansatz des Constraint Programming / Mixed Integer Linear Programming vorgeschlagen. Das Ziel besteht darin, den Produktionsplan in Abhängigkeit der Energiekosten zu optimieren.

- Im ersten Schritt wird die Sequenzierung der Arbeiten an den Öfen mit festen Arbeitsdauern durchgeführt (die dem Ofen zugeführte Leistung ist bekannt).
- Im zweiten Schritt werden die Arbeiten geplant, d.h. die Start- und Enddaten für den Betrieb festgelegt.

Schritt eins verwendet die durch Schritt zwei angegebene neue Auftragsdauer. Der Optimierungsprozess wird unterbrochen, wenn die Zielfunktion von Schritt zwei nicht besser als die der vorherigen Iterationen ist. Obwohl dieser zweistufige Ansatz möglicherweise nicht die optimale Lösung darstellt, liefert das modellierte Beispiel Ergebnisse mit reduzierten Energiekosten. (Artigues et al. 2013, S. 14–20)

Böning et al. (2013) entwickeln eine Methode zur Belegungsplanung, welche die Nivellierung des Energieverbrauchs über die Zeit ermöglicht und gleichzeitig die logistischen Zielgrößen Durchlaufzeit, Bestand, Termintreue und Auslastung betrachtet. Auf Basis eines linearen Optimierungsproblems werden durch Verschiebung von Fertigungsaufträgen kostenintensive Lastspitzen vermieden und eine Lastglättung erreicht. (Böning 2013, S. 88–89)

Emec et al. (2013) stellen ein Modell mit gemischt ganzzahliger linearer Optimierung vor, mit dem eine mehrstufige Produktionslinie energieflexibel unter stündlich schwankenden Strompreisen geplant wird. Dies wird für einen Zeitraum von 24

Stunden und mit Zeitabschnitten von fünf Minuten durchgeführt. (Emec et al. 2013, S. 637–641)

Küster et al. (2013) optimieren die Belegungsplanung mithilfe evolutionärer Algorithmen und Multiagententechnologie hinsichtlich variabler Strompreise. Grundlage ist ein geeignetes Domänenmodell, das einem Petrinetz mit den zwei Haupttypen Aktivitäten und Ressourcen ähnelt. Das generische Design des Domänenmodells erlaubt es, Zukunftsszenarien, wie das Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen, zu berücksichtigen. (Küster et al. 2013, S. 30–38)

Le & Pang (2013) betrachten ein dynamisches Planungsproblem, das die Summe der Energiekosten und die Energieverbrauchsunsicherheiten minimiert. Vorgeschlagen wird ein integrierter Steuerungs- und Scheduling-Rahmen, der zwei Module umfasst. Ein argumented-discrete-event-control-Modul und ein max-throughput-min-energy-reactive-scheduling-Modul.

Auf Basis einer industriellen Pressenlinie werden die Module getestet. Die Versuchsergebnisse belegen, dass mit dem gewählten Ansatz Produktionsunterbrechungszeit im Vergleich zu Umplanungsansätzen deutlich reduziert werden. (Le et al. 2013, S. 408–415)

Luo et al. (2013) entwickeln eine Metaheuristik, die nicht nur die Produktionseffizienz sondern auch die Stromkosten vor dem Hintergrund von Time-of-Use-Strompreisen berücksichtigt. Dabei werden die Startzeiten der Aufträge angepasst, um die Stromkosten für den Zeitplan zu minimieren. (Luo et al. 2013, S. 424–435)

Wang und Li (2013) optimieren mithilfe eines Partikelschwarmalgorithmus die Produktionsplanung hinsichtlich der elektrischen Energiekosten in Abhängigkeit von Time-of-Use-Tarifen. Vorgegebene Produktionsziele müssen dabei eingehalten werden. (Wang et al. 2013, S. 234–240)

Die Autoren in **Bego et al. (2014)** verwenden ein approximierendes Verfahren für die Produktionsplanung unter variablen Stromtarifen. Dadurch wird der Rechenaufwand für die Lösung des gemischt ganzzahligen nichtlinearen Optimierungsproblems verringert. (Bego et al. 2014, S. 729–734)

Große Böckmann (2014) entwickelt ein Energiereglerkonzept für produzierende Unternehmen der Stückgutfertigung, das es ermöglicht, den eigenen Strombedarf durch die gezielte Steuerung und Regelung der industriellen Produktionsprozesse zu beeinflussen. Dabei werden auch preis- und preisbasierte Lastmanagement-Programme mit eingebunden. Auf Basis der Grundstruktur von Regelkreisen werden Methoden und Strategien zur Überprüfung, Überwachung und Regelung des Energiebedarfes wertschöpfender Prozesse ermittelt. Die Belegungsplanung wird dabei um periphere Nebenprozesse ergänzt und in Abhängigkeit flexibler Stromtarife durchgeführt. (Große Böckmann 2014, S. 79–130)

Shrouf et al. (2014) stellen einen Ansatz zur Minimierung der Energiekosten im Rahmen der Belegungsplanung unter Berücksichtigung volatiler Energiepreise vor. Dabei werden zustandsabhängige Energieverbräuche einer Maschine sowie die Übergangszeiten zwischen den Zuständen betrachtet und ein mathematisches Optimierungsmodell entwickelt, um eine einzelne Maschine bei schwankenden Strompreisen zu steuern. Damit sollen Energieverbrauch und Produktionskosten verringert werden. (Shrouf et al. 2014, S. 197–203)

Die Arbeiten von **Liu (2014) (2015)** betrachten zwei einstufige Planungsprobleme und optimieren die Durchlaufzeit und CO₂-Emissionen der Produktion. Es werden ganzzahlige lineare Optimierungsmodelle aufgestellt. Zwischen beiden zu optimierenden Zielgrößen besteht ein Zielkonflikt, weswegen statt einer optimalen Lösung eine Reihe von pareto-optimalen Lösungen gefunden werden. (Liu et al. 2014, S. 87–93; Liu 2015, S. 1125–1131)

Gong et al. (2015) entwickelt ein generisches lineares mixed-integer-Programmiermodell, das die Arbeitsplanung auf Ebene einzelner Maschinen ermöglicht, um die

Energiekosten zu minimieren. Am Beispiel einer Flachsleifmaschine werden unterschiedliche Untersuchungen hinsichtlich Real Time Pricing, Time-of-Use Pricing und Critical Peak Pricing durchgeführt. (Gong et al. 2015, S. 185–190)

Eberspächer 2016 und **Schlechtendahl et al. 2016** beschreiben ein maschinenunabhängiges Energiesteuerungssystem, welches auf Echtzeitsteuerungsinformationen der Maschinen beruht und den Energieverbrauch während des Maschinenbetriebs optimiert. Um den Energieverbrauch von Werkzeugmaschinen zu reduzieren, wurden drei Arten von Energieoptimierern identifiziert, die im maschinenunabhängigen Energiesteuerungssystem ausgeführt werden können:

- Gesamtbetriebszustand-Optimierer der Belegungsplanung
- Komponenten-Optimierer des Maschinenzustands
- Prozess-Optimierer z.B. verbrauchsabhängige Kühlung

Am Beispiel einer 5-Achs-Fräsmaschine wurde der Energieverbrauch so um 16% verringert. (Eberspächer 2016, S. 111–133; Schlechtendahl et al. 2016, S. 783–788)

Keller (2015, 2016, 2018) beschreibt eine heuristische Methode für einen Produktionsplanungsprozess von der Termin- und Kapazitätsplanung bis zur Maschinenbelegung unter der Berücksichtigung von Energieflexibilität. Der Faktor Energie wird als Lagerbestand im ERP-System integriert. Die Produktionsplanung, bei der die Produktionsaufträge und die entsprechenden Maschinen zusammengefügt werden, erfolgt vier Tage im Voraus. Der bereitgestellte Ansatz verwendet einen Simulated-Annealing-Algorithmus, um die Energiekapazitäten am Beispiel eines hybriden Job-Shop-Scheduling-Problems zu optimieren. (Keller et al. 2015, S. 141–146, 2016b, S. 244–248; Keller et al. 2016a, S. 752–757; Keller et al. 2016c, S. 254–258; Keller 2018, S. 99–125)

Nayak et al. (2019) entwickeln einen Ansatz zur Reihenfolgebildung und Belegungsplanung unter Einbezug von Windenergieerzeugung am Produktionsstandort. Der Algorithmus trifft sequenzielle Entscheidungen auf der Grundlage einer gewich-

teten Zielfunktion. Die Stromkosten und mögliche Produktionsverzögerungen werden auf Basis eines virtuellen Bestands unter Verwendung unterschiedlicher Informationen (z.B. der erwarteten Energieerzeugung der Windkraftanlage) minimiert. (Nayak et al. 2019, S. 197–202)

3.2.2 *Energiesensitive Produktionssteuerung*

Als Schnittstelle zwischen planenden und ausführenden Bereichen in der Produktion liegt die Aufgabe der Produktionssteuerung in der Umsetzung der Vorgaben der Produktionsplanung, auch bei – häufig unvermeidbaren – Störungen (Wiendahl 1997, S. 12). Mit zunehmender Volatilität des Faktors Energie, werden auch schwankende Energiepreise zu einer Störgröße in der Produktionssteuerung. Dies verschärft den Zielkonflikt hinsichtlich Zeit, Kosten und Qualität. Dabei findet sich eine Reihe von Ansätzen in der Literatur, die sich dieser Herausforderung stellen. Auch diese werden entsprechend ihrer Schwerpunktaufgabe dem Jahr der Veröffentlichung und ihrer Relevanz für die vorliegende Arbeit untersucht (Tabelle 9).

Tabelle 9: Untersuchte Ansätze der energiesensitiven Produktionssteuerung

<i>Autor</i>	<i>Schwerpunktaufgabe</i>	<i>Relevanzlevel</i>
Li et al. (2012)	Kapazitätssteuerung	4
Neugebauer et al. (2012)	Kapazitätssteuerung	4
Putz et al. (2012)	Auftragsfreigabe	4
Fernandez et al. (2013)	Kapazitätssteuerung	4
Zhou & Li (2013)	Kapazitätssteuerung	4
Langer (2014)	Auftragsfreigabe	4
Moon & Park (2014)	Kapazitätssteuerung	4
Sun et al. (2014)	Kapazitätssteuerung	4
Willeke (2014, 2015, 2016)	Auftragsfreigabe Reihenfolgebildung Kapazitätssteuerung	4
Frigerio & Matta (2015)	Kapazitätssteuerung	4
Schuh et al. (2015)	Reihenfolgebildung	4
Beier et al. (2017)	Kapazitätssteuerung	4
Schulz (2018)	Reihenfolgebildung Auftragsfreigabe Lastspitzenreduktion	4
Grosch et al. (2019)	Reihenfolgebildung	4
Roesch et al. (2019)	Reihenfolgebildung	4

In **Li et al. (2012)** werden Echtzeitinformationen über den Strompreis ausgewertet, um Regelenergieanfragen ohne Reduzierung der zu produzierenden Menge beantwortet werden können. Betrachtet wird eine mehrstufige Fertigungslinie mit mehreren Maschinen und Zwischenspeichern. (Li et al. 2012, S. 353–357)

Das Konzept wird von **Zhou & Li (2013)** zu einer heuristischen Methode für die Maschinensteuerung weiterentwickelt. (Zhou et al. 2013, S. 640–644)

Neugebauer et al. (2012) entwickeln mit eniMES ein generisches Framework zur Integration energiebezogener MES-Funktionen der Feinplanung und Prozesskontrolle für energiesensitive Steuerungssoftware. Zusätzlich zu einer Schichtplanung in Abhängigkeit variabler Strompreise fokussieren sich die Entwickler insbesondere auf

die Entwicklung von Steuerungsverfahren zur Verbesserung der Energieeffizienz in der Produktion. (Neugebauer et al. 2012, S. 399–404)

Putz et al. (2012) und Langer et al. (2014) führen das Verfahren Constant-Energy-In-Process zur Freigabe von Zustandswechseln beliebiger Anlagen in Abhängigkeit der Energieverfügbarkeit ein. Ziel ist es zu ermitteln, inwieweit Energieziele neben den festgelegten logistischen Zielen umgesetzt werden können. Nur wenn zum jeweiligen Zeitpunkt eine ausreichende Menge elektrischer Energie im System verfügbar ist, kann eine Anlage den Wechsel in einen Zustand mit höherem Energiebedarf durchführen. Eine algorithmenbezogene Umsetzung bleibt an dieser Stelle jedoch aus. (Putz et al. 2012, S. 482–487; Langer et al. 2014, S. 123–128)

Fernandez et al. (2013) schlagen vor, mit einem Modell der nichtlinearen ganzzahligen Optimierung den zusätzlichen Bestand zu berechnen, welcher in Zeiten mit geringen Stromtarifen aufgebaut wird. In Zeiten hoher Stromtarife kann der Energiebedarf durch Abschalten von Maschinen und Zurückgreifen auf diesen Bestand verringert werden. (Fernandez et al. 2013, S. 178–184)

Moon & Park (2014) stellen Modelle mit zeit- und maschinenabhängigen Stromkosten vor. Diese werden genutzt, um die Produktion einer Werkstattfertigung zu planen. Dabei betrachten sie unterschiedliche Maschinenzustände und deren Energieverbräuche. Sie können zeigen, dass bei einer Differenzierung zwischen dem Zustand Standby und dem Zustand Aus (Freigeschaltet) der Energieverbrauch im Zustand Aus als Null betrachtet werden kann. Im ersten Schritt werden dafür die Produktions- und Stromkosten minimiert. Im zweiten Schritt werden dezentrale Energieerzeuger und -speicher hinzugefügt und im Rahmen der Kapazitätssteuerung in die Produktionssteuerung integriert. (Moon et al. 2014, S. 3922–3939)

Sun et al. (2014) bauen diesen Ansatz durch Lockerung der Randbedingung einer Mindestproduktionsmenge weiter aus. (Sun et al. 2014, S. 84–93)

Willeke et al. (2014, 2015, 2016) entwickeln einen Ansatz zur Integration von zeitvariablen Energiekosten in das Verfahren der belastungsorientierten Auftragsfreigabe. Wesentlicher Inhalt des vorgestellten Ansatzes sind energiekostenorientierte

Verfahren für die Auftragsfreigabe, die Reihenfolgebildung sowie die Kapazitätssteuerung. (Willeke et al. 2014, S. 328–331, 2015a, S. 495–499; Willeke et al. 2015b, S. 2–7; Willeke et al. 2016, S. 1–4)

Frigerio & Matta (2015) entwickeln ein allgemeines Framework für das Ein- und Ausschalten von Maschine in Abhängigkeit des Energieverbrauchs. Dabei wird in Abhängigkeit des Gesamtenergieverbrauchs pro Teil und des Systemdurchsatzes der Zustand einzelner Maschinen variiert. (Frigerio et al. 2015, S. 34–39)

Schuh et al. (2015) stellen einen Ansatz zur Bildung von Prioritätsregeln in der Reihenfolgebildung in Abhängigkeit volatiler Energiepreise vor. Die Ergebnisse einer Simulationsstudie zeigen, dass eine Reduzierung der Gesamtstromkosten und der durchschnittlichen Stromkosten durch einen energiebewussten Dispositionsalgorithmus möglich ist. Der Algorithmus hat sich bei höheren und volatilere Strompreisen und einem höheren WIP-Level als effektiver erwiesen und arbeitet zudem für ein heterogenes Produktspektrum in Bezug auf die Stromintensität der Arbeitsplätze besser. (Schuh et al. 2015, S. 173–178)

Beier et al. (2017) entwickeln eine Methode mit der in Echtzeit ein mehrstufiges Fertigungssystem gesteuert wird. Es erweitert existierende Echtzeit-Modelle um volatile regenerative Energieerzeugung. Der Algorithmus soll keine optimale Lösung finden, sondern den Energiebedarf an das schwankende Angebot anpassen. (Beier et al. 2017a, S. 650–660; Beier et al. 2017b, S. 103–167)

Schultz (2018) entwickelt eine Produktionssteuerung zur flexiblen Anpassung des produktionsbedingten Lastgangs mit dem Ziel, die betrieblichen Energiekosten zu reduzieren. Dabei werden Verfahren der energieorientierten Reihenfolgebildung, der energieorientierten Auftragsfreigabe und des situativen Lastmanagements entwickelt, um eine Synchronisation des Energiebedarfs mit dem verfügbaren Energieangebot vornehmen zu können. (Schultz 2018, S. 65–101)

Grosch et al. (2019) entwickeln ein Modell zur energieadaptiven Reihenfolgebildung. Das Modell ist flexibel und kann für verschiedene Produktionssysteme verwendet werden. Es werden unterschiedliche Energiequellen betrachtet, wobei ein

genetischer Algorithmus zur Optimierung des Modells eingesetzt wird. Der Ansatz wird in einer Modellfabrik getestet. (Grosch et al. 2019, S. 203–208)

Roesch et al. (2019) stellen einen Ansatz zur kostenbasierten Produktionssteuerung vor, der die Transparenz verbessert und Unternehmen die Teilnahme an kurzfristigen Energiemärkten ermöglicht. Der Ansatz konzentriert sich auf die Opportunitätskosten kurzfristiger, energieorientierter Anpassungen und deren dynamische Integration in ein Planungs- und Echtzeitsteuerungssystem. (Roesch et al. 2019, S. 227–232)

3.2.3 Laststeuerung

„In Deutschland ist eine Steuerung des Stromverbrauchs in der Industrie vor allem als Spitzenlastmanagement bekannt. Geregelt wird nur innerhalb des einzelnen Betriebs - ohne Fokus auf eine übergeordnete energiewirtschaftliche Optimierung“ (Roon et al. 2010, S. 1). Lastmanagementsysteme sind in der betrieblichen Praxis seit langem bekannt und insbesondere bei energieintensiven Unternehmen im Einsatz. Schultz unterscheidet in diesem Zusammenhang zwischen regelbasierten und optimierenden Lastmanagementansätzen. Regelbasierte Lastmanagementansätze führen auf Basis vorab definierter Lastgrenzen und Teilnehmer eine Lastflusskontrolle durch. Optimierende Lastmanagementansätze berücksichtigen hingegen weitere Randbedingungen bei der Schaltung von Lasten. (Schultz 2018, S. 46–48)

Im Folgenden werden optimierende Ansätze des Lastmanagements entsprechend dem Jahr der Veröffentlichung und ihrer Relevanz für die vorliegende Arbeit untersucht (Tabelle 10).

Tabelle 10: Untersuchte Ansätze des optimierenden Lastmanagements

<i>Autor</i>	<i>Schwerpunktaufgabe</i>	<i>Relevanzlevel</i>
Dam et al. (2008)	Lastspitzenreduktion	4
Hommelberg et al. (2008)	Lastspitzenreduktion	4
Deindl et al. (2008)	Lastspitzenreduktion	4
Van Staden et al. (2009)	Lastspitzenreduktion	4
Yusta et al. (2010)	Lastspitzenreduktion	4
Mitra et al. (2012)	Lastspitzenreduktion	4
Florea et al. (2013)	Lastspitzenreduktion	4
Popp & Zäh (2014, 2016)	Lastspitzenreduktion	4
Weinert & Mose (2016)	Lastspitzenreduktion	4
Li & Hong (2017)	Lastspitzenreduktion	4
Egidio und Engell (2018)	Lastspitzenreduktion	4
Schraml (2016, 2018)	Lastspitzenreduktion	4
Liu et al. (2019)	Lastspitzenreduktion	4

Dam et al. (2008) entwickeln ein Demand-Response-System für große industrielle Fertigungsanlagen mit mehreren Verbrauchern. Mithilfe von Expertensystemen und Fuzzy Logic werden automatisiert Entscheidungen zur Laststeuerung getroffen. (Dam et al. 2008, S. 1–7)

Hommelberg et al. (2008) stellt eine agentenbasierte DSM-Architektur vor, bei der jedes Gerät über einen eigenen Agenten Energie auf dem Markt kauft oder verkauft. Sogenannte PowerMatcher koordinieren die Zuweisung von Energie auf die Geräte, die ihnen zugeordnet sind. Der „Root PowerMatcher“ verfügt über die Schnittstelle zum Markt, kommuniziert Regelenergieanfragen und ermittelt Marktpreise. (Hommelberg et al. 2008, S. 1–5)

Einen ähnlichen Ansatz erarbeitet **Deindl et al. (2008)** mit Agenten in Mikronetzen, welche automatisiert Energie am Markt handeln. Über Fuzzy Logic ermitteln sie Energiepreise und -mengen für jede Handelsperiode. (Deindl et al., S. 487–488)

Die Autoren in **van Staden et al. (2009)** optimieren einen einstufigen kontinuierlichen Prozess unter TOU-Stromtarifen und Kosten für Leistungsspitzen. Der Planungshorizont wird dabei auf maximal 24 Stunden beschränkt, um den Rechenaufwand zu begrenzen. (Staden et al. 2009, S. 2–6)

Yusta et al. (2010) verwenden ein nichtlineares Optimierungsmodell, um die Lastspitzen einer einzelnen Maschine unter Berücksichtigung von stündlich variierenden Strompreisen und technischen Parametern wie der Schnittgeschwindigkeit zu reduzieren. (Yusta et al. 2010, S. 2647–2654)

Mitra et al. (2012) stellen ein deterministisches lineares Optimierungsmodell für kontinuierliche energieintensive Prozesse vor. Das Modell beschreibt eine gesamte Fabrik mit verschiedenen Zuständen, deren Zustandswechsel bestimmten Randbedingungen unterliegen. Trotz der großen Komplexität des Modells ist die Rechenzeit zur Lösungsfindung in allen Anwendungsfällen gering. (Mitra et al. 2012, S. 171–184)

Florea et al. (2013) entwickeln eine Multi-Agenten-basierte Methode für das Spitzenlastmanagement. Jede elektrische Last wird durch einen Energiemanager repräsentiert, der auf Wunsch Maßnahmen zur Energieanpassung vorschlagen kann. Die Agenten sind kollaborativ und können Vorschläge von anderen Agenten ablehnen, wenn der Prozessablauf durch die vorgeschlagene Aktion beeinflusst wird. (Florea et al. 2013, S. 83–94)

Popp & Zäh (2014, 2016) stellen Ansätze zur energieflexiblen Betriebsweise von Werkzeugmaschinenkomponenten ohne jegliche Einschränkungen der Produktivität vor. Dabei werden einzelne Komponenten in Bezug auf ihr Energieflexibilitätspotential bewertet. Durch die separate Komponentensteuerung kann am Beispiel einer zerspanenden Werkzeugmaschine eine Reduktion der Spitzenlast erreicht werden. (Popp et al. 2014b, S. 413–417, 2014a, S. 365–372; Popp et al. 2016, S. 692–697)

Weinert & Mose (2016) stellen einen agentenbasierten Ansatz für das Spitzenlastmanagement vor. Das entwickelte System nutzt die Modularisierungsprinzipien durch Softwareagenten auf der Ebene einzelner Produktionsmaschinen. Jeder Agent

ist Teil einer Verhandlung hinsichtlich der Spitzenlast des Produktionssystems. Die Modellierung der Verbrauchsprofile erfolgt über Energieblöcke. Letztendlich wird die energetische Flexibilität einzelner Maschine genutzt, um die Spitzenlast zu reduzieren. (Mose et al. 2015; Weinert et al. 2016, S. 259–264)

Li & Hong (2017) entwerfen einen Algorithmus, mit dem ein Verbraucher in Echtzeit, d.h. innerhalb von ca. 10 Minuten, auf Regelenergieanfragen reagieren kann. Das mehrstufige Fertigungsmodell umfasst mehrere Maschinen und Zwischenspeicher. Soll Regelenergie geliefert werden, wird ein lineares Optimierungsproblem gelöst, welches Energiekosten mit und ohne Teilnahme am Regelenergiemarkt berechnet, vergleicht und im Falle einer Teilnahme das Optimum der zu reduzierenden Energie auf die einzelnen Verbraucher verteilt. (Li et al. 2017, S. 739–747)

Leo & Engell (2018) stellen einen zweistufigen stochastischen Ansatz zur Reduktion von Unsicherheiten im Strombezug vor. Es wird eine kontinuierliche Produktionsanlage und einer dezentralen Stromversorgung modelliert. Dabei werden sowohl Maschinenausfall als auch schwankende Energiepreise als Unsicherheiten betrachtet. Die Anwendung des vorgeschlagenen Ansatzes zeigt, dass die Berücksichtigung von Unsicherheiten zur Lösung beim Stromeinkauf und der Auftragsterminierung im Gegensatz zu einem deterministischen Ansatz von Vorteil sein können. (Leo et al. 2018, S. 950–963)

Schraml (2016, 2018) entwickeln einen zweistufigen Ansatz zur Optimierung des elektrischen Lastprofils von Werkzeugmaschinen. In einem ersten Schritt wird eine Potenzialanalyse durchgeführt, um Module zu identifizieren, die geeignet sind für die Lastbedarfsregelung und um die Menge an erreichbaren Lastreduzierungen abzuschätzen. In einem zweiten Schritt wird eine Lastoptimierung unter Einbeziehung der relevanten Module auf Basis einer quadratischen Zielfunktion durchgeführt. Der Schwerpunkt der Optimierung kann auf die Lastminimierung, Lastflexibilisierung oder Lastglättung gelegt werden. (Abele et al. 2016, S. 164–169; Schraml 2018, S. 53–122)

Liu et al. (2019) entwickeln einen Ansatz, den Energieverbrauch von Werkzeugmaschinen während der Rüstzeiten zu verringern. Dabei wird mit Hilfe eines genetischen Algorithmus gleichzeitig die Leerlaufleistung der Maschine reduziert und die Leerlaufzeiten verkürzt. Die Leerlaufleistung wird insbesondere durch das Abschalten aller nicht benötigten Verbraucher reduziert. (Liu et al. 2019, S. 192–196)

3.3 Zwischenfazit

In dem zurückliegenden Kapitel wurde der Stand der Forschung und Technik hinsichtlich einer energiesensitiven Produktionsplanung und –steuerung sowie der Laststeuerung anhand eines methodischen Vorgehens strukturiert erfasst, kategorisiert und analysiert.

Die Ansätze der energiesensitiven Produktionssteuerung sowie der Laststeuerung wiesen, vor dem Hintergrund der Entwicklung einer dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Produktionssteuerung, die höchste Relevanz auf. Die Ansätze der energiesensitiven Produktionsplanung zeigten hingegen ein geringeres Relevanzlevel für die vorliegende Arbeit. Da jedoch die Übergänge zwischen Produktionsplanung und -steuerung oft fließend sein können, wurden auch erfasst und bewertet. Im Folgenden sollen die Ansätze der energiesensitiven Produktionsplanung jedoch nicht weiter betrachtet werden.

Dies ist die Grundlage für die Anforderungsdefinition einer dezentralen energieflexiblen Steuerung und die darauf aufbauende Bewertung der im Stand der Technik identifizierten Ansätze.

4 Anforderungen und Handlungsbedarf

Die Analyse des Stands der Forschung und Technik, unter Berücksichtigung der relevanten Grundlagen, zeigt eine Vielzahl unterschiedlicher energiesensitiver Planungs- und Steuerungsansätze auf. Es ist demnach zu untersuchen, inwieweit diese Ansätze bereits die aufgeworfene Forschungsfrage – Wie ein Produktionssystem dezentral, automatisiert und energieflexibel gesteuert werden kann – beantworten.

Dafür werden im ersten Schritt Anforderungen an eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung entwickelt. In einem zweiten Schritt werden die Ansätze aus dem Stand der Forschung und Technik den Anforderungen gegenübergestellt und der Handlungsbedarf abgeleitet.

4.1 Anforderungsdefinition

Zur Strukturierung der Anforderungen können drei Anforderungsklassen definiert werden. Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich, Anforderungen an das Steuerungs- und Regelungssystem und Anforderungen an die Systemoptimierung.

4.1.1 *Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich*

Die Definition des Bilanz- und Objektbereichs beschreibt den Wirkungsraum des Steuerungssystems und ist somit von entscheidender Relevanz für die Entwicklung der dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung. Die Anforderungen werden wie folgt definiert:

Abbildung des relevanten Objektbereichs

Zunächst ist die Definition des Objektbereichs notwendig. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, umfasst der definierte Bilanzraum die Fabrik, bestehend aus Produktionssystem und Energiesystem. Das Produktionssystem enthält die Betriebsmittel zur wertschöpfenden Transformation. Das Energiesystem beinhaltet an dieser Stelle alle Anlagen zur Verteilung elektrischer Energie in der Fabrik.

Vollständigkeit des Zielsystems

Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, wird das logistische Zielsystem um den Faktor Energie erweitert (Bild 17). Dabei werden sowohl Durchlaufzeit, Termintreue, Auslastung, Bestände als auch Energieflexibilität betrachtet.

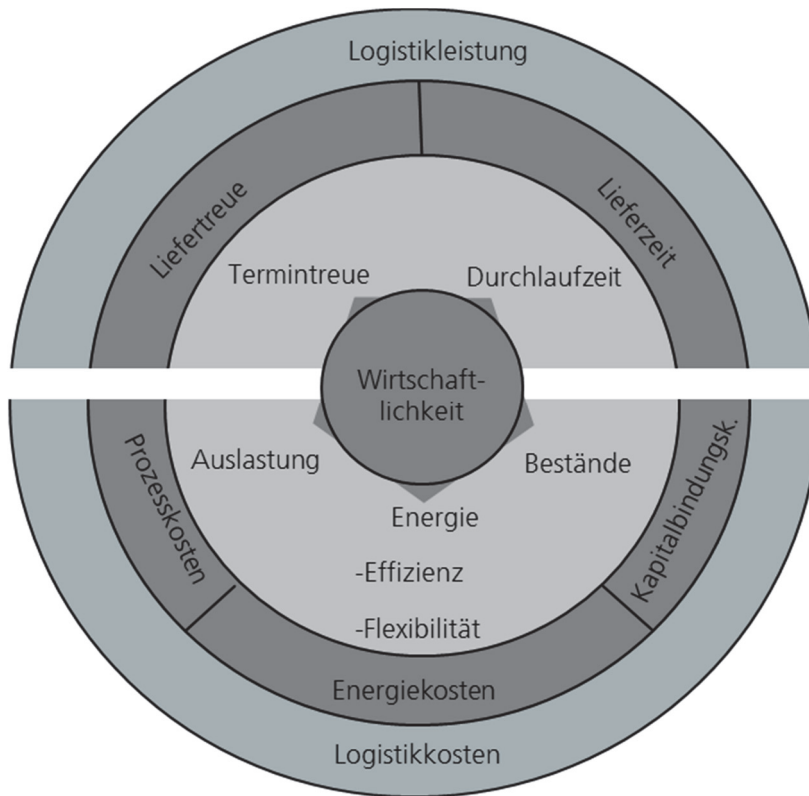


Bild 17: Die Erweiterung des logistischen Zielsystems um den Faktor Energie nach (Große Böckmann 2014, S. 72)

Dynamische Skalierbarkeit

Produktionssysteme sind dynamische Systeme, die sich im Laufe der Zeit wandeln (vgl. Kapitel 2.1). Das dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerungssystem muss demnach in der Lage sein, sowohl neue Teilnehmer als auch neue Teilnehmerklassen aufzunehmen, um sich dem Produktionssystem anpassen zu können.

4.1.2 Anforderungen an das Steuerungs- und Regelungssystem

Das energieflexible Steuerungs- und Regelungssystem muss in der Lage sein, in kürzester Zeit komplexe, ausgedehnte und große (eine große Anzahl von Teilnehmern) Systeme zu steuern und zu optimieren. Um dies zu ermöglichen, werden die folgenden Anforderungen definiert:

Automatisierung des Steuerungssystems

Das Steuerungssystem muss in der Lage sein, selbstständig Entscheidungen zur Steuerung und Regelung von Prozessen zu treffen (vgl. Kapitel 2.3.5). Die Entscheidungen des Systems beruhen auf der Verknüpfung von Eingangsdaten mit den jeweiligen Zuständen des Systems. Die Produktion in Abhängigkeit der hochdynamischen elektrischen Energieversorgung zu optimieren, erfordert demzufolge einen möglichst hohen Automatisierungsgrad.

Dezentrale Steuerungsarchitektur

Dezentrale Steuerungsansätze in der Produktion ermöglichen es Objekten, Informationen selbstständig zu verarbeiten und Entscheidungen zu treffen (vgl. Kapitel 2.3.5). Dies führt zu einer Verschlankung der Planung und Verlagerung der Entscheidungen hin zur Produktionssteuerung in Echtzeit. Dabei trifft jedes Objekt seine eigenen Entscheidungen, indem es nur die notwendigen Informationen auswertet, die in seiner Umgebung verfügbar sind. Dies vermeidet umfangreiche und zeitaufwändige Berechnungen und bietet die Möglichkeit, schnell auf plötzliche Veränderungen zu reagieren.

Geschlossene Regelkreise zur energetischen Systemoptimierung

Um Prozesse und ganze Produktionssysteme energetisch und nachhaltig zu optimieren, sind geschlossene Regelkreise notwendig (vgl. Kapitel 2.2.5). So kann eine zielorientierte Prozessbeeinflussung durch die Rückkopplung von Kontrollergebnissen ermöglicht werden. Es ist dementsprechend ein energetischer Soll-Ist-Vergleich auf Maschinenebene erforderlich.

Definition von mathematischen Steuerungsalgorithmen

Um das Steuerungssystem softwaretechnisch abbilden zu können, muss die energetische Optimierung des Produktionssystems mathematisch beschrieben werden und Steuerungsalgorithmen müssen zur Lösungsfindung formuliert werden (vgl. Kapitel 2.3.5).

4.1.3 Anforderungen an die Systemoptimierung

Die Systemoptimierung kann auf unterschiedlichen Produktionsebenen und vor dem Hintergrund unterschiedlicher Optimierungsziele erfolgen. Für das zu entwickelnde Steuerungs- und Regelungssystem können folgende Anforderungen an die Systemoptimierung abgeleitet werden:

Preisbasierte Systemoptimierung

Preisbasierte Ansätze bieten den Nutzern zeitabhängig variable Energiepreise (vgl. Kapitel 2.4.1). Die Idee besteht darin, dass die Verbraucher dynamisch ihre Energieverbrauchsmuster entsprechend dem Verlauf der Strompreise anpassen, anstatt ihre Lasten durch externe Regelungseingriffe beeinflussen zu lassen.

Echtzeitfähige Systemoptimierung

Um auf hochfrequente Änderungen in der Energieversorgung reagieren zu können, sind kurze Reaktionszeiten erforderlich (vgl. Kapitel 2.4.1). Das Regelungs- und Steuerungssystem muss in der Lage sein, möglichst in Echtzeit Systemoptimierungen vorzunehmen.

4.2 Einordnung bestehender Ansätze und Handlungsbedarf

Basierend auf den entwickelten Anforderungen werden die Ansätze bewertet, die im Stand der Forschung und Technik identifiziert wurden und ein Relevanzlevel von vier aufweisen. Zunächst werden die Ansätze der energiesensitiven Produktionssteuerung untersucht. Darauffolgend werden die Ansätze der Laststeuerung analysiert. Abschließend wird der Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit abgeleitet.

4.2.1 Ansätze der Produktionssteuerung

Bewertet man die Ansätze der energiesensitiven Produktionssteuerung hinsichtlich deren Bilanz- und Objektbereichs, so ist zu erkennen, dass alle Ansätze den definierten Objektbereich des Produktionssystems abdecken (Tabelle 11). Das geforderte Zielsystem wird hingegen in seiner Vollständigkeit nur durch die Hälfte der untersuchten Ansätze abgebildet. Eine teilweise dynamische Skalierbarkeit weisen nur vier der 15 Ansätze auf.

Betrachtet man im nächsten Schritt die Anforderungen an das Steuerungs- und Regelungssystem, so wird deutlich, dass neun der 15 Ansätze eine Teilautomatisierung aufweisen (Tabelle 12). Ein dezentraler Ansatz der Systemsteuerung wird von Putz und Langer vorgestellt. Die Ansätze von Frigerio & Matta, Beier und Schultz weisen einzelne dezentrale Elemente auf, wohingegen die übrigen Ansätze auf einer zentralen Steuerungsstruktur basieren. Vollständig geschlossene Regelkreise werden in Teilen von Li et al., Zou & Li sowie Beier etabliert. Die übrigen Ansätze der energiesensitiven Produktionssteuerung können diese Anforderung nicht erfüllen. Eine mathematische Systembeschreibung wird in Teilen von neun der 15 Ansätze vorgestellt. Die übrigen Ansätze zeigen an dieser Stelle keine Lösungen auf.

Die Anforderungen hinsichtlich der Systemoptimierung weisen insbesondere im Bereich der preisbasierten Steuerungsverfahren eine Lücke auf (Tabelle 13). Hier ist bei keinem der untersuchten Ansätze eine Lösung zu finden. Ein echtzeitfähiges Steuerungssystem wird nur von Beier vorgestellt. Lediglich Putz und Langer stellen in Teilen Lösungsbausteine in diesem Bereich vor.

Tabelle 11: Bewertung der Ansätze der energiesensitiven Produktionssteuerung hinsichtlich der Anforderungen des Bilanz- und Objektbereichs

<i>Autor</i>	Li et al. (2012)	Neugebauer et al. (2012)	Putz et al. (2012)	Fernandez et al. (2013)	Zhou & Li (2013)	Langer (2014)	Moon & Park (2014)	Sun et al. (2014)	Willeke (2014, 2015, 2016)	Frigerio & Matta (2015)	Schuh et al. (2015)	Beier et al. (2017)	Schultz (2018)	Grosch et al. (2019)	Roesch et al. (2019)
<i>Abbildung des relevanten Objektbereichs</i>	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
<i>Vollständigkeit des Zielsystem</i>	◐	●	●	◐	◐	●	◐	◐	●	◐	●	◐	●	●	●
<i>Dynamische Skalierbarkeit</i>	○	○	○	○	○	○	○	○	◐	◐	◐	○	○	◐	○
Legende:															
nicht erfüllt	○														
in Teilen erfüllt	◐														
erfüllt	●														

Tabelle 12: Bewertung der Ansätze der energiesensitiven Produktionssteuerung hinsichtlich der Anforderungen des Steuerungs- und Regelungssystems

Autor	Li et al. (2012)	Neugebauer et al. (2012)	Putz et al. (2012)	Fernandez et al. (2013)	Zhou & Li (2013)	Langer (2014)	Moon & Park (2014)	Sun et al. (2014)	Willeke (2014, 2015, 2016)	Frigerio & Matta (2015)	Schuh et al. (2015)	Beier et al. (2017)	Schultz (2018)	Grosch et al. (2019)	Roesch et al. (2019)
<i>Automatisierung des Steuerungssystems</i>	◐	◐	◐	◐	◐	◐	○	○	○	◐	◐	◐	○	○	○
<i>Dezentralität Steuerungsarchitektur</i>	○	○	●	○	○	●	○	○	○	◐	○	◐	◐	○	○
<i>Geschlossene Regelkreise zur energetischen Systemoptimierung</i>	◐	○	○	○	◐	○	○	○	○	○	○	◐	○	○	○
<i>Mathematische Steuerungsalgorithmen</i>	◐	○	○	◐	◐	○	○	○	◐	◐	◐	○	◐	●	●
Legende:															
nicht erfüllt	○														
in Teilen erfüllt	◐														
erfüllt	●														

Tabelle 13: Bewertung der Ansätze der energiesensitiven Produktionssteuerung hinsichtlich der Anforderungen an die Systemoptimierung

<i>Autor</i>	Li et al. (2012)	Neugebauer et al. (2012)	Putz et al. (2012)	Fernandez et al. (2013)	Zhou & Li (2013)	Langer (2014)	Moon & Park (2014)	Sun et al. (2014)	Willeke (2014, 2015, 2016)	Frigerio & Matta (2015)	Schuh et al. (2015)	Beier et al. (2017)	Schultz (2018)	Grosch et al. (2019)	Roesch et al. (2019)
<i>Preisbasierte Systemoptimierung</i>	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Echtzeitfähige Systemoptimierung</i>	○	○	◐	○	○	◐	○	○	○	○	○	●	○	○	○
Legende:															
nicht erfüllt	○														
in Teilen erfüllt	◐														
erfüllt	●														

4.2.2 Ansätze der Laststeuerung

Bewertet man die Ansätze der Laststeuerung hinsichtlich deren Bilanz- und Objektbereich, so zeigt sich, dass die Ansätze von Dam et al., Mitra et al. und Weinert & Moser den definierten Objektbereich des Produktionssystems abbilden (Tabelle 14). Der Ansatz nach Florea et al. bildet den Objektbereich in Teilen ab. Die übrigen Ansätze weisen in diesem Zusammenhang einen starken Bezug zu einzelnen Elementen des Produktionssystems auf und betrachten dieses nicht im geforderten Umfang. Das definierte Zielsystem wird in seiner Vollständigkeit durch Popp & Zäh sowie Schraml betrachtet. Dabei integrieren Dam et al., Florea et al., Li & Hong sowie Leo & Engel Teilbereiche des Zielsystems. Eine dynamische Skalierbarkeit im Sinne der Anforderung weist keiner der Ansätze auf.

Betrachtet man im nächsten Schritt die Anforderungen an das Steuerungs- und Regelungssystem, so wird deutlich, dass elf der 13 Ansätze eine Teil- oder Vollautomatisierung aufweisen (Tabelle 15). Ein dezentraler Ansatz der Systemsteuerung wird von Deindl et al., Florea et al. sowie Weinert & Moser vorgestellt. Leo & Engel weisen in Teilen einen dezentralen Steuerungsansatz auf. Die übrigen Ansätze erfüllen die Anforderung nicht. Vollständig geschlossene Regelkreise werden von Yusta et al., Popp & Zäh sowie Schraml etabliert. Die übrigen Ansätze der Laststeuerung können diese Anforderung nicht erfüllen. Eine mathematische Systembeschreibung wird in Teilen von neun der 13 Ansätze vorgestellt. Die übrigen Ansätze zeigen an dieser Stelle keine Lösungen auf.

Die Anforderungen hinsichtlich der Systemoptimierung zeigen Lücken im Bereich der preisbasierten Steuerungsverfahren (Tabelle 16). Diese Anforderung wird lediglich durch Florea et al. sowie Weinert & Moser in Teilen erfüllt. Die Anforderung hinsichtlich der Echtzeitfähigkeit des Steuerungssystems wird nur von Popp & Zäh, Schraml sowie Li & Hong erfüllt.

Tabelle 14: Bewertung der Ansätze der Laststeuerung hinsichtlich der Anforderungen des Bilanz- und Objektbereichs

<i>Autor</i>	Dam et al. (2008)	Hommelberg et al. (2008)	Deindl et al. (2008)	Van Staden et al (2009)	Yusta et al. (2010)	Mitra et al. (2012)	Florea et al. (2013)	Popp & Zäh (2016)	Weinert & Mose (2016)	Schraml (2016, 2018)	Li & Hong (2017)	Leo & Engell (2018)	Liu et al. (2019)
<i>Abbildung des relevanten Objektbereichs</i>	●	○	○	○	○	●	◐	○	●	○	●	○	○
<i>Vollständigkeit des Zielsystem</i>	◐	○	○	○	○	○	◐	●	○	●	◐	◐	○
<i>Dynamische Skalierbarkeit</i>	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Legende:													
nicht erfüllt	○												
in Teilen erfüllt	◐												
erfüllt	●												

Tabelle 15: Bewertung der Ansätze der Laststeuerung hinsichtlich der Anforderungen des Steuerungs- und Regelungssystems

Autor	Dam et al. (2008)	Hommelberg et al. (2008)	Deindl et al. (2008)	Van Staden et al (2009)	Yusta et al. (2010)	Mitra et al. (2012)	Florea et al. (2013)	Popp & Zäh (2016)	Weinert & Mose (2016)	Schraml (2016, 2018)	Li & Hong (2017)	Leo & Engell (2018)	Liu et al. (2019)
<i>Automatisierung des Steuerungssystems</i>	●	○	◐	◐	●	◐	◐	●	◐	●	◐	◐	○
<i>Dezentralität Steuerungsarchitektur</i>	○	○	●	○	○	○	●	○	●	○	○	◐	○
<i>Geschlossene Regelkreise zur energetischen Systemoptimierung</i>	◐	○	○	○	●	○	○	●	○	●	○	○	○
<i>Mathematische Steuerungsalgorithmen</i>	◐	○	◐	◐	◐	◐	○	○	○	◐	◐	◐	◐
Legende:													
nicht erfüllt	○												
in Teilen erfüllt	◐												
erfüllt	●												

Tabelle 16: Bewertung der Laststeuerung hinsichtlich der Anforderungen an die Systemoptimierung

Autor	Dam et al. (2008)	Hommelberg et al. (2008)	Deindl et al. (2008)	Van Staden et al (2009)	Yusta et al. (2010)	Mitra et al. (2012)	Florea et al. (2013)	Popp & Zäh (2016)	Weinert & Mose (2016)	Schraml (2016, 2018)	Li & Hong (2017)	Leo und Engell (2018)	Liu et al. (2019)
Preisbasierte Systemoptimierung	○	○	○	○	○	○	◐	○	◐	○	○	○	○
Echtzeitfähige Systemoptimierung	○	○	○	○	○	○	○	●	○	●	●	○	○
Legende:													
nicht erfüllt	○												
in Teilen erfüllt	◐												
erfüllt	●												

4.2.3 Zusammenfassung und Handlungsbedarf

Betrachtet man die vorgenommenen Untersuchungen, zeigen sich im Rahmen der energiesensitiven Produktionssteuerung insbesondere Defizite im Bereich der Systemoptimierung sowie im Bereich des Steuerungs- und Regelungssystems (Tabelle 17). Li et al., Zhou & Li sowie Frigerio & Matta betrachten zwar den definierten Objektbereich, verfolgen jedoch einen zentralen Steuerungsansatz, der nicht preisbasiert ausgestaltet ist. Putz et al. und Langer stellen einen dezentralen Ansatz vor, der jedoch hinsichtlich der mathematischen Steuerungsalgorithmen vor dem Hintergrund einer preisbasierten Systemoptimierung nicht den Anforderungen gerecht wird. Schuh et al. formulieren zwar Steuerungsalgorithmen für den definierten Objektbereich, jedoch beziehen sich diese auf eine zentrale Steuerungsstruktur. Beier entwickelt ein Steuerungssystem, das jedoch nur schwer skalierbar ist und, wie auch Schultz, keinen dezentralen preisbasierten Optimierungsansatz verfolgt.

Im Bereich der Laststeuerung weisen die Ansätze vor allem im Bereich des Bilanzraums und hinsichtlich einer preisbasierten Optimierung Defizite auf (Tabelle 18). Dam et al., Mitra et al. Florea et al. sowie Li & Hong können in Teilen die Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich erfüllen, weisen dabei jedoch Schwächen hinsichtlich der Anforderungen an das Steuerungs- und Regelungssystem sowie der Anforderungen an die Systemoptimierung auf. Popp & Zäh sowie Schraml erfüllen zwar die Anforderungen an das Steuerungs- und Regelungssystem, werden jedoch den Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich nicht gerecht.

Tabelle 17: Bewertung der Ansätze der energiesensitiven Produktionssteuerung hinsichtlich der Anforderungsklassen

Autor	Li et al. (2012)	Neugebauer et al. (2012)	Putz et al. (2012)	Fernandez et al. (2013)	Zhou & Li (2013)	Langer (2014)	Moon & Park (2014)	Sun et al. (2014)	Willeke (2014, 2015, 2016)	Frigerio & Matta (2015)	Schuh et al. (2015)	Beier et al. (2017)	Schutz (2018)	Grosch et al. (2019)	Roesch et al. (2019)
Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Anforderungen an das Steuerungs- und Regelungssystem	●	○	●	○	●	●	○	○	○	●	●	●	●	○	○
Anforderungen an die Systemoptimierung	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Legende:															
nicht erfüllt	○														
in Teilen erfüllt	●														
erfüllt	●														

Tabelle 18: Bewertung der Ansätze der Laststeuerung hinsichtlich der Anforderungsklassen

Autor	Dam et al. (2008)	Hommelberg et al. (2008)	Deindl et al. (2008)	Van Staden et al (2009)	Yusta et al. (2010)	Mitra et al. (2012)	Florea et al. (2013)	Popp & Zäh (2016)	Weinert & Mose (2016)	Schraml (2016, 2018)	Li & Hong (2017)	Leo und Engell (2018)	Liu et al. (2019)
Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich	●	○	○	○	○	●	●	○	○	○	●	○	○
Anforderungen an das Steuerungs- und Regelungssystem	●	○	●	○	●	○	●	●	○	●	○	○	○
Anforderungen an die Systemoptimierung	○	○	○	○	○	○	○	●	○	●	●	○	○
Legende:													
nicht erfüllt	○												
in Teilen erfüllt	●												
erfüllt	●												

Abschließend ist festzuhalten, dass die unterschiedlichen Ansätze jeweils methodische Hilfestellungen geben können, jedoch nicht in der Lage sind, die definierte Forschungsfrage in ihrer Vollständigkeit zu beantworten. Es fehlt eine dezentrale, preisbasierte Systemsteuerung, die es erlaubt, komplexe Produktionssysteme energieflexibel und automatisiert zu steuern.

4.3 Zwischenfazit

Im zurückliegenden Kapitel wurden Anforderungen für eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung definiert. Diese wurden hinsichtlich des Bilanz- und Objektbereichs, des Steuerungs- und Regelungssystems und der Systemoptimierung strukturiert.

Darauf aufbauend wurden die im Stand der Technik identifizierten Ansätze bewertet und analysiert. Dabei zeigte sich, dass im Rahmen der energiesensitiven Produktionssteuerung insbesondere Defizite im Bereich einer dezentralen preisbasierten Systemoptimierung vorlagen. Im Bereich der Laststeuerung wiesen die Ansätze vor allem im Bereich des Bilanzraums Defizite auf. Zwar existieren hier Ansätze, die einzelne Maschinen optimieren, jedoch wird dabei nicht das gesamte Produktionssystem betrachtet.

Somit konnte der Handlungsbedarf für eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Produktionssteuerung abgeleitet werden und die Teilforschungsfrage drei beantwortet werden: *Welche Anforderungen werden an eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Produktionssteuerung gestellt?*

Aufbauend auf den gewonnen Erkenntnissen kann nun mit der Entwicklung einer dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung begonnen werden.

5 Entwicklung einer dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung

In diesem Kapitel, dem der Kern der Arbeit, wird eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung der Produktion, entwickelt. Aufbauend auf dem methodischen Ansatz des Wasserfallmodells, wird das Steuerungssystem strukturiert und mathematisch beschrieben.

5.1 Methodisches Vorgehen

Für die Entwicklung der dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung wird methodisch, entsprechend einem Automatisierungsprojekt, vorgegangen (Bild 18).

Ziel ist es, einen Prototypen für eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung zu entwickeln. Dabei wird eine erste Version des Automatisierungssystems erarbeitet, anhand der geklärt wird, ob das vorgesehene Lösungskonzept den gestellten Anforderungen gerecht wird. (Lauber et al. 1999, S. 61)

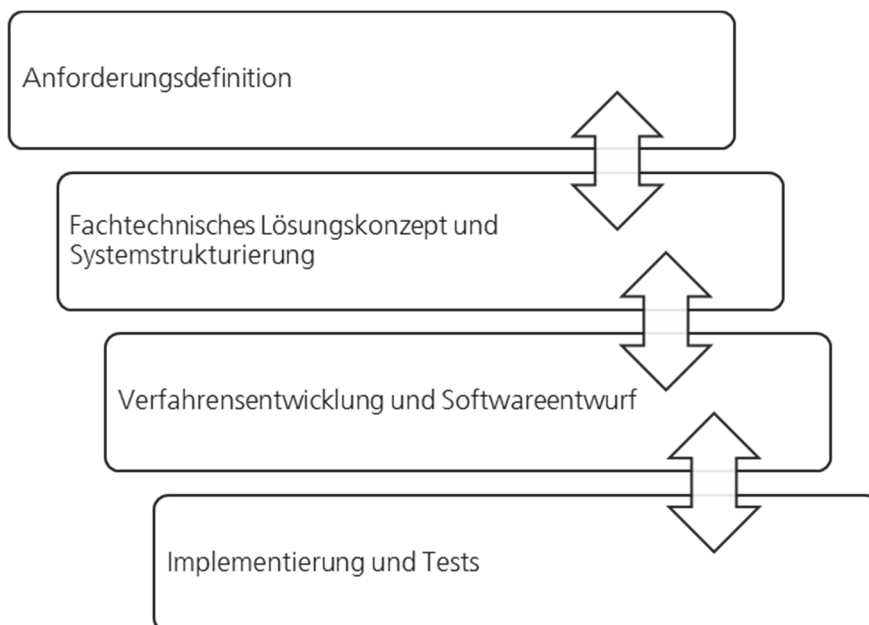


Bild 18: Die Steuerungsentwicklung auf Basis des Wasserfallmodells nach (Lauber et al. 1999, S. 61)

In einem ersten Schritt werden Anforderungen definiert, die an das zu entwickelnde System gestellt werden (vgl. Kapitel 4).

Im nächsten Schritt wird ein fachtechnisches Lösungskonzept entwickelt. Es enthält eine zusammenfassende Darstellung des Anwendungssystems aus fachlicher Sicht. Die wesentlichen Elemente sind die Abgrenzung und Beschreibung des Gegenstandsbereichs, die Anforderungen an das Anwendungssystem, das Anwendungsmodell und die Beschreibung der Struktur. (Hesse et al. 1994, S. 97) Darauf aufbauend wird eine Systemstrukturierung vorgenommen, die die Systemelemente und deren Wechselbeziehungen beschreibt und priorisiert. (Tröster 2015, S. 28)

Im nächsten Schritt wird die Verfahrensentwicklung einer dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung vorgenommen und ein Softwareentwurf vorgestellt. Abschließend werden Implementierungstests auf simulativer Basis durchgeführt.

5.2 Fachtechnisches Lösungskonzept und Systemstrukturierung

Ziel ist die Entwicklung einer dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung. Die Steuerung berücksichtigt dabei die elektrische Infrastruktur und optimiert den Energieverbrauch in Abhängigkeit der Produktionsplanung und -steuerung.

Der Zweck der dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung für ein Produktionssystem, liegt einerseits in der Optimierung des elektrischen Stromverbrauchs angesichts eines schwankenden Energiedargebots und andererseits in der Verbraucherpriorisierung bei extremen Lastfällen, wie dem Wegfall der externen Stromversorgung. Die dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung ist ein offenes System, das es dem Nutzer erlaubt, beliebige Erzeuger und Verbraucher einzubinden. Anbietern erlaubt es, kompatible Geräte für das Steuerungssystem zu entwickeln. Die Regelung ist skalierbar, d.h., nicht alle Möglichkeiten, die das System bietet, müssen in jeder Anwendung umgesetzt werden. Und nicht alle Funktionen, die spezifiziert sind, müssen von jeder Komponente unterstützt werden.

Der Bilanzraum der dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung umfasst die Fabrik, bestehend aus Produktions- und Energiesystem. Das Produktionssystem enthält die Betriebsmittel zur wertschöpfenden Transformation im Sinne der Produktion. Das Energiesystem umfasst alle Anlagen zur Verteilung elektrischer Energie in der Fabrik.

5.2.1 Netz- und Energiemanagement

Netzmanagement ist im Gegensatz zum Energiemanagement kein einheitlich definierter oder normativ erfasster Begriff. Legt man vorhandene Beschreibungen von z. B. Energieversorgern, Verteilnetzbetreibern oder produzierenden Unternehmen zugrunde, können vier Kernbereiche identifiziert und wie folgt beschrieben werden (Bild 19): (Weckmann et al. 2017, S. 603)

Die Betriebsmittelverwaltung umfasst in diesem Zusammenhang alle Aspekte der Planung und der Instandhaltung des Netzes.

Die Versorgungsqualität definiert die Bereitstellung von elektrischer Energie in der vom Verbraucher benötigten Qualität. Hierzu gehört die Versorgungszuverlässigkeit mit dem Ziel, die Anzahl und Dauer von Unterbrechungen in der Versorgung zu minimieren und Schnittstellen für die Verbindungen zwischen Geräten und Versorgungsnetz zu bestimmen. (BIHK 2017b, S. 12–15)

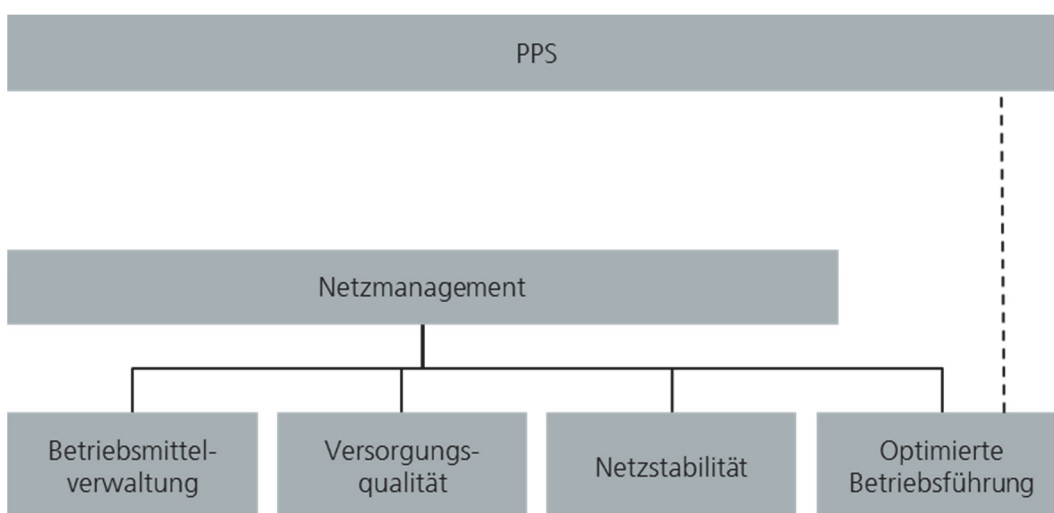


Bild 19: Funktionen des Netzmanagements

Der Netzstabilität sind alle planerischen Tätigkeiten und technischen Systemeigenschaften zugeordnet, die für einen sicheren und stabilen Betrieb des Netzes notwendig sind. Dies schließt insbesondere die Lastflussregelung zur Systemstabilisierung während des Betriebs ein. Treten Fehler aufgrund höherer Gewalt auf, sieht das Netzmanagement Rückfallszenarien vor, die das System in einen sicheren Zustand bringen. (BIHK 2017a, S. 9,)

Die optimierte Betriebsführung setzt sich aus der Zustandsüberwachung und der Verbrauchsoptimierung zusammen und bildet zeitgleich die Schnittstelle zum Energiemanagement sowie zur Produktionsplanung und -steuerung. Die Zustandsüberwachung des Netzes umfasst dabei Mechanismen zur Überwachung, Vermessung oder Fehlerlokalisierung elektrischer Zustandsparameter. Die Energieverbrauchsoptimierung beeinflusst in Abhängigkeit der Produktionsziele und in Anlehnung an das Energiemanagement den Energieverbrauch des Systems. (Weckmann et al. 2017, S. 604)

Zusammenfassend ist das primäre Ziel des Netzmanagements die gezielte Verteilung und Bereitstellung von elektrischer Energie in der notwendigen Qualität und Quantität unter Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten. Die Betrachtung der Fabrik nicht nur als reinen Verbraucher, sondern als Prosumer mit eigener Energieerzeugung und der Option, Regelenergie am Markt anzubieten, erhöht die Komplexität des industriellen Versorgungsnetzes, so dass Aufgaben der Energieverteilung im Verantwortungsbereich des Endverbrauchers liegen. (Weckmann et al. 2017, S. 604)

5.2.2 Konzept eines dezentralen Netzmanagements

Grundsätzlich kann zwischen zentralen und dezentralen Regelungsarchitekturen des Netzmanagements unterschieden werden, wobei auch Mischansätze möglich sind. Das zentrale Regelungssystem ist klassisch nach dem Top-Down-Prinzip aufgebaut. Eine zentrale Regelungseinheit empfängt zyklisch in sehr kurzen Zeitintervallen die Energiebedarfe und -angebote der angeschlossenen Komponenten (Producer, Prosumer und Consumer). Nachteilig sind vor allem die hohen Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit der Kommunikation in Verbindung mit kurzen Zykluszeiten, die die

Anzahl der Netzteilnehmer beschränken. Die Systemrobustheit hängt demnach sowohl von der Robustheit und Ausfallsicherheit der zentralen Regelung als auch von der dafür notwendigen Kommunikation ab. (Kuhlmann et al. 2017, S. 797) Aus diesem Grund wird das System als dezentrale Regelung aufgebaut. Hierbei erfolgt der Ausgleich der Energiebilanz zwischen Energiebedarf und -angebot im System durch das eigenständige Verhalten eines jeden Netzteilnehmers (Engler et al. 2005, S. 1). Daher wird zwischen aktiven und passiven Komponenten aus Sicht der Systemregelung unterschieden.

Passive Komponenten sind nicht regelbar und werden als Störgrößen betrachtet. Aktive Komponenten detektieren ein Regelsignal und stellen ihr energetisches Verhalten in Abhängigkeit davon ein.

5.2.3 *Komponenten*

Aus Sicht des elektrischen Energiesystems können verschiedene Komponentenklassen unterschieden werden. Um eine volle Systemfunktionalität zu gewährleisten, ist es wichtig, die Komponenten in ihrer Funktion zu beschreiben und klar voneinander zu differenzieren. Diese können nach Weckmann et al. wie folgt definiert werden: (Weckmann et al. 2017, S. 604-605)

Als Erzeuger werden alle Komponenten definiert, die Energie grundsätzlich zeitlich unbegrenzt von einer externen Energiequelle als elektrische Energie bereitstellen. Diese kann durch den Anschluss an ein externes Versorgungsnetz erfolgen oder durch die Wandlung eines nicht elektrischen Energieträgers (z. B. PV-Anlage) erfolgen. Darüber hinaus wird zwischen rückspeisefähigen (bidirektional) und nicht rückspeisefähigen Quellen (unidirektional) sowie regelbaren und nicht regelbaren Quellen unterschieden.

Als Verbraucher werden Komponenten definiert, die elektrische Energie im Rahmen einer wertschöpfenden Tätigkeit oder im Zusammenhang mit einem Produktionsprozess wandeln. Diese entnehmen dem Energiesystem zeitlich unbegrenzt Energie.

Sind die Verbraucher energetisch rückspeisefähig, werden sie als bidirektional bezeichnet. Wenn der Zustand eines Verbrauchers durch das Netzmanagement beeinflusst werden kann, kann dieser in die optimierte Betriebsführung eingebunden werden.

Prosumer entnehmen dem elektrischen Energiesystem eine begrenzte Menge Energie und können diese, abzüglich innerer Verluste, zeitversetzt und vollständig zurückspeisen. Sie sind in der Regel kein Teil der Wertschöpfungskette in der Produktion und dienen den Zielen der Versorgungsqualität, der Systemstabilität oder der optimierten Betriebsführung. Prosumer sind immer bidirektional ausgeführt.

Darüber hinaus können weitere Komponenten wie Schalt- und Schutzelemente oder Messtechnik definiert werden, was hier im Detail nicht weiter erläutert wird.

5.2.4 Kommunikationstopologie

Unter Kommunikation wird vom Netzmanagement ein bidirektionaler Austausch von Informationen zwischen Komponenten verstanden. Grundsätzlich muss dabei zwischen Systemen, die vom Netz entkoppelt sind (Microgrids), und nicht entkoppelten Systemen unterschieden werden. In Microgrids können die Netzspannung in einem DC-System oder die Frequenz in einem AC-System als energetische Regelgrößen genutzt werden. Die Netzspannung oder -frequenz wird demnach zur Kommunikationsgröße (Bild 20). Die Regelung der aktiven Komponenten folgt Regelkurven, die beispielsweise den Zusammenhang zwischen Spannung und Strom wiedergeben. Wird ein DC-Netz stärker belastet, so erhöht sich der fließende Strom und gleichzeitig verringert sich die Spannung. Diese Spannungsveränderung können alle aktiven Teilnehmer messen und reagieren entsprechend ihres individuellen Regelverhaltens. Es stellt sich ein neues Spannungsniveau ein, welches für einen Ausgleich des Energieangebots und -bedarfs im System sorgt. Durch eine entsprechende Parametrierung der Regelung in den Geräten können unterschiedliche aktive Komponenten priorisiert werden. Störungen oder Ausfälle einzelner Komponenten werden sofort durch die Regelung in den anderen aktiven Komponenten ausgeglichen.

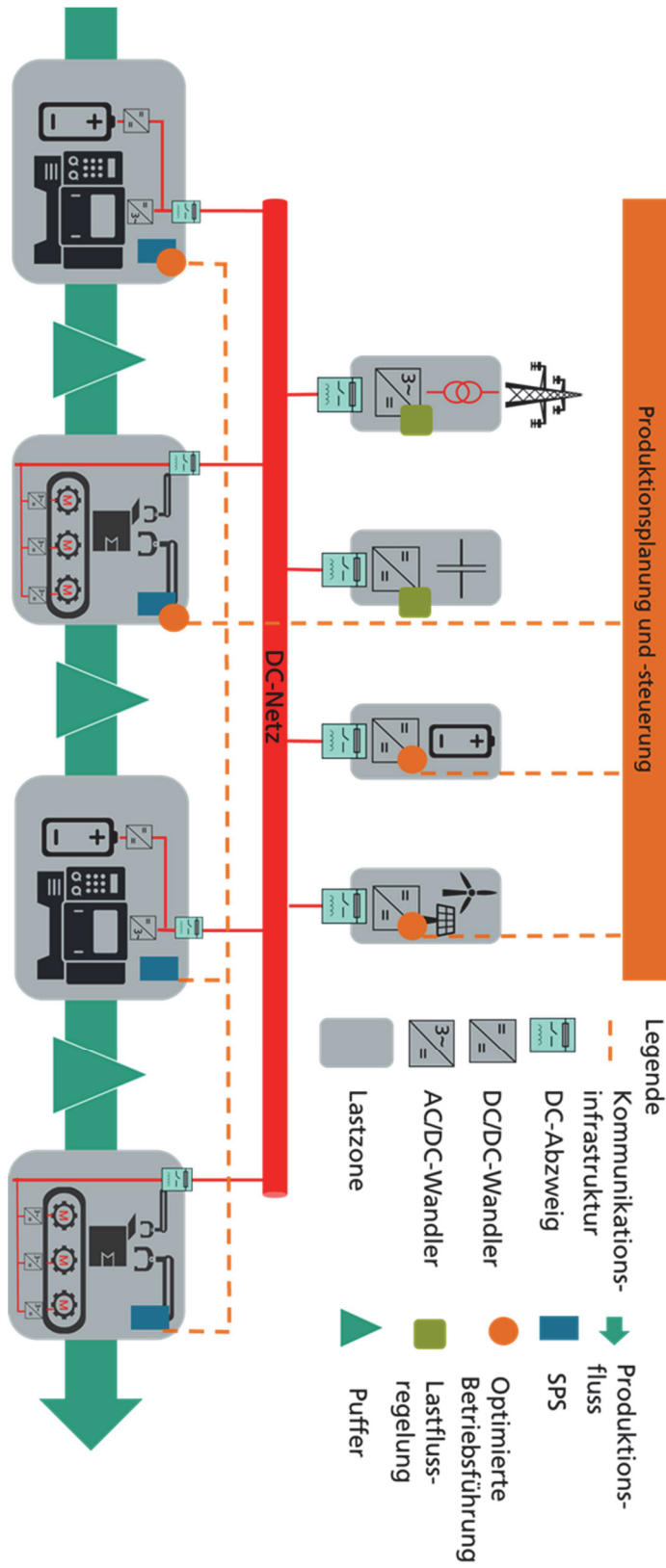


Bild 20: Die Kommunikationstopologie am Beispiel eines Gleichstromnetzes

Systeme, die nicht entkoppelt sind, können nicht auf lokale Netzgrößen als Regelgröße zurückgreifen. In diesen Fall wird ein zusätzliches Regelsignal benötigt. Dabei werden Informationen zum Netzzustand oder der Energieverfügbarkeit in Echtzeit über einen Feldbus übertragen.

5.2.5 Systemstrukturierung

Die energetische Versorgung der Produktion kann auf unterschiedlichen Ebenen strukturiert werden. Im ersten Schritt muss zwischen aktiven und passiven Komponenten unterschieden werden. Da aus Sicht der optimierten Betriebsführung alle passiven Komponenten als Störgrößen betrachtet werden, wird im Folgenden das System grundlegend anhand aktiver Erzeuger, Prosumer und Verbraucher strukturiert. Darüber hinaus werden die Teilnehmer zusätzlich nach ihren Haupt- und Nebenfunktionen, der energetischen Klassifizierung und den Reaktionszeiten unterschieden (Tabelle 19).

Tabelle 19: Klassifizierung der Teilnehmergruppen des Industrienetzes

<i>Teilnehmerklasse</i>	<i>Hauptfunktion</i>	<i>Nebenfunktion</i>	<i>Energie-bereitstellung</i>	<i>Reaktionszeiten</i>
Erzeuger	Bereitstellung von Energie	Optimierte Betriebsführung	Zeitlich unbegrenzte Energieeinspeisung oder ggf. -entnahme	Hoch-dynamisch (Millisekunden bis Sekunden)
Prosumer	Optimierte Betriebsführung	Wertschöpfend durch netzdienliche Nutzung	Begrenzte Energieeinspeisung und -entnahme	Hoch-dynamisch (Millisekunden bis Sekunden)
Verbraucher	Wertschöpfend oder notwendiger Teil der Wertschöpfung	Optimierte Betriebsführung		

Aktive Erzeuger wie beispielsweise Solar- und Windanlagen oder Active Front Ends (Frequenzumrichter mit geregelterm Netzgleichrichter) stellen Energie für das Produktionssystem zur Verfügung. Prosumer wie elektrische oder elektrochemische Speicher stellen zum einen Energie in begrenztem Maße zur Verfügung und zum anderen nehmen sie diese Energie in begrenztem Maße auf. Um den Energiefluss hinsichtlich Netzstabilität, Versorgungsqualität und Energiekosten zu optimieren, werden auf Basis des Zustands des Industrienetzes die Regelungsparameter dieser Teilnehmer angepasst. Die Regelung an sich erfolgt dabei dezentral durch jeden aktiven Teilnehmer. An dieser Stelle sei auf die Arbeiten von Schaab, Ott oder Dragicevic verwiesen, die eine aktive dezentrale Regelung von Erzeugern und Prosumern beschreiben. (Dragicevic et al. 2015, S. 4876–4889; Ott et al. 2015, S. 1–6; Schaab et al. 2018, S. 366–370)

Verbraucher nehmen eine Sonderrolle in industriellen Netzen ein. In erster Linie dienen sie zur wertschöpfenden Tätigkeit im Sinne der Produktion oder stehen mehr oder weniger stark mit einem wertschöpfenden Prozess in Verbindung. Dabei verbrauchen sie elektrische Energie, um Rohstoffe und Halbzeuge zu Produkten zu transformieren und sind damit in das logistische Zielsystem der Produktion eingebunden. Dies bedeutet, dass die energieflexible Regelung der Verbraucher in Einklang mit der Produktionsplanung und -steuerung erfolgen muss.

Die Integration des Faktors Energie kann dabei auf unterschiedlichen Ebenen und mit unterschiedlichen Ansätzen erfolgen (vgl. Kapitel 3.2). Dies kann zum Beispiel planerisch durch eine geschickte Belegungsplanung oder steuernd durch eine energieabhängige Auftragsfreigabe und Reihenfolgebildung erfolgen.

Beim angebotsorientierten Verbrauch wird reaktiv der Energieverbrauch auf Basis von energetischen Regelgrößen angepasst indem der Betriebszustand von Maschinen gewechselt wird. Aus Sicht der logistischen Zielerreichung muss dabei grundsätzlich zwischen produktiven und nicht produktiven Zuständen unterschieden werden. (Haag 2013, S. 74)

Wechselt eine Maschine von einem produktiven in einen nicht produktiven Zustand, so kann eine darauffolgende und direkt gekoppelte Maschine nicht weiter produzieren. Um den Produktionsfluss nicht zu gefährden, müssen die Prozesse logistisch entkoppelbar sein (Bild 21).

Ähnlich dem Energiespeicher wird hier auf Materialspeicher zurückgegriffen. Diese ermöglichen es, den Betriebszustand der vorgelagerten Maschine zu ändern, ohne die direkt nachfolgende Maschine zu beeinflussen.

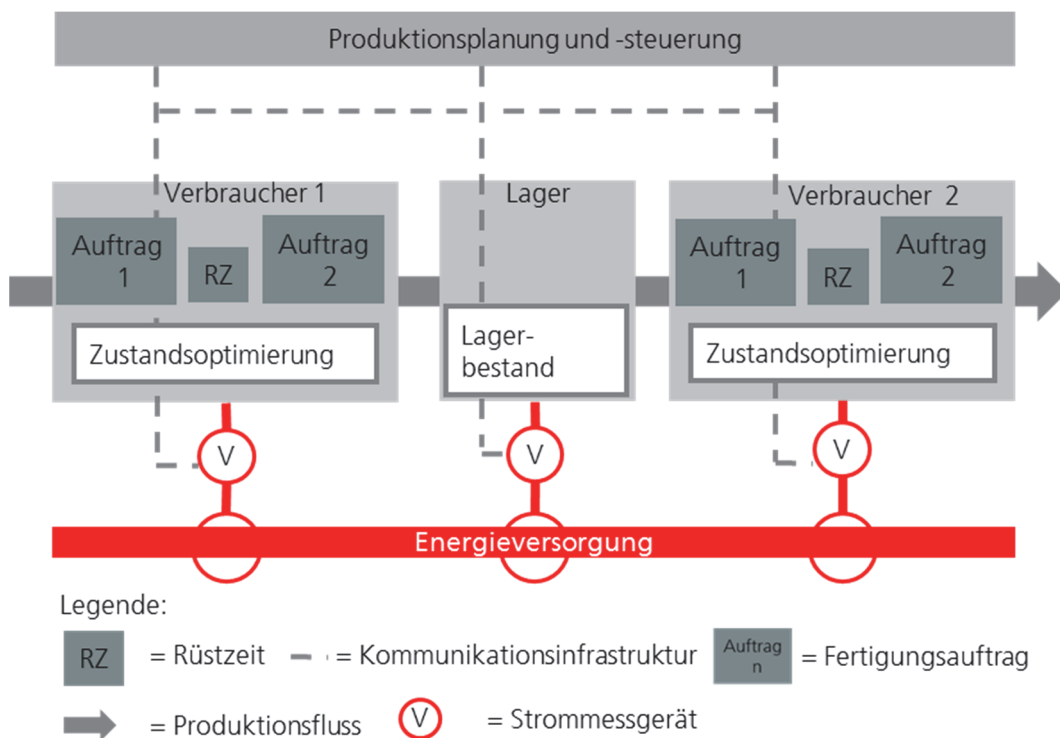


Bild 21: Aufbau der dezentralen Verbraucheroptimierung

5.3 Verfahrensentwicklung zur dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung

Auf Basis des fachtechnischen Lösungskonzepts und der vorgenommenen Systemstrukturierung wird im ersten Schritt die Eignung bestehender Produktionssteuerungsverfahren für eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung im Rahmen eines angebotsorientierten Verbrauchs geprüft. Darauf aufbauend wird eine spezialisierte Verfahrensentwicklung vorgenommen.

5.3.1 Eignung bestehender Produktionssteuerungsverfahren

Die erste zentrale Anforderung an das Steuerungskonzept liegt im dezentralen Ansatz der Steuerung. Diese soll es ermöglichen, Maschinen in ein sich dezentral optimierendes industrielles Energiesystem einzubinden. Dementsprechend können an dieser Stelle alle zentralen Ansätze der Produktionssteuerung ausgeschlossen werden (vgl. Kapitel 2.3).

Die zweite zentrale Anforderung liegt in einem zunehmenden energiebedingten Störaufkommen des Produktionsflusses durch einen angebotsorientierten Verbrauch. Um dies zu ermöglichen, muss die Steuerung des Materialflusses Bestandteil des Steuerungsansatzes sein. Hierfür kommen Verfahren in Betracht, die auf dem Kanbanprinzip basieren (vgl. Kapitel 2.3).

Die dritte zentrale Anforderung liegt in der Auftragserzeugung und dem damit verbundenen Flexibilitätspotenzial. Dabei beschreibt das Verhältnis von Bearbeitungsdauer und den Planfertigstellungstermin die zeitliche Flexibilität eines Fertigungsauftrags. Dies kann sowohl von der Kanban als auch der Push-Kanban-Steuerung abgedeckt werden (vgl. Kapitel 2.3).

Gegenüber der Kanban Steuerung, die an einen festen Prozessablauf gebunden ist, bietet die Push-Kanban-Steuerung die zusätzliche Möglichkeit der Prozessablaufflexibilität. Aus diesem Grund wird im Folgenden ein Verfahren, aufbauend auf der Push Kanban Steuerung, entwickelt.

5.3.2 *Auftragserzeugung*

Die Auftragserzeugung gleicht die groben Vorgaben der vorangegangenen Planungsphasen mit der aktuell vorliegenden Kapazitätsauslastungssituation ab, um so Planparameter festzulegen. Dies geschieht klassisch in Form von Vorwärts-, Rückwärts- oder Mittelpunktterminierung. Darüber hinaus kann eine Vielzahl von Optimierungsmodellen zum Einsatz kommen. Dabei gilt, dass mit einer zunehmenden Variabilität von Planparametern der Aufwand der Feinterminierung abnehmen sollte. (Haag 2013, S. 82)

Gehen stochastische Größen wie Energieverfügbarkeit und -kosten als Regelgrößen in die Regelung des Produktionsflusses ein, so erhöhen diese gleichzeitig die Variabilität in der Auftragserzeugung.

Aus diesem Grund sollten die Plantermine anstatt einer hohen Genauigkeit eine möglichst hohe Robustheit (Unempfindlichkeit gegenüber ungeplanten Schwankungen) aufweisen. Die Robustheit kann dabei durch Wahrscheinlichkeitsszenarien, Puffer und Sicherheitszuschläge erhöht werden. (Haag 2013, S. 82) Dies beeinflusst die Flexibilität und somit auch das Potential für den angebotsorientierten Verbrauch des Produktionssystems.

5.3.3 *Auftragsfreigabe*

Auf Basis der Auftragserzeugung gibt die Auftragsfreigabe Aufträge zur Fertigung frei und definiert somit den Zeitpunkt, ab dem ein Auftrag der Fertigung zugeführt wird. Dabei kann die Freigabe für die gesamte Fertigung, für Fertigungsbereiche oder für einzelne Arbeitssysteme erfolgen. Die Auftragsfreigabe kann dabei in Abhängigkeit von Bestand, Leistung oder Rückstand erfolgen. (Lödding 2010, S. 297–298) Zusätzlich kann die Energieverfügbarkeit als Freigabekriterium in die Auftragsfreigabe einfließen.

Der im Rahmen des Push-Kanban-Konzepts vorgeschlagene Auftragsfreigabemechanismus entspricht der dezentralen Bestandsregelung. Durch dezentrale Bestandsobergrenzen vor den einzelnen Steuerungsobjekten wird ein einfacher, selbststeuernder Belastungsabgleich zwischen den einzelnen Arbeitssystemen geschaffen.

Zudem erlaubt die Dezentralität des Mechanismus eine zeitnahe Reaktion auf ungeplante Schwankungen in den dezentralen Steuerungsinstanzen und führt gleichzeitig auf Basis der Belastungsnivellierung zu einer positiven Emergenz des Gesamtsystems. (Kienzle 2011, S. 73)

Zur Bestimmung der dezentralen Bestandsgrenzen wird eine einfache Heuristik angewendet, die sich stark an der Auslegungsmethodik der CONWIP-Steuerung orientiert. Dabei werden die dezentralen Bestandsobergrenzen des Push-Kanban-Konzepts mit einem auf Erfahrungswerten basierenden pauschalen Startwert belegt und in einem Quasi-Regelkreis im laufenden Betrieb einheitlich schrittweise so lange reduziert, bis sich die logistische Zielerreichung als Regelgröße verschlechtert. (Kienzle 2011, S. 85)

5.3.4 Auftragsreihenfolge

Die Auftragsreihenfolge bildet in Abhängigkeit der logistischen Zielsetzung die optimale Reihenfolge unterschiedlicher Aufträge zur Bearbeitung. Dies kann, wie in der Auftragsfreigabe, sowohl für Fertigungsbereiche als auch für einzelne Arbeitssysteme erfolgen. Dabei existieren unterschiedliche Ansätze, die den energetischen Verbrauch als Optimierungsziel in die Bildung der Auftragsreihenfolge einbeziehen.

Die Push Kanban Steuerung sieht das Verfahren des „Earliest Operation Due Date“ vor, was Fertigungsaufträge nach den vorliegenden Vorgangzielterminen an einer Arbeitsstation priorisiert.

An dieser Stelle soll jedoch das Verfahren des geringsten Restschlupfes eingesetzt werden. (Lödding 2010, S. 446) Demnach wird dem Auftrag mit dem geringsten Schlupf die höchste Priorität zugewiesen.

Der Schlupf berechnet sich nach Lödding wie folgt (Lödding 2010, S. 452):

$$Schlupf = TAE_{Plan} - TP_0 - \sum_{i=AktAVG}^{AnzAVG} ZDF_i - \sum_{i=AktAVG+1}^{AnzAVG} ZUE_{min,i} \quad (5.1)$$

mit	Schlupf	Schlupfzeit [BKT]
	TAE_{Plan}	Plan-Bearbeitungsende des Auftrags[BKT]
	TP_0	Planungszeitpunkt [BKT]
	ZDF_i	Durchführungszeit des i-ten Arbeitsvorgangs [BKT]
	$ZUE_{min,i}$	Mindestübergangszeit des i-ten Arbeitsvorgangs [BKT]
	$AktAVG$	Index des Aktuellen Arbeitsvorgangs [-]
	$AnzAVG$	Anzahl der Arbeitsvorgänge des Auftrags [-]

Bei negativem Schlupf wird der Auftrag verspätet fertiggestellt. Bei einem Schlupf von Null kann der Auftrag noch pünktlich fertiggestellt werden, wenn er an den folgenden Arbeitssystemen unmittelbar bearbeitet wird. Bei positivem Schlupf kann der Auftrag pünktlich fertiggestellt werden, auch wenn er an den Arbeitssystemen auf die Bearbeitung warten muss. Die Summe dieser Wartezeiten darf den Schlupf jedoch nicht übertreffen. (Lödding 2010, S. 447)

Die Schlupfzeitregel berücksichtigt die Möglichkeit künftiger Verzögerungen oder Störungen bei der Reihenfolgebildung und beschreibt das Potenzial der logistischen Flexibilität. Energiekosten sowie -verfügbarkeit wirken sich dabei als Störgrößen auf die Schlupfzeit aus.

5.3.5 Kapazitätssteuerung

Ziel der Kapazitätssteuerung ist es, die vorhandenen Kapazitäten an die aktuellen Produktionsplanungsparameter anzupassen, um die logistische Zielerreichung einer

Fertigung zu optimieren. Grundlage der Kapazitätssteuerung ist die Kapazitätsflexibilität, die wie folgt mathematisch nach Lödding beschrieben werden kann (Lödding 2010, S. 473):

$$Kap_{rel} = \frac{KAP}{KAPBed_{norm}} * 100 \quad (5.2)$$

mit	KAP_{rel}	Relative Kapazität [%]
	KAP	Kapazität eines Arbeitssystems[Std/BKT]
	$KAPBed_{norm}$	Normale Kapazität eines Arbeitssystems[Std/BKT]

Zum Vergleich der Kapazitätsflexibilität einzelner Arbeitssysteme wird die Kapazität auf den mittleren (normalen) Kapazitätsbedarf eines Arbeitssystems bezogen. Bei einer relativen Kapazität kleiner als 100% kann die Planleistung, auch bei normalem Kapazitätsbedarf, nur durch eine Kapazitätserhöhung erreicht werden. Bei einer relativen Kapazität von über 100% entstehen dagegen Auslastungsverluste am Arbeitssystem, bei normalem Kapazitätsbedarf.

Die Kapazitätsflexibilität eines Arbeitssystems setzt sich aus der Kapazitätsflexibilität der Betriebsmittel und der Kapazitätsflexibilität der Mitarbeiter zusammen. Vor dem Hintergrund des angebotsorientierten Verbrauchs ist insbesondere die Veränderung der Betriebsmittelintensität von Relevanz. Eine hiermit einhergehende Änderung des Betriebszustands wirkt sich auf den Energieverbrauch der Produktion aus. Hinsichtlich der Mitarbeiterflexibilität ist es entscheidend, den Personalnutzungsgrad nicht zu reduzieren. Dies kann durch Mehrfachqualifizierung der Mitarbeiter und einen höheren Automatisierungsgrad erreicht werden.

Um sowohl die terminliche Flexibilität vor dem Hintergrund einer energetischen Störgröße zu nutzen als auch gleichzeitig Bestandsgrenzen in den Lagern zu regeln, wird

eine Kombination aus termin- und bestandsorientierter Kapazitätssteuerung etabliert.

Die terminorientierte Kapazitätssteuerung steuert die Kapazität in Abhängigkeit der Terminabweichung der Aufträge auf Ebene der jeweiligen Arbeitssysteme. Die Kapazität wird dann erhöht, wenn die Verspätung eines Auftrags droht. Die erforderliche Kapazität eines Arbeitssystems kann mathematisch wie folgt nach Lödding beschrieben werden (Lödding 2010, S. 504):

$$KAP_{erf} = \frac{ZAU_{n+1} + \sum_{i=1}^n ZAU_i - ZAU_{ang} - T_R * KAP_{akt}}{TBE_{Plan} - T_0 - T_R} \quad (5.3)$$

mit	KAP_{erf}	Erforderliche Kapazität [Std/BKT]
	ZAU_{n+1}	Auftragszeit des Auftrags n+1 [Std]
	N	Anzahl der Aufträge in der Warteschlange vor dem Auftrag [-]
	ZAU_i	Auftragszeit des i-ten Auftrags [Std]
	ZAU_{ang}	Angearbeitete Auftragszeit von Aufträgen in Bearbeitung [Std]
	T_R	Reaktionszeit der Kapazitätserhöhung [BKT]
	KAP_{akt}	Aktuelle Kapazität vor der Kapazitätserhöhung [Std/BKT]
	TBE_{Plan}	Plantermin Bearbeitungsende des Auftrags [BKT]
	T_0	Aktueller Zeitpunkt [BKT]

Um vor dem Hintergrund einer energetischen Störgröße den Wechsel von Betriebszuständen zu regeln, wird zusätzlich ein Verfahren zur Regelung des Lagerbestands eingeführt. Grundidee der bestandsregelnden Kapazitätssteuerung ist es, die Höhe

des Lagerbestands (und damit mittelbar auch den Servicegrad) über die kurzfristige Kapazitätsflexibilität zu regeln. Dazu werden Bestandsgrenzen definiert, deren Über- bzw. Unterschreitung eine Kapazitätsanpassung auslöst. Ziel ist es, hierdurch den Lagerbestand innerhalb definierter Grenzen zu halten und so sowohl Bestands- als auch Servicegradziele zu erreichen.

$$\Delta KAP * Z_{Einsatz} = \frac{BL_{Plan} - BL_{Ist}}{60 * t_e} \quad (5.4)$$

mit	ΔKAP	Kapazitätsanpassung [Std/BKT]
	$Z_{Einsatz}$	Dauer der Kapazitätsanpassung [BKT]
	BL_{Plan}	Planlagerbestand [ME]
	BL_{Ist}	Istlagerbestand [ME]
	t_e	Einzelzeit [ME/min]

Aus der Differenz des gemessenen Lagerbestands zum geplanten Lagerbestand kann auf die erforderliche Kapazitätsänderung geschlossen werden. Die rechte Seite der Gleichung beschreibt somit den Rückstand der Fertigung gegenüber dem Plan-Zustand. Rüstzeiten können zusätzlich über einen Zuschlag zu den Einzelzeiten berücksichtigt werden.

Die Lagerbestandsgrenzen können in einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess schrittweise bestimmt und optimiert werden (vgl. Kapitel 5.3.3). Dazu wird ein als ausreichend bekannter Startwert festgelegt und anschließend schrittweise optimiert. Dieser beinhaltet Sicherheitsbestände, um die Lieferbereitschaft auch bei einer Maschinenstörung aufrechterhalten zu können.

Dabei ist wichtig, dass sowohl maximale als auch minimale Bestandsgrenzen in Abhängigkeit der Reaktionszeiten der regelnden Maschine definiert werden (vgl. Kapitel 2.4.2). Es muss gewährleistet sein, dass in Abhängigkeit der durchschnittlichen Lagerabgangsrate beim Erreichen des minimalen Lagerbestands die vorgelagerte

Maschine nachregeln und von einem nicht produktiven in einen produktiven Zustand wechseln kann. Dieses gilt auch in Zusammenhang mit dem Maximalbestand und den nachgelagerten regelnden Maschinen.

5.3.6 *Materialflusssteuerung*

Die Idee hinter dem Element „Vorwärtsverknüpfte Kanban-Regelkreise“ im Push-Kanban-Konzept besteht darin, den Informationsträger Kanban auch für diese komplexe und turbulente Fertigungstypologie nutzbar zu machen. Bestandsgrenzen können durch Kanbans abgebildet werden und lassen so ein vorwärtsorientiertes Kanban-Regelkreisnetz entstehen. Dabei werden Auftragsinformationen (Auftragsmerkmale, Prozessinformationen, Termine), Informationen zur Belastungssituation, zu Kapazitätsbedarfen und zu Dringlichkeiten und Prioritäten übertragen. (Kienzle 2011, S. 76)

5.4 Softwareentwurf der dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung

Zur informationstechnischen Umsetzung der dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung wird im ersten Schritt die Regelungsarchitektur beschrieben und in die zwei Komponenten Produktionslogistik und Energie zerlegt. Darauf aufbauend wird im zweiten Schritt der energieflexible Regelalgorithmus definiert.

5.4.1 *Verfahrensbeschreibung und Regelungsarchitektur*

Die Auftragssteuerung beginnt mit einer Verfügbarkeitsprüfung und zentralen Auftragsfreigabe in der hierarchischen Funktion des PPS-Systems. Die freigegebenen Aufträge werden im Anschluss im Rahmen der „robusten Einplanung“ feinterminiert. Für die Durchlaufsteuerung sind auf Basis des Kanban-Regelkreismechanismus folgende Regeln zu beachten:

1. Es ist immer der Auftrag mit dem geringsten Schlupf zu bearbeiten.

2. Bevor ein Auftrag bearbeitet werden darf, ist am Nachfolgeprozess zu prüfen, ob genügend freie Kapazität vorhanden ist. Sofern keine freie Kapazität vorhanden ist, wird der nächstdringliche Auftrag bearbeitet.

Schlupfzeit und Lagerbestand bilden die Eingangsgrößen der energieflexiblen Regelung und sind demnach die Führungsgrößen des Regelkreises (Bild 22). Sie definieren damit das Potenzial der möglichen energetischen Flexibilität. Die logistische Zielgröße Auslastung wird über die dezentrale Auftragsfreigabe gesteuert und vom energieflexiblen Verbraucherregelkreis nicht beeinflusst. Sie kann vielmehr als Störgröße definiert werden. Zusätzlich zur Auslastung wird auch die Energie als Störgröße dem Regelkreis zugeführt. Basierend auf der Abweichung von Ist-Schlupf zu Soll-Schlupf und dem Ist-Lagerbestand zu Soll-Lagerbestand wird durch den Regler die Stellgröße für die Regelstrecke vorgegeben. Die Regelstrecke ist in diesem Fall die Maschine, die ihren Betriebszustand auf Basis der Stellgröße ändert. Betrachtet man die Durchlaufzeit eines Auftrags als die Summe der Arbeitsvorgangsdurchlaufzeiten und Übergangszeit, so wird diese durch den energieflexiblen Verbraucherregelkreis im Rahmen der Energieverbrauchsoptimierung beeinflusst. Die Regelung des Lagerbestandes als Teil des energieflexiblen Verbraucherregelkreises gewährleistet dabei einen kontinuierlichen Materialfluss. Darauf aufbauend muss nun im nächsten Schritt der energieflexible Algorithmus des Reglers entwickelt werden.

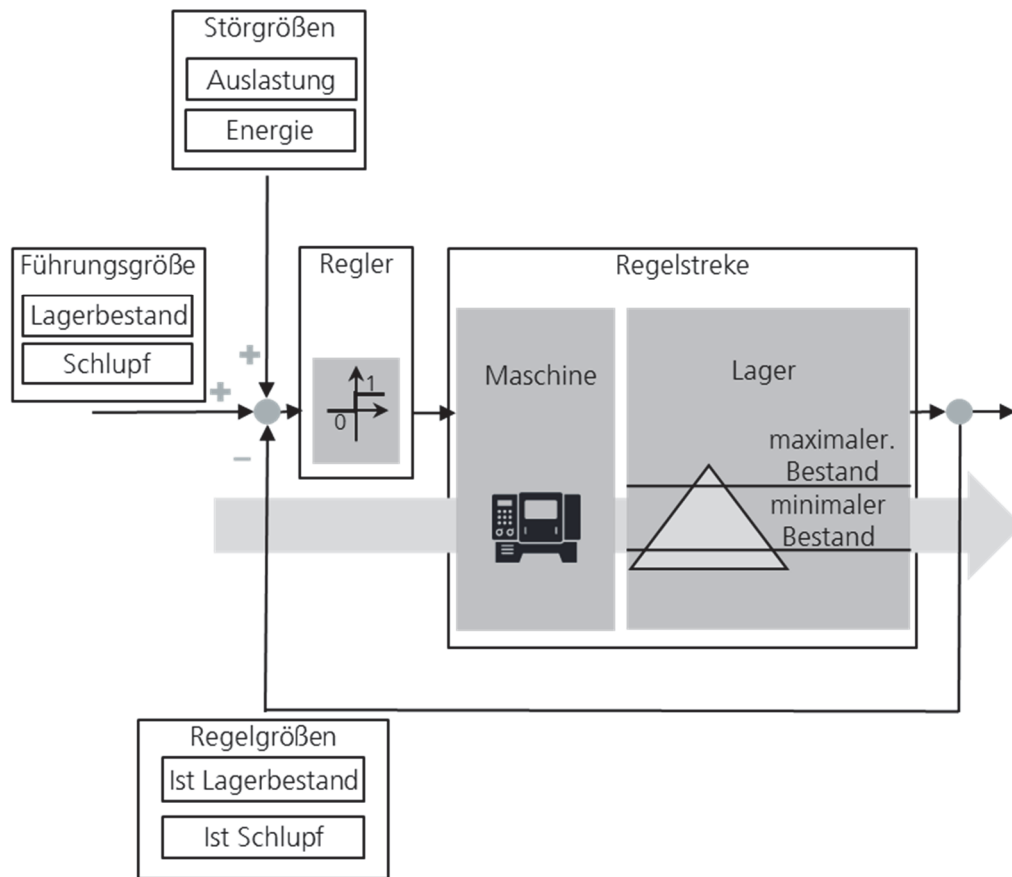


Bild 22: Der energieflexible Verbraucherregelkreis

5.4.2 Produktionsdruck als neue Regelgröße

Grundlage für die Definition eines Regelalgorithmus auf Maschinenebene ist die mathematische Modellierung des Problems. Zu diesem Zweck wird eine Funktion etabliert, die sowohl die Energieversorgungssituation des Produktionssystems als auch die Kapazitätsflexibilität der Maschine und damit verbundene Produktionsprozesse abbildet. Hierfür wird eine neue Größe definiert, der **Produktionsdruck Pd**.

Der Produktionsdruck kann in eine energetische Komponente E und eine logistische Komponente L zerlegt werden. Durch Addition der Logistik- und Energiekomponente kann der Produktionsdruck Pd. mathematisch folgendermaßen formuliert werden:

$$Pd = L + E \tag{5.5}$$

Mit $P_d, L, E \in \mathbb{R}$

P_d Produktionsdruck [-]

L Logistische Komponente [-]

E Energetische Komponente [-]

Es ist dabei zu empfehlen, die Größe P_d auf einen bestimmten Wertebereich zu normieren. Ab einem Grenzwert von Null beginnt die Produktion. Werte kleiner Null bedeuten, dass nicht produziert wird. Im Folgenden wird die Herleitung der beiden Komponenten erläutert.

5.4.2.1 Logistische Komponente L

Für das Flexibilitätsniveau eines Auftrags kann vereinfacht die gesamte verbleibende Zeit bis zum Zieltermin t_{haben} ins Verhältnis zu der Zeit t_{min} gesetzt werden, welche mindestens für die Produktion der Liefermenge benötigt wird. Um eine Logistikgröße zu erhalten, welche mit dem Konzept des Produktionsdrucks vereinbar ist, wurde der Kehrwert des oben definierten Flexibilitätsniveaus gebildet, die Dringlichkeit des aktuellen Fertigungsauftrags. Je größer die Flexibilität, desto geringer die Dringlichkeit und der logistische Produktionsdruck. Die Logistikkomponente kann demnach wie folgt definiert werden:

$$l(t) = \frac{t_{min}}{t_{haben}} \quad (5.6)$$

mit t_{min} Mindestens für die Produktion der Liefermenge benötigt Zeit [BKT]

t_{haben} Verbleibende Zeit bis zum Plan-Bearbeitungs-ende des Auftrags [BKT]

Sie sagt aus, zu welchem Anteil der verbleibenden Zeit produziert werden muss, um die Sollmenge zu erreichen. Die mindestens benötigte Zeit zum Fertigstellen des

Auftrags kann dabei durch die Bearbeitungszeiten und die Übergangszeiten beschrieben werden. Die zur Verfügung stehende Zeit kann zusätzlich in Abhängigkeit des Planbearbeitungsendes des Auftrags beschrieben werden. Somit kann die logistische Dringlichkeit wie folgt formuliert werden:

$$l(t) = \frac{t_{min}}{t_{haben}} = \frac{\sum_{i=AktAVG}^{AnzAVG} ZDF_i + \sum_{i=AktAVG+1}^{AnzAVG} ZUE_{min,i}}{TAE_{Plan} - t} \quad (5.7)$$

für $\mathbb{D} = \{t \in \mathbb{R} | 0 \leq t < TAE_{Plan}\}$

mit TAE_{Plan} Plan-Bearbeitungsende des Auftrags [BKT]

T_{akt} Aktueller Zeitpunkt [BKT]

ZDF_i Durchführungszeit des i-ten Arbeitsvorgangs [BKT]

$ZUE_{min,i}$ Mindestübergangszeit des i-ten Arbeitsvorgangs [BKT]

$AktAVG$ Index des aktuellen Arbeitsvorgangs [-]

$AnzAVG$ Anzahl der Arbeitsvorgänge des Auftrags [-]

t Aktuelle Zeit

Die Durchführungszeit des Auftrags am aktuellen Arbeitsvorgang ergibt sich aus der noch zu fertigenden Menge, d.h. der Liefermenge abzüglich der Bestandsmenge in Abhängigkeit der Stückzeit, der Rüstzeit und der Reaktionszeit.

$$t_{min,AktAVG} = t_R + t_r + (LME - BME) * s_t \quad (5.8)$$

mit	$t_{min,AktAVG}$	Minimale benötigte Zeit für den aktuellen Arbeitsvorgang [BKT]
	t_R	Reaktionszeit [BKT]
	t_r	Rüstzeit [BKT]
	LME	Liefermenge des Auftrags[-]
	BME	Lagerbestandsmenge nach dem aktuellen Arbeitsvorgang des Auftrags [-]
	s_t	Stückzeit [BKT]

Die Bestandskomponente BME fließt mit negativem Vorzeichen ein. Dies bedeutet, dass mit einem zunehmenden abgeschlossenen Anteil des Auftrags die verbleibende Menge, die gefertigt werden muss, geringer wird und der Produktionsdruck abnimmt.

Die Logistikkomponente L beschreibt die vorhandene Flexibilität bzw. ist im Kehrwert ein Ausdruck für die produktionslogistische Dringlichkeit des laufenden Auftrags. Der Wertebereich von L liegt zwischen 0 und 1, womit L wie folgt definiert werden kann:

$$L(t) = \begin{cases} 1, & \text{für } l(t) > 1 \\ l(t), & \text{für } 0 < l(t) \leq 1 \end{cases} \quad (5.9)$$

für $W = \{l \in \mathbb{R} | 0 \leq l \leq 1\}$

mit l Logistische Dringlichkeit [-]

Sobald der Zeitpunkt erreicht ist, ab dem die verbleibende Zeit gerade ausreicht, um die Liefermenge bis zum Lieferzeitpunkt zu produzieren, wird $L = 1$. Durch geeignete

Normierung der Komponente E (siehe unten), wird zu diesem Zeitpunkt P_d in jedem Fall mindestens 0, was den Produktionsstart der Maschine zur Folge hat.

In Bild 23 wird das Konzept des Produktionsdrucks anhand von drei Szenarien veranschaulicht, welche in Tabelle 20 erläutert werden. Die zur Verfügung stehende Lieferzeit t_{haben} beträgt 60, die Produktionszeit der Liefermenge beträgt 20 Zeiteinheiten. Im oberen Teil der Abbildung ist der zeitliche Verlauf der Bestandsmenge abgebildet. Im unteren Teil der Verlauf der Logistikkomponente.

Tabelle 20: Szenarien zur Veranschaulichung der Logistikkomponente

<i>Szenario</i>	<i>Fertigungszeiträume</i>
1	Die Liefermenge wird in den ersten zwei Zeitabschnitten gefertigt
2	Die erste Hälfte der Liefermenge wird im ersten Abschnitt gefertigt, die zweite Hälfte im dritten
3	Die Liefermenge wird in den letzten zwei Zeitschritten gefertigt

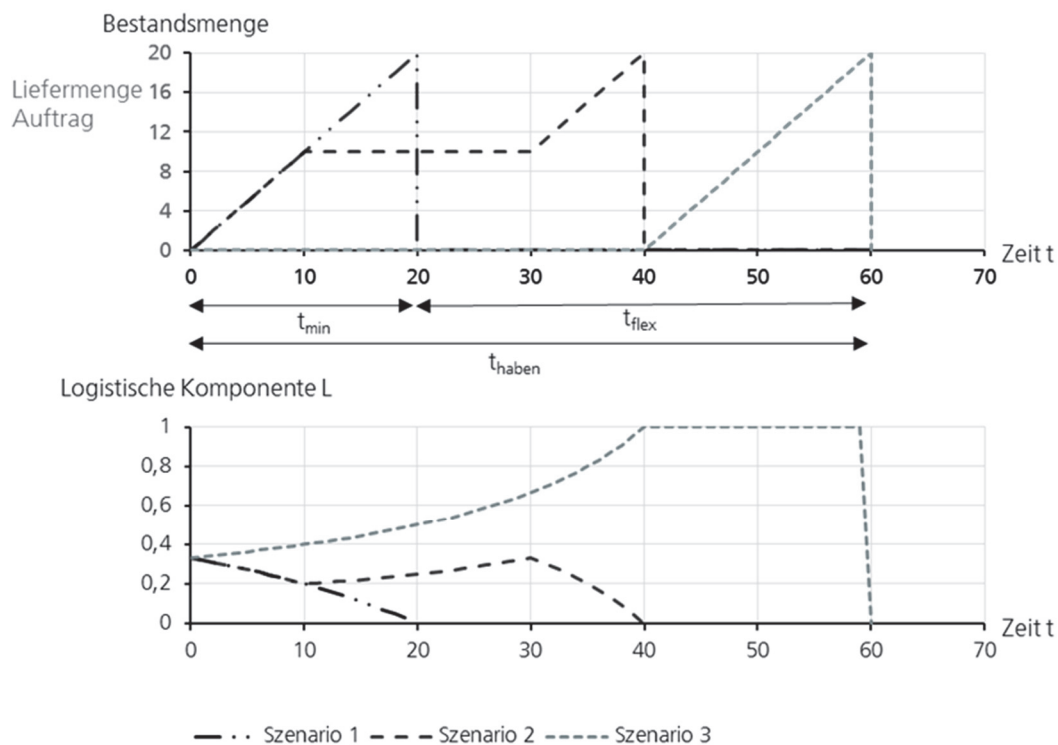


Bild 23: Veranschaulichung des Verhaltens der Logistikkomponente

In Zeiten, in denen die Maschine produziert, steigt der Bestand konstant mit der Steigung $\frac{1}{\text{Stückzeit}}$ an. Die Zeit t_{flex} entspricht der Zeitspanne, während der zu Beginn eine flexible Fahrweise möglich ist. Tabelle 21 beschreibt den zeitlichen Verlauf der Logistikkomponente für jedes der drei Szenarien.

Tabelle 21: Erläuterungen zum Verhalten der Logistikkomponente

Szenario	Erläuterung zum Kurvenverlauf von I
1	<p>L sinkt kontinuierlich, bis sie zu dem Zeitpunkt, an dem die Bestandsmenge die Liefermenge erreicht, den Wert 0 annimmt. Es gilt $-BME(t) > LME(t)$.</p> <p>Die Steigung während der Produktion ist damit negativ.</p>
2	<p>In den ersten zehn Zeiteinheiten sinkt L im gleichen Maß wie im vorigen Szenario, hier gilt gleichermaßen</p> <p>$-BME(t) > LME(t)$.</p> <p>Während des Stillstands der Maschine steigt L wieder an. Es gilt</p> <p>$-BME(t) < LME(t)$.</p> <p>Bei Zeiteinheit 30 startet die Produktion und L sinkt auf null.</p>
3	<p>L steigt bis auf den Wert 1 an, da bis dahin nicht produziert wird. Hier liegt der spätmöglichste Startzeitpunkt. Die Maschine geht in Betrieb. Auch während der Produktion sinkt der Wert nicht mehr unter den Grenzwert. Die Produktion muss weiterhin aufrechterhalten werden, um die geforderte Liefermenge einzuhalten. Ab diesem Zeitpunkt gilt</p> <p>$-BME(t) = LME(t)$.</p> <p>Die Steigung ist Null, L bleibt konstant auf dem Wert 1.</p>

5.4.2.2 Energetische Einflussgröße E

Die energetische Komponente E beschreibt die energetische Dringlichkeit des laufenden Auftrags. Der Wertebereich von E liegt zwischen -1 und 1, womit E wie folgt definiert werden kann:

$$E(t) = \begin{cases} 1, & \text{für } \gamma(t) > 1 \\ \gamma(t), & \text{für } -1 \leq \gamma(t) \leq 1 \\ -1, & \text{für } \gamma(t) < -1 \end{cases} \quad (5.10)$$

für $\mathbb{W} = \{\gamma \in \mathbb{R} \mid 0 \leq l \leq 1\}$

mit γ energetische Dringlichkeit [-]

Die Basis für die energetische Einflussgröße E bildet ein Energieparameter, der den Zustand der Energieversorgung beschreibt. Im Falle einer Gleichstromlösung kann z.B. die Netzspannung gemessen und ausgewertet werden. Im Falle einer Wechselstromlösung wird der Energieparameter über ein Bussystem übertragen (vgl. Kapitel 5.2.4). Die Wertigkeit der energetischen Einflussgröße und damit die energetische Dringlichkeit kann durch den Energiepreis beschrieben werden.

$$\gamma(t) = -\frac{\gamma_E(t) - E_{ref}}{E_{min} - E_{ref}} \quad (5.11)$$

mit γ energetische Dringlichkeit [-]

γ_E Energiezustandsbit [€]

E_{ref} Energiereferenzwert [€]

E_{min} Untere Limit im Energiereferenzintervall [€]

Der Energiereferenzwert kann dabei als Erwartungswert und $|E_{min}|$ als die Standardabweichung einer symmetrischen Binomialverteilung betrachtet werden. E_{ref} ist

derjenige Wert, ab dem die Komponente E mit negativem Vorzeichen in Pd einfließt, d.h. ab dem aus energetischer Sicht nicht produziert werden sollte.

Legt man die Spannung in einer Gleichstromversorgung zugrunde, empfiehlt es sich, den Energiereferenzwert entsprechend der Nennspannung zu wählen. Soll der energetische Verbrauch des Produktionssystems auf Basis von variablen Energiepreisen optimiert werden, kann der Energiereferenzwert auf unterschiedliche Weisen ermittelt werden (Tabelle 22).

Tabelle 22: Ansätze für die Ermittlung des Energiereferenzwertes

<i>Ermittlung E_{ref}</i>	<i>Erläuterung</i>
Historisch	Aus Preisverläufen der Vergangenheit werden Durchschnittswerte gebildet und E_{ref} zugewiesen. Die Zeiträume können unterschiedlich lang sein, z. B. Jahres- oder Monatsdurchschnitt des vergangenen Jahres. Auch eine noch feinere Ermittlung z. B. nach Tageszeiten ist möglich.
Prognose	Mithilfe prognostizierter Strompreise und bekannter Liefermenge lässt sich für einen gewissen Zeitraum ein optimaler Wert für γ_{ref} ermitteln, bei dem die Produktion in Zeiträume mit den relativ geringsten Strompreisen verschoben wird.

Für den Fall, dass sich der Wert $\gamma(t)$ aufgrund von sehr hohen bzw. sehr niedrigen Strompreisen außerhalb des angestrebten Wertebereichs befindet, wird die Obergrenze und Untergrenze auf 1 bzw. -1 festgelegt. Legt man beispielsweise den Mittelwert des Vorjahres für das Jahr 2015 zugrunde, befanden sich die Strompreise am Intradaymarkt während 98,5% der Zeit innerhalb dieses Bereichs. Bild 24 zeigt auf Basis des Szenarios 2 aus Kapitel 5.4.2.1 den beispielhaften Verlauf der Energiekomponente E sowie die sich ergebende Funktion Pd(t). Ihr Wertebereich liegt zwischen -1 und +2 und definiert den Produktionsstart ab einem Grenzwert von $Pd \geq 0$.

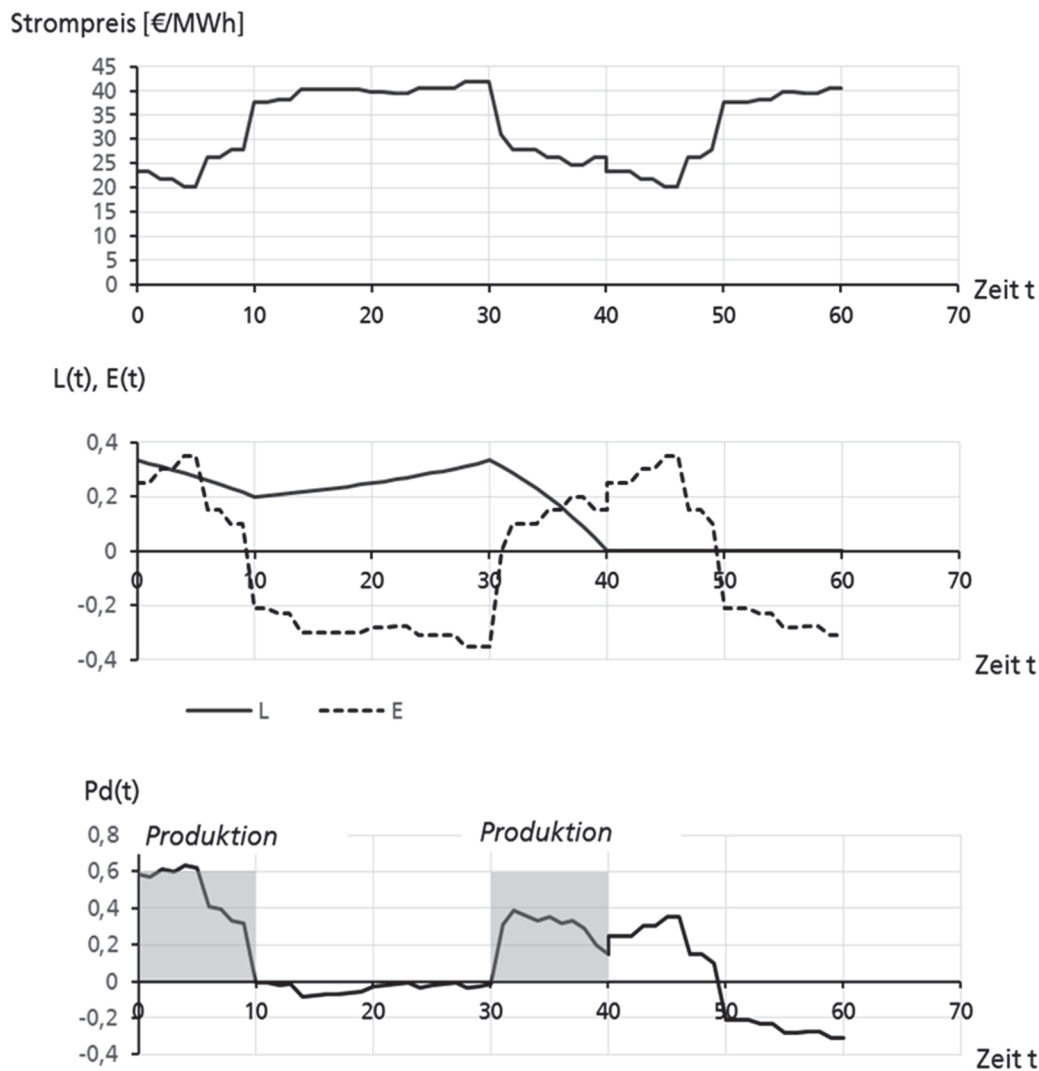


Bild 24: Verlauf des Strompreises und des Produktionsdrucks (auf Basis Szenario 2 vgl. Kapitel 5.4.2.1)

Bei hohem Flexibilitätsniveau (niedrigem Wert der Größe L, ist der Einfluss des Strompreises größer als bei geringer Flexibilität, sodass steigende Energiepreise schneller zu einem Produktionsstopp führen.

5.4.2.3 Komponentengewichtung und funktionale Parametrierung

Der Produktionsdruck stellt einen anpassungsfähigen mathematischen Ausdruck dar. Daher gibt es die Möglichkeit, diesen anwendungsbezogen zu kalibrieren und

im Betrieb zu optimieren. Zu diesem Zweck werden ein energetischer und ein logistischer Gewichtungsfaktor etabliert. Diese können anwendungsbezogen gewählt und weiterentwickelt werden.

Um anwendungsübergreifend eine möglichst hohe Termintreue zu gewährleisten, wird die logistische Komponente gegenüber der energetischen Komponente exponentiell gewichtet. Die logistische Komponente kann somit wie folgt definiert werden:

$$L(t) = \begin{cases} 1, & \text{für } l_g(t) > 1 \\ l_g(t), & \text{für } 0 < l_g(t) \leq 1 \end{cases} \quad (5.12)$$

mit:

$$l_g(t) = k_l * \left[\frac{e^{l(t)*k_{x1}} - k_{x2}}{k_{x3}} \right] \quad (5.13)$$

$$= k_l * \left[\frac{e^{\left(\frac{t_{\min, AktAVG} = t_R + t_r + (LME - BME) * st + \sum_{i=1}^{\text{AnzAVG}} ZDF_i + \sum_{i=AktAVG+1}^{\text{AnzAVG}} ZUE_{\min, i}}{TAE_{\text{Plan}} - t} \right) * k_{x1}}}{e^{1*k_{x1}}} - k_{x2} \right] / k_{x3}$$

mit	k_l	Logistischer Basisgewichtungsfaktor [-]
	k_{x1}	Erster Logistischer Gewichtungsfaktor [-]
	k_{x2}	Zweiter Logistischer Gewichtungsfaktor [-]
	k_{x3}	Dritter Logistischer Gewichtungsfaktor [-]

Damit werden in Abhängigkeit der Auslastung und dem Zieltermin eines Auftrags aus logistischer Sicht der Umlaufbestand sowie die Durchlaufzeit beeinflusst. Dabei wird zur Visualisierung eine Gewichtung der logistischen Komponente mit $k_l = 1$, $K_{x1} = 5$, $K_{x2} = 0,2$ und $K_{x3} = 0,8$ abgebildet (Bild 25).

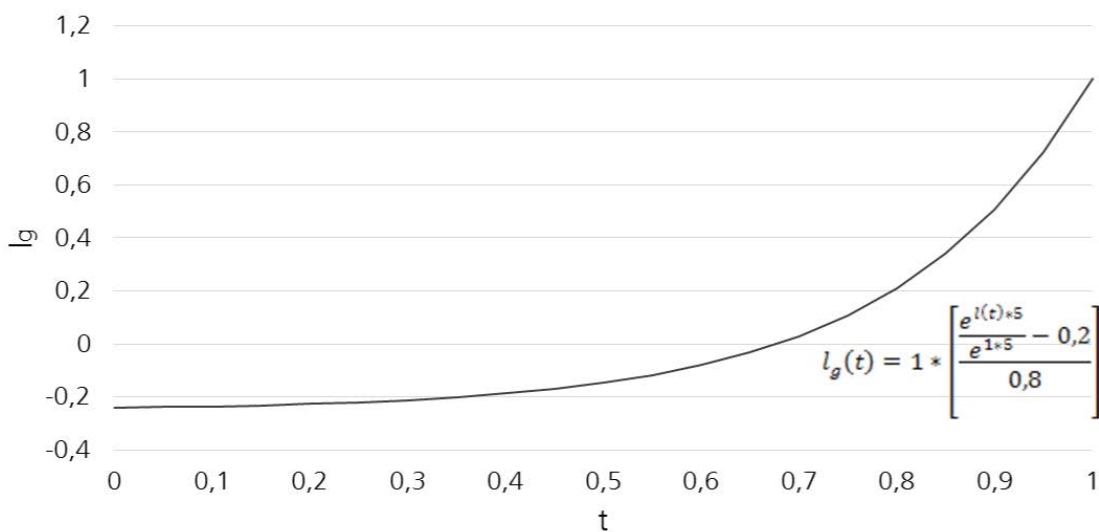


Bild 25: Zeitverlauf der gewichteten logistischen Komponente des Produktionsdrucks

Betrachtet man die definierte Funktion der logistischen Komponente in einem zeitlichen Intervall von null bis eins, so liegt der Startwert bei -0,24. Ab dem Zeitwert von 0,7 nimmt die logistische Komponente einen positiven Wert an und geht damit positiv in den Produktionsdruck ein. Mit dem Erreichen des Zeitwerts von eins wird auch die logistische Komponente eins, was unabhängig des Wertes der energetischen Komponente den Grenzwert des Produktionsdrucks von null zur Folge hat und damit die Produktion startet.

Die energetische Komponente wird in der Regel weniger stark gewichtet als die logistische Komponente. Dies kann in Abhängigkeit des Gewichtungsfaktors k_e wie folgt definiert werden:

$$E(t) = \begin{cases} 1, & \text{für } \gamma_g(t) > 1 \\ \gamma_g(t), & \text{für } -1 \leq \gamma_g(t) \leq 1 \\ -1, & \text{für } \gamma_g(t) < -1 \end{cases} \quad (5.14)$$

mit:

$$\gamma_g(t) = k_E * -\frac{\gamma_E(t) - E_{ref}}{E_{min} - E_{ref}} \quad (5.15)$$

mit k_E Energetischer Gewichtungsfaktor [-]

Das energetische Verhalten eines Verbrauchers wird dabei maßgeblich über γ_{ref} und das Verhältnis von E_{ref} zu E_{min} bestimmt. Dabei gilt, dass je kleiner der Nenner der gewichteten Funktion der energetischen Dringlichkeit wird, die Reaktivität des Verbrauchers steigt. Zusätzlich kann dieser Effekt durch einen energetischen Gewichtungsfaktor verstärkt werden. Die Einstellung dieser Faktoren wird auf Basis der durch die Flexibilitätsmaßnahme entstehenden Kosten vorgenommen (vgl. Kapitel 2.4.2). Dabei gilt, dass mit zunehmenden Kosten für eine Flexibilitätsmaßnahme die Reaktivität abnehmen sollte. Die Parametrierung des Produktionsdrucks kann dabei auch im laufenden Betrieb erfolgen, was zu einem geänderten Systemverhalten bei z.B. energetischen Extremsituationen (wie dem Wegfall des Versorgungsnetzes) führt.

Die Regelung des Lagerbestands als Teil des energieflexiblen Verbraucherregelkreises gewährleistet dabei einen kontinuierlichen Materialfluss. Dabei definieren das Verhältnis von Zugangs- zu Abgangsgeschwindigkeit sowie die Lagergröße die logistische Entkopplung und damit auch das Flexibilitätspotenzial.

5.5 Zwischenfazit

In dem zurückliegenden Kapitel wurde das Konzept für eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung der Produktion entwickelt. Dabei wurden, auf Basis der Struktur eines Industrienetzes und seiner Komponenten, Teilnehmerklassen entwickelt. Für die Teilnehmerklasse Verbraucher wurde entlang der Planung

und Steuerung der Produktion ein energieflexibles, automatisiertes und dezentrales Steuerungssystem entwickelt.

Der entwickelte Ansatz schließt das Produktionssystem ein und umfasst dabei die Fabrik, bestehend aus Produktions-, Steuerungs- und Energiesystem. Die dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung ist strukturell so angelegt, dass diese maschinenübergreifend die Energiekosten in Abhängigkeit von Termintreue und Auslastung optimiert. Zusätzlich werden, innerhalb vorgegebener Grenzen (Schlupfzeit, Lagerober- und Lageruntergrenze), die Durchlaufzeit und die Bestände beeinflusst und geregelt. Das logistische Zielsystem wird daher in seiner Gänze mit einbezogen.

Die Struktur des entwickelten dezentralen Ansatzes ist so gestaltet, dass einzelne Teilnehmer des Regelungssystems energetische Informationen selbstständig verarbeiten können und Entscheidungen in Echtzeit zu treffen können. Dabei kann jeder aktive Teilnehmer seine eigenen Entscheidungen auf Basis der aktuell verfügbaren Energie und der logistischen Vorgaben treffen. Somit können umfangreiche und zeitaufwändige zentrale Berechnungen vermieden und schnell sowie effizient auf plötzliche Veränderungen reagiert werden. Dabei passen zudem alle aktiven Systemteilnehmer, auf Basis der zur Verfügung gestellten Energiepreise, ihr Energieverbrauchsmuster effizient und schnellstmöglich an. Somit sind keine extern gesteuerten Eingriffe notwendig. Der Maschinenzustand wird, in Abhängigkeit des Zieltermins des Auftrags, dem Auftragsabarbeitungsstatus, der Schlupfzeit und der Energiepreise geregelt. Dabei wird ein Echtzeit-Soll-Ist-Vergleich der Zielkriterien auf der Maschinenebene vorgenommen. Damit kann zu jedem Zeitpunkt ein geschlossener Regelkreis für das gesamte System sichergestellt werden.

Somit kann die Forschungsfrage vier beantwortet werden: *Wie kann der Systementwurf einer dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Produktionssteuerung aufgebaut werden?*

Dies ist die Grundlage für die Implementierung und simulativen Tests der Steuerung.

6 Implementierung und Validierung

Die Anwendbarkeit und der Nutzen der entwickelten energieflexiblen Steuerung sollen anhand zwei aus der Realität abgeleiteten Praxisbeispielen aufgezeigt und damit empirisch validiert werden.

Zu diesem Zweck wird im ersten Schritt der systematische Aufbau der Verfahrensimplementierung beschrieben. Im zweiten Schritt werden die Praxisbeispiele dargelegt, analysiert und bewertet.

6.1 Systematischer Aufbau der Verfahrensimplementierung

Um die entwickelte energieflexible Steuerung zu testen, wird zunächst eine passende Modellierungssoftware ausgewählt und die Modellbildung in eben dieser Software beschrieben. Darüber hinaus werden Annahmen und Randbedingungen definiert, die in die Modellbildung einfließen. Darauf aufbauend werden, in Abhängigkeit der Fallbeispiele, die Betriebszustände der zu flexibilisierenden Prozesse definiert und unterschiedliche Szenarien betrachtet. Abschließend werden die Modellparameter variiert und mittels Regressions- und Sensitivitätsanalyse untersucht sowie optimiert. (Bild 26)

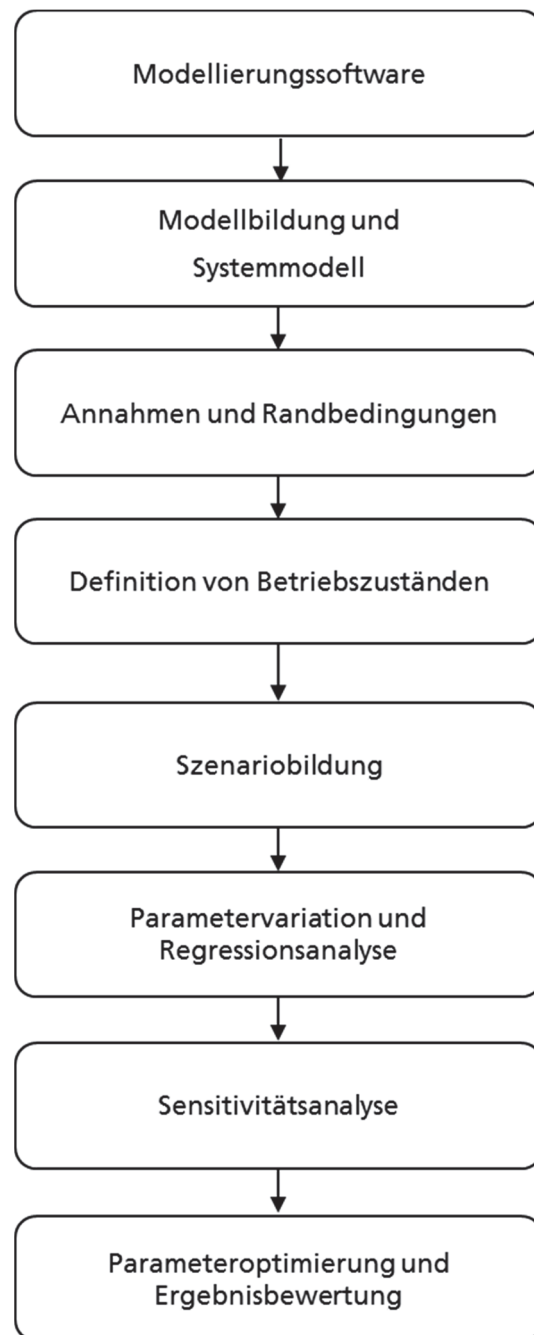


Bild 26: Modellierungs- und Implementierungsstrategie der energieflexiblen Steuerung

6.1.1 *Modellierungssoftware*

Die Modelle werden mit der Simulationssoftware AnyLogic aufgebaut. AnyLogic unterstützt die prozesszentrierte (ereignisdiskrete), die dynamische (kontinuierliche)

und die agentenbasierte Modellierung, welche sich auch als hybride Systeme kombinieren lassen. Bei Produktionsprozessen, wie z.B. im Bereich des Druckgusses, handelt es sich bei energierelevanten Prozessen häufig um thermische Prozesse, welche sich am besten als dynamische Systeme abbilden lassen. Sie hängen von Systemzuständen ab, die sich über die Zeit ändern oder in kausalem Zusammenhang mit dem ereignisdiskreten System stehen. Eine agentenbasierte Modellierung ermöglicht es, die angestrebten dezentralen Strukturen darzustellen, indem den einzelnen Agenten individuelle Funktionsbausteine zugewiesen werden können. In AnyLogic lässt sich die Prozesslogik durch die eingefügten Objektbibliotheken, welche eine schnelle Eingliederung von vorgefertigten Simulationselementen ermöglichen, sehr anschaulich abbilden. Außerdem unterstützt die betriebssystemunabhängige Java-Umgebung die Möglichkeit, die Modelle unbegrenzt zu erweitern sowie als eigenständige Java-Applikationen zu exportieren und damit auch ohne installierte AnyLogic-Software auszuführen.

6.1.2 *Modellbildung und Systemmodell*

Auf Basis des Systemmodells, welches die Vorgänge und Funktionen der untersuchten Fallbeispiele abbildet, wird die Prozesslogik mit entsprechenden AnyLogic Prozessbausteinen abgebildet. Der jeweilige Gesamtprozess wird auf oberster Modellebene implementiert (Agent *main*) und mithilfe der agentenbasierten Modellierung als eigener Agent (*maschine_1*, *maschine_2* etc.) definiert. Innerhalb dieses Agenten könnte neben dem Fertigungsprozess auch die im SPS-Controller enthaltene energieflexible Regelung simuliert werden. Das PPS-System wird wie der Gesamtprozess auf oberster Modellebene abgebildet.

Bild 27 zeigt beispielhaft eine der simulierten Fertigungslinien. Neben drei Lagern und zwei Prozessen findet sich weiterhin eine „Source“ am Anfang der Prozesskette (hier unbeschriftet), welche Agenten erzeugt, die die Prozessbausteine durchlaufen.

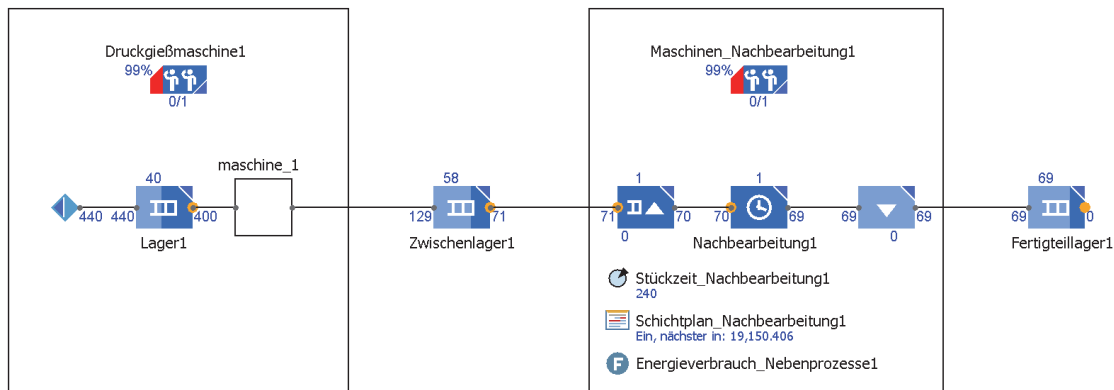


Bild 27: Fertigungsmodellierung in AnyLogic

Wie viele dieser Agenten in einen Block ein- und ausgetreten sind und wie viele Agenten ein Block aktuell enthält, ist am Ein- und Ausgang sowie oberhalb des Bausteins gekennzeichnet. Für das Beispiel Druckgussmaschine (*maschine_1*) entspricht ein solcher Agent einer Metallmasse, nach dem Gießprozess dem Gussteil.¹ Zwischenlager und Fertigteillager werden durch Queue-Blöcke abgebildet, welche Agenten, d.h. Produkte, bis zu einer definierten Maximalkapazität beinhalten können. Über den Parameter *Stückzeit* wird die Verweildauer eines Agenten im Block festgelegt. Über den *Schichtplan* werden die Schichtzeiten definiert, die den Zeitraum beschreiben, innerhalb dem Teile vom Block aufgenommen, d.h. bearbeitet werden können. Der Resource-Pool-Block unterhalb der Prozessbezeichnung ist mit den Schichtplänen verknüpft und wird blockiert, wenn der zugehörige Prozess aktiv ist.

Prozesse, die flexibilisiert werden, werden als eigener Agent implementiert. Dieser enthält die Prozesslogik sowie die relevanten fertigungslogistischen, energetischen und regelungsbezogenen Informationen und Funktionen zur energieflexiblen Regelung der Maschine. Die ersten beiden Punkte entsprechen den aus dem PPS- und

¹ Im Modell wird jeder Agent „Masse“ in einen Agent „Gussteil“ gewandelt, tatsächlich reicht eine aufgeschmolzene Masse jedoch für mehr als ein Produkt (Köse et al. 2019, S. 562). Eine Abbildung dieser Tatsache schien für die Zielsetzung des Modells nicht notwendig.

Energiemanagement-System bezogenen Daten. Regelungsbezogene Funktionen entsprechen der auf dem SPS-Controller hinterlegten Logik. Unterhalb der Main-Ebene können wiederum einzelne Prozesskomponenten modelliert werden.

In dieser Form können beliebig viele Prozesse implementiert werden, um die vollständige Fertigung zu modellieren. Die Fertigungsaufträge werden mithilfe einer Excel-Datei eingelesen und in der AnyLogic-Datenbank gespeichert. Bei Eintreten des hinterlegten Liefertermins wird die hinterlegte Liefermenge des entsprechenden Auftrags aus dem *Fertigteillager* entfernt, was der physischen Entnahme aus dem Lager entspricht.

Um den Leistungsbezug der gesamten Fabrik abzubilden, wurden die Verbraucher in Gruppen klassifiziert: produktionsabhängige und -unabhängige Verbraucher (Bild 28). Erstere umfasst den Energiebedarf der Kern- und der Nebenprozesse, Letztere die sonstigen Verbraucher des Betriebs, z.B. Beleuchtungs- und Belüftungsanlagen. Beide Werte werden in Form einer dynamischen Variablen abgebildet, welcher im Betrieb über eine Funktion ein Leistungsbezug zugewiesen wird. Dieser ist im Fall des Kernprozesses produkt- und maschinenabhängig, für die Nebenprozesse wird zur Reduktion des Rechenaufwands ein konstanter Wert hinterlegt. Für produktionsunabhängige Energieverbraucher wurde eine Standardlastkurve in Abhängigkeit des Untersuchungsintervalls für einen Tag hinterlegt, deren Wert basierend auf der aktuellen Modellzeit eingelesen wird. Somit wird auch der Faktor Saisonalität berücksichtigt.

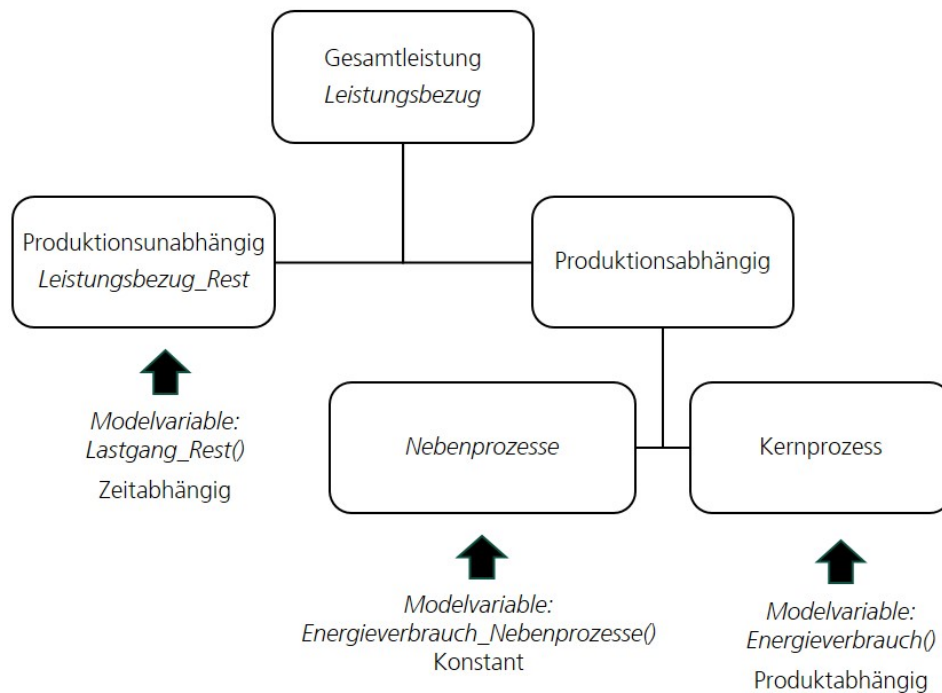


Bild 28: Aufteilung des Energieverbrauchs des Druckgussproduktionssystems

6.1.3 Annahmen und Randbedingungen

Schlupfzeit und Lagerbestand bilden die Eingangsgrößen der energieflexiblen Regelung. Sie definieren damit das Potenzial und setzen zeitgleich die Randbedingungen hinsichtlich der Systemoptimierung. In Abhängigkeit der flexibilisierenden Prozesskette müssen darüber hinaus spezifische technische und organisatorische Randbedingungen sowie Betriebsbedingungen betrachtet werden.

Die Mindestbetriebsdauer eines Prozesses beschreibt die Dauer, für die dieser mindestens in Betrieb sein muss, um wirtschaftlich produzieren zu können (Gudehus 2011, S. 256). Diese muss für jeden Prozess individuell definiert werden und nimmt Einfluss auf das energetische Flexibilitätspotenzial des Prozesses. Dabei gilt, dass mit zunehmender Mindestbetriebsdauer die energetische Flexibilität abnimmt, da der Prozess zunehmend nicht mehr in der Lage ist, auf energetische Schwankungen zu reagieren.

Die maximale Schalthäufigkeit beschreibt, wie oft ein System in einem definierten Zeitraum Schaltvorgänge vornehmen kann, um seinen Zustand zu verändern (Weidling 1935, S. 29). Die Schaltfrequenz eines Prozesses kann dabei durch technische und prozessbezogene Reglementierungen oder auch produktbedingte Reglementierungen beeinflusst werden. Technische und prozessbezogene Reglementierungen können auf unterschiedlichen Faktoren beruhen, wie z.B. der maximalen Schaltfrequenz des Reglers oder einem zunehmenden Komponentenverschleiß. Produktbedingte Reglementierungen stehen mit dem Produkt, das durch den Prozess produziert wird, in direktem Zusammenhang. Dabei ist insbesondere die Produktqualität im Fokus, die durch zunehmende Schaltfrequenzen nicht gefährdet werden darf. Wie auch die Mindestbetriebsdauer muss die maximale Schalthäufigkeit individuell für die definierten Prozesse betrachtet werden. Dabei gilt, dass mit zunehmender Schalthäufigkeit die energetische Flexibilität des Prozesses zunimmt, da dieser zunehmend auf energetische Schwankungen reagieren kann.

Die logistische Abhängigkeit beschreibt die Stückzeitdifferenz zweier aufeinanderfolgender Prozesse. Mit abnehmender Stückzeit des Vorgängerprozesses gegenüber der Stückzeit des Nachfolgeprozesses nimmt die logistische Abhängigkeit ab und das Potenzial zur energetischen Flexibilisierung nimmt zu.

Das nutzbare Lagervolumen entspricht dem logistischen Speichervolumen, welches genutzt werden kann, um Produkte zwischenspeichern. Dieses wird in Anhängigkeit des absoluten Speichervolumens definiert und durch Ober- und Untergrenzen eingeschränkt. Sie leiten sich aus der Prozessträgheit der definierten Zustandswechsel ab. Die Untergrenze des nutzbaren Lagervolumens wird benötigt, um ein Sicherheitsbestand zu definieren, der verhindert, dass der nachfolgende Prozess „verhungert“, wenn der vorangegangene Prozess in einem nicht produktiven Zustand ist (Schneeweiß 1989, S. 179). Umgekehrtes gilt für die Obergrenze des Lagerbestands.

Die definierten Rand- und Betriebsbedingungen sind dabei nicht unabhängig voneinander zu betrachten, sondern beeinflussen sich gegenseitig und beeinflussen damit

in ihrer Gesamtheit die spezifische Energieflexibilität eines Prozesses. Weitere Eingriffe in die Prozesslogistik, wie z.B. das Lossplitting, werden an dieser Stelle nicht vorgenommen.

Die getroffenen modellübergreifenden Annahmen und Randbedingungen des Modells werden in Tabelle 23 zusammengefasst. In der rechten Spalte ist, falls zutreffend, einer der in Kapitel 3.2 vorgestellten „Ansätze zur energieflexiblen Regelung“ vermerkt, in dem die Annahme oder Randbedingung ebenfalls zugrunde gelegt wird.

Tabelle 23: Annahmen und Randbedingungen der Modellbildung

<i>Annahme bzw. Randbedingung</i>	<i>Quelle</i>
Strompreis ist mindestens auf Stundenbasis vorhanden	(Sumit Mitra et al. 2012)
Der Stromverbrauch im Zustand „Aus“ ist auf jeder Maschine Null	(Moon et al. 2014)
Die Gesamtleistung sämtlicher Maschinen kann begrenzt werden	(Fang et al. 2011)
Es wird eine Produktionsmenge vorgegeben, die eingehalten werden muss	(Ashok et al. 2001)
Wenn ein Zwischenlager voll ist, kann die Maschine davor nicht weiter produzieren	(Li et al. 2017)
Wenn der Zwischenspeicher leer ist, kann die darauffolgende Maschine im nächsten Zeitraum nicht produzieren	(Li et al. 2017)
Alle Maschinen sind zu einem bestimmten Startzeitpunkt betriebsbereit	(Moon et al. 2014)
Alle Aufträge werden zu einem bestimmten Startzeitpunkt freigegeben	(Moon et al. 2014)
Die Leistungsreduktion soll mindestens so groß sein wie die angefragte Regelleistung	(Fernandez et al. 2013)
Die Leistungsbezüge sind produkt- und maschinenspezifisch hinterlegt	
Festgelegte Schichtzeiten gelten für alle Maschinen gleichermaßen	

Aktuell liegen für den Großteil der Verbraucher noch keine variablen Stromtarife vor. Der tatsächliche Preis, welchen der Endkunde zahlen muss, umfasst neben dem Börsenpreis weitere Abgaben, wie Netzentgelte, Steuern und die EEG-Umlage. Aus diesem Grund wird der Preisverlauf an der Börse auf ein höheres Preisniveau angehoben, welches für einen zukünftigen Strommarkt mit variablen Tarifen realistischer

erscheint. Der neue Preis wird durch Addition der durchschnittlichen Mehrkosten für oben genannte, zusätzliche Abgaben des Jahres j berechnet. Die Mehrkosten ergeben sich aus dem deutschen Tarif für Industrieverbraucher mit einem Jahresenergiebedarf von 0,5 bis 2 Mio. kWh und dem Jahresdurchschnitt des Börsenpreises beispielsweise wie folgt: (BDEW 2019a, S. 23)

$$\text{Mehrkosten}_j = \text{Industrietarif}_j - \text{Börsendurchschnittspreis}_j \quad (6.1)$$

$$\text{Mehrkosten}_{2014} = (153 - 32,25) \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right] = 120,65 \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$$

$$\text{Mehrkosten}_{2015} = (152 - 31,71) \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right] = 120,29 \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$$

Der sich ergebende stündliche Energiepreis für das Jahr j beträgt

$$E(t)_{\text{Endkunde}, j} = E(t)_{\text{Börse}, j} + \text{Mehrkosten}_j \quad (6.2)$$

6.1.4 Systemzustände

Zur Verknüpfung von Energiedaten mit einzelnen Maschinen werden diesen unterschiedliche Systemzustände der Maschine zugeordnet. Die Voraussetzung hierfür ist, dass jedes Maschinenmodell über eindeutig definierte Zustände verfügt. In diesem Zusammenhang können mehrere verschiedene Standardzustände unterschieden werden (vgl. Kapitel 2.4.2). Der Vorteil liegt darin, dass den betrachteten Maschinen zu jedem beliebigen Zeitpunkt ein eindeutiger Zustand zugewiesen werden kann. Die Anzahl der vorhandenen Zustände ist von der betrachteten Maschine abhängig. Zusätzlich werden die Übergänge zwischen den spezifischen Maschinenzuständen definiert.

6.1.5 Szenariobildung und Parametervariation

Während Prognosen einen definierten Informationsstand fortschreiben, berücksichtigen Szenarien unterschiedliche Entwicklungen der Umwelt. Dabei werden in der Regel drei grundlegende Szenarien unterschieden: das positive Extrem-Szenario

(best-case), das negative Extrem-Szenario (worst-case) und das Trend-Szenario. Somit wird ein mehrdimensionaler Lösungsraum aufgespannt. Entscheidend ist dabei, dass die Entwicklungen der einzelnen Faktoren innerhalb des Szenarios widerspruchsfrei sind und eine hohe Stabilität gegeben ist. (Reibnitz 1991, S. 13–29)

Deskriptoren, die Schlüsselfaktoren des Szenarios, definieren auf Basis ihres Zeitverhaltens den Szenarioverlauf. Dabei sind die Wirkbeziehungen untereinander zu berücksichtigen. Zur Bestimmung der Schlüsselfaktoren können empirische oder theoretische Vorarbeiten herangezogen werden. (Mietzner 2009, S. 117–124) Vor dem Hintergrund der mathematischen Definition des Produktionsdrucks können die Schlüsselfaktoren Mindestbetriebsdauer (Stunden), Stückzeit Nachbearbeitung (Sekunden), Lagervolumen (Stück), Mindestlagerbestand (Stück), E_{Ref} (€/MWh), E_{min} (€/MWh) und Gewichtung k_E (-) definiert werden. Auf Basis realer Messdaten kann so ein Basisszenario erstellt werden. Die Ergebnisse werden dabei an den Energiekosten und den Auswirkungen auf Termintreue, Durchlaufzeit, Auslastung und Bestände gemessen.

Zur Beschreibung der Entwicklung der Schlüsselfaktoren werden diese in einem definierten Intervall variiert. Um das Verhalten der energieflexiblen Regelung allgemeingültig bewerten zu können, wird zusätzlich, mittels multipler linearer Regression, ein geschlossener funktionaler Term für die Bestimmung der Wechselwirkungen zwischen der Variable Energiekosten und den Szenarioeingangsvariablen definiert. Die Zielgröße lässt sich dabei als die Summe der gewichteten Eingangsvariablen und einem Standardfehler wie folgt beschreiben:

$$y = \alpha + \beta * x_i + \varepsilon \tag{6.3}$$

mit	ε	Standardfehler
	α	y-Achsenabschnitt
	β	Regressionskoeffizient

Der Parameter β wird im Folgenden auf Basis der kleinsten Fehlerquadrate (KQ) berechnet.

6.1.6 Sensitivitätsanalyse und Parameteroptimierung

Die Sensitivitätsanalyse beschreibt die Auswirkungen von Schwankungen der Parameter eines mathematischen Modells oder Systems auf die Ergebnisse oder die Leistung des Systems. Zu diesem Zweck wird einer der Systemparameter um einen bestimmten Prozentsatz geändert und die Auswirkungen auf das Modell oder System untersucht, wobei angenommen wird, dass alle anderen Parameter konstant bleiben. (Saltelli et al. 2002, S. 32–43)

Die Sensitivitätsanalyse wird somit angewandt, um die Robustheit und Genauigkeit der Modellergebnisse zu untersuchen und die Beziehungen zwischen den Eingabeparametern und den Leistungsindikator Energiekosten sowie den Auswirkungen auf Termintreue, Durchlaufzeit, Auslastung und Bestände zu messen. Es erfolgt dabei eine Fokussierung auf die statistisch signifikanten Parameter. Auf Basis der Sensitivitätsanalyse können abschließend die Eingabeparameter des Modells oder des Systems hinsichtlich deren Effekte auf die Leistungsgrößen optimiert werden.

6.2 Automobilzulieferer Magnesiumdruckguss

Für das erste Beispiel wurde auf den Druckgießprozess eines Unternehmens der Magnesiumdruckgussindustrie zurückgegriffen. Aus dem Energiemonitoring-System konnten Leistungsdaten bezogen werden. Das PPS-System stellte logistische Daten zur Verfügung. Aus beiden Systemen lagen die Daten für zwei Produkte vor, welche in ihrem Schussgewicht und ihrer Komplexität ähnlich sind. Der Energiebedarf für ihre Produktion ist daher vergleichbar. Dies kann jedoch nicht auf weitere Produkte mit anderer Beschaffenheit (z.B. geringerem Schussgewicht) übertragen werden. Datengrundlagen zu Prozessabläufen (z.B. Anfahren der thermischen Verbraucher vor Produktionsbeginn) konnten durch Messungen erhoben werden. Die Schichtpläne unterscheiden einen Zwei- und einen Dreischichtbetrieb von Schichten zu je acht Stunden. Der Betrieb beschränkt sich auf Werktage, am Wochenende steht die Produktion grundsätzlich.

Für die Stückzeit der Nachbearbeitungsprozesse wurden nicht die Stückzeiten der tatsächlichen Prozesse herangezogen, da deren Aggregation aufgrund sequentiell sowie parallel laufender Prozesse, wie z.B. dem Handentgraten an mehreren Arbeitsplätzen, schwierig ist. Vielmehr wurde für diese Zeit ein gemittelter Richtwert, basierend auf Erfahrungswerten des Personals, hinterlegt, der für die Untersuchung seines Einflusses auf die Zielgröße „Energiekosten“ variiert werden kann.

Der Jahresenergiebedarf des Unternehmens liegt zwischen 0,5 bis 2 Mio. kWh. Der Stromtarif für Industrieunternehmen dieser Größe lag in Deutschland in den letzten fünf Jahren zwischen 15,1 und 17,2 Cent pro kWh. Bei Industrieunternehmen mit einem jährlichen Verbrauch von über 100 Megawattstunden (MWh) wird vom Netzbetreiber außerdem eine Messung der viertelstündig gemittelten Leistungswerte durchgeführt, deren Jahreshöchstwert zur Berechnung der zu zahlenden Netzentgelte herangezogen wird.

6.2.1 *Der Druckgießprozess*

Das Druckgießen ist ein Gießverfahren, bei dem das Metall in flüssigem oder teigigem Zustand unter hohem Druck in eine Stahlform gebracht wird. Im Vergleich zu anderen Gießverfahren ist mit dem Druckguss eine hohe Taktfrequenz und damit eine größere Mengenleistung möglich. Die wirtschaftliche Stückzahl hängt von der Art des zu fertigenden Teils ab. Wenige hundert Teile können die Anwendung des Druckgusses bereits wirtschaftlich gestalten, wohingegen andere Teile in Stückzahlen von mehreren tausend gegossen werden müssen, um die Kosten der Formherstellung zu rechtfertigen. (Reimer et al. 1968, S. 11–12)

Druckgussteile zeichnen sich im Übrigen durch besonders hohe Maßgenauigkeit und gute Oberflächenbeschaffenheit aus, was einen geringen Nachbearbeitungsaufwand zur Folge hat. Der Druckguss gilt als wirtschaftlichstes gießtechnisches Verfahren für Großserien mit Stückmassen von unter 50 kg und als wichtigste Gießtechnik für Nichteisenmetalle. Die größte Bedeutung kommt hierbei Aluminium, Zink und Magnesium zu. (Spur et al. 2013, S. 297)

Obwohl der Nachbearbeitungsaufwand beim Druckguss gering ist, müssen gefertigte Teile in meist mehreren Schritten nachbearbeitet werden. Der Gießprozess selbst kann in folgende Haupt- und Nebenschritte unterteilt werden: (Spur et al. 2013, S. 299)

- 1) Schließen der Druckgießform und Dosieren des flüssigen Gießwerkstoffs
- 2) Einpressen des flüssigen Metalls mit Kolben in die geschlossene Form
- 3) Zuhalten der Form und Nachverdichten unter hohem Druck bis zur vollständigen Erstarrung
- 4) Öffnen der Druckgießform und Auswerfen bzw. Entnahme des Druckgusstückes

Für die Durchführung des Druckgießverfahrens werden neben der Druckgießmaschine (DGM) verschiedene Peripheriegeräte benötigt: (Nogowizin 2011, S. 456–459)

- **Ofen:** Schmelz- und Dosieröfen dienen zum Schmelzen und Warmhalten, sie können über automatische Beschickungseinrichtungen verfügen und eine sichere und präzise Metallbeschickung in die Gießkammer ermöglichen.
- **Temperiergeräte** für die Gießform: Die Temperier- oder Heiz-/ Kühlgeräte (HKG) besitzen unabhängige Kreisläufe, einen integrierten Schaltschrank sowie Heiz- und Kühlsysteme. Die Wärmeträgerflüssigkeit kann durch einen Wasser-Wärmetauscher gekühlt werden. Als Wärmeträger wird Wasser oder ein Thermoöl verwendet, das bei Hochtemperaturgeräten die Gießform bis zu einer Temperatur von 350°C temperiert. Wassertemperiergeräte erzielen Temperaturen von bis zu 160°C. Das Gerät muss die Gießform vor Produktionsbeginn schnell auf Solltemperatur bringen und in der Lage sein, die Formtemperatur auf konstantem Niveau zu halten.
- **Formsprühgerät:** Das Formsprühgerät dient zur Säuberung und Schmierung der Druckgießform mit Hilfe von Druckluft.
- **Industrieroboter:** Sie können zu der Entnahme des Gussteils aus dem Formhohlraum, der Abkühlung des Gusstückes im Wasserbecken, dem Entgraten des Gusstückes in der Entgratpresse und zur Schmierung des Formhohlraums eingesetzt werden.
- **Entgratpresse:** Die hydraulischen Entgratpressen trennen das Gießlaufsystem vom Gusstück. Außerdem dienen sie dem Schnittentgraten der Teilungsgrate und Überläufe. Es wird vielfach empfohlen, die Entgratpresse direkt an die Druckgießmaschine anzubauen. Grundsätzlich kann in einem separaten Nachbearbeitungsschritt das Entgraten von Hand erfolgen.
- **Masselvorwärmegerät:** Teilweise ist ein Masselvorwärmegerät (MVG) vor dem Ofen angebracht, um das Metall vorzuheizen, bevor es in den Ofen gegeben wird.

Die Qualität des Gussteils wird neben Einflüssen der Druckgießmaschine selbst auch von Faktoren, die mit diesen Geräten zusammenhängen, wie z.B. Formtemperatur oder Formpflege, stark bestimmt. Auch die Temperatur der Druckgusslegierung in

der Gießkammer führt zu Gießfehlern im Druckgussteil, wenn ein gewisser Temperaturbereich nicht eingehalten wird. (Nogowizin 2011, S. 456)

Generell stehen sämtliche Maßnahmen, die zu einer Änderung des Prozesses führen, mit der Qualität der Gussteile in engem Zusammenhang (Nogowizin 2011, S. 31).

Die Komponenten des Druckgießprozesses können qualitativ hinsichtlich ihrer Prozessabhängigkeit sowie ihres Energieverbrauchs bewertet werden (Bild 29).

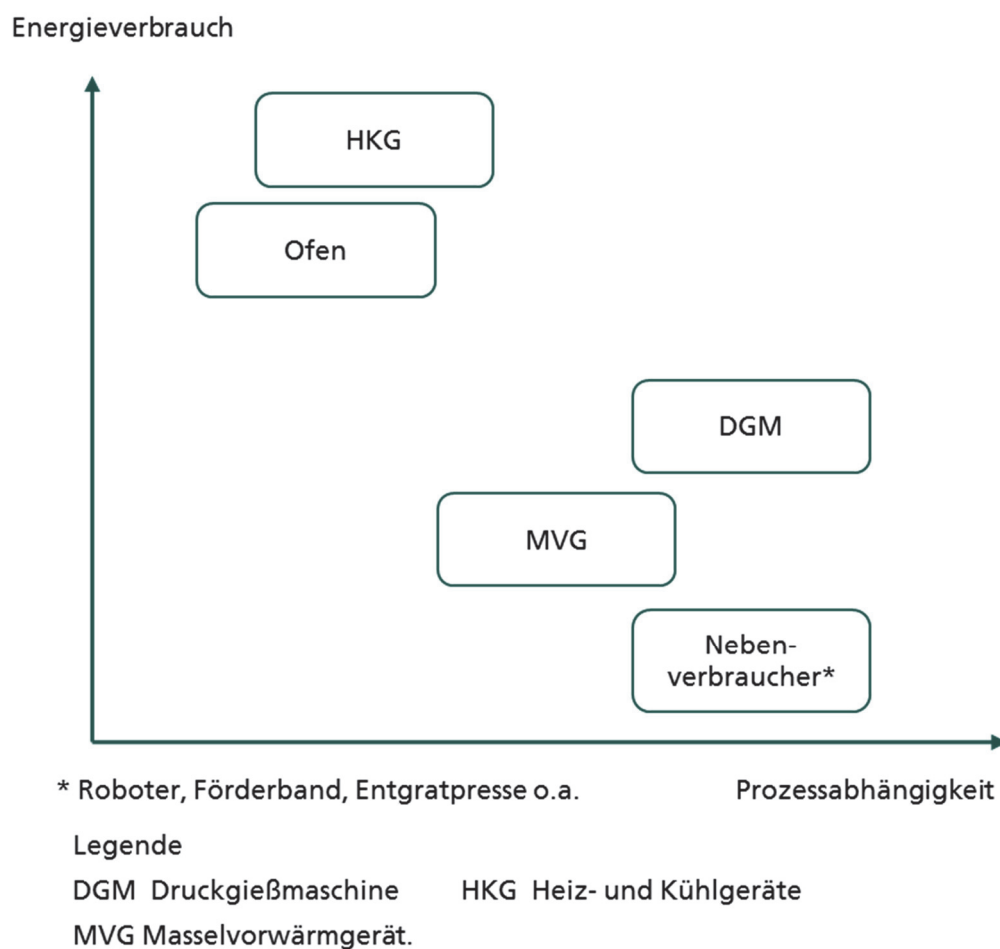


Bild 29: Komponentenbezogener Energieverbrauch eines Druckgießprozesses

Ofen sowie Heiz- und Kühlgeräte sind zu einem gewissen Teil als prozessunabhängig zu sehen, da beide Geräte vor dem eigentlichen Prozessstart eine gewisse Vorlaufzeit benötigen, um die Solltemperatur zu erreichen. DGM und Nebenverbraucher hingegen stellen den eigentlichen Prozess dar und können nicht entkoppelt werden, wobei der kumulierte Energiebedarf aller Nebenverbraucher relativ gering ist. Das MVG ist für den Prozess nicht zwangsläufig notwendig und könnte, wie Ofen und HKG, vom Prozess zeitlich versetzt angesteuert werden, wenn auch in kleineren Zeitfenstern.

Neben der energetischen Untergliederung kann zusätzlich der zeitliche Ablauf des Druckgießprozesses mit seinen einzelnen Komponenten und Teilprozessen sowie Nachbearbeitungsschritten schematisch dargestellt werden (Bild 30). Auf obige Unterteilung nach DGM, MVG und Nebenverbraucher wird hier verzichtet, sie werden innerhalb der DGM zusammengefasst.

Der Druckgießprozess eignet sich aus mehreren Gründen gut für die Flexibilisierung des Energiebedarfs. Er ist energieintensiv, besitzt träge thermische Komponenten wie Ofen und Temperiergeräte, welche aufgrund der Speicherfähigkeit und dem zeitlichen Versatz zum Produktionsprozess gute Voraussetzungen für eine Flexibilisierung aufweisen. Zudem ist der Gesamtprozess zum Großteil automatisiert.

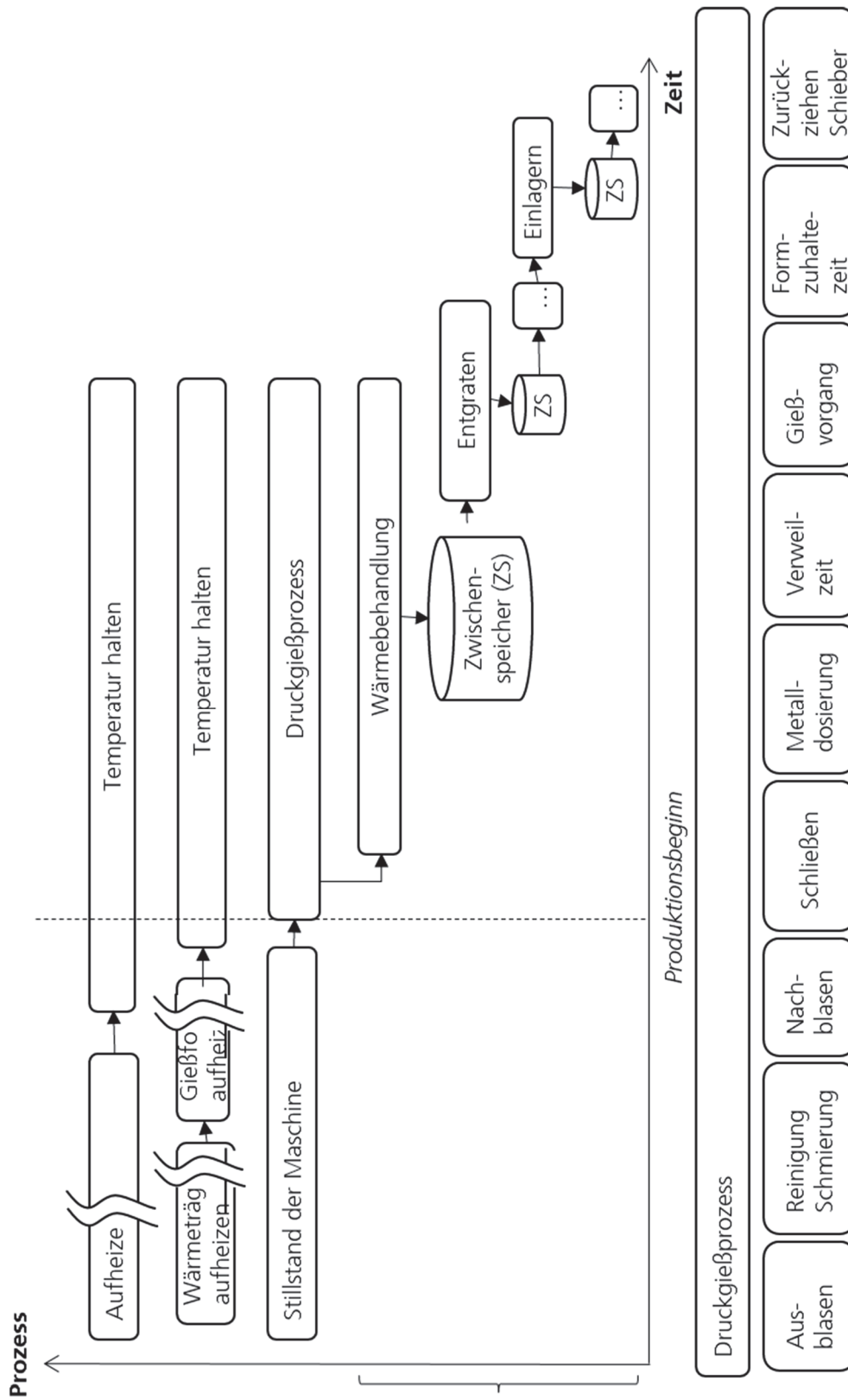


Bild 30: Darstellung der zeitlichen Abfolge des Druckgießprozesses

Im Rahmen des Kopernikusprojektes „SynErgie“ wurden mögliche Flexibilisierungspotenziale analysiert: (Köse et al. 2019, S. 561)

- Energie ein- oder zwischenspeichern
 - Flüssiges Magnesium als Speicher ausnutzen
 - Vorwärmung der Masseln anpassen
 - Temperatur des Werkzeugs ändern
 - Rückkühlsystem der Maschine als Speicher nutzen
- Prozessparameter anpassen
 - Zykluszeiten ändern
 - Temperatur der Schmelze ändern
 - Gießparameter ändern
 - Bemasselungszeitpunkte, -häufigkeit und -anzahl ändern
 - Maschinenkühlung ändern
- Organisatorische Maßnahmen
 - Pausenzeiten verschieben
 - Schichtzeiten anpassen
 - Maschinenbelegung anpassen
 - Produktionsreihenfolge ändern

Auf Basis der bisherigen Beschreibungen lassen sich einige Anforderungen für die energetische Flexibilisierung ableiten, welche für eine Steuerung des Prozesses notwendig bzw. vorteilhaft sind (Tabelle 24).

Tabelle 24: Anforderungen an die Flexibilisierung der DGM

<i>Anforderung 1:</i>	Separate Ansteuerung der Teilkomponenten Ofen, HKG und DGM
<i>Anforderung 2:</i>	Ansteuerung des Heizniveaus der thermischen Komponenten Ofen und HKG mit einem kontinuierlichen oder mehrstufig diskreten Signal
<i>Anforderung 3:</i>	Berücksichtigung der Vorlaufzeit für Ofen und HKG

Um die Teilkomponenten der DGM separat flexibilisieren zu können, müssen diese differenziert ansteuerbar sein. Sollen zusätzlich die Komponenten Ofen und HGK als energetischer Speicher fungieren, müssen die Temperaturniveaus der Komponenten regelbar sein. Abschließend muss auch die Vorlaufzeit von Ofen und HGK, die durch die Aufheizphasen entsteht, vor dem Hintergrund eines flexiblen Produktionsstarts berücksichtigt werden.

6.2.2 Systemmodell

Ausgehend von den Voraussetzungen des Energiemarkts, der Kommunikationstechnologie, der PPS sowie der Prozessanalyse einer Druckgießerei wurde ein Systemmodell aufgebaut, welches der entwickelten energieflexiblen Produktionssteuerung zugrunde liegt (Bild 31).

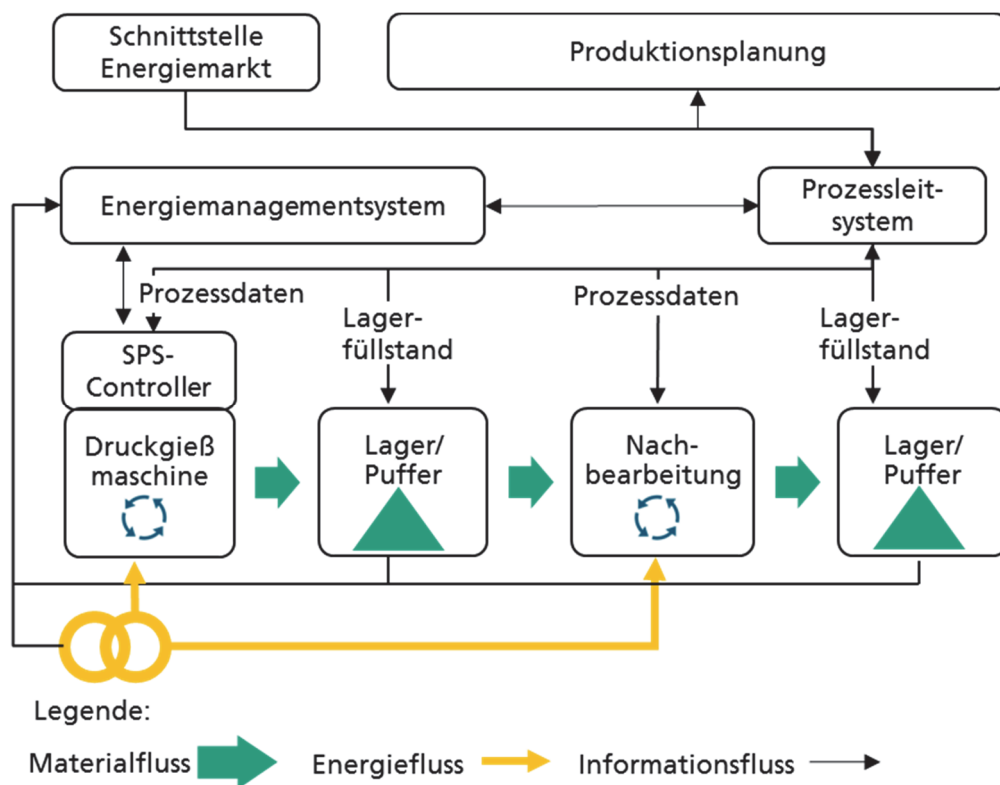


Bild 31: Systematischer Aufbau des Simulationsmodells des Druckgussproduktionssystems

Das Modell fasst sämtliche Nachbearbeitungsschritte in einem Prozess „Nachbearbeitung“ zusammen. Entscheidend ist, dass der Maschinenbediener der DGM bei Stillstand flexibel für die Bedienung anderer Maschinen eingesetzt werden kann, ohne Mehrkosten zu verursachen. Alternativ wird von einem vollautomatisierten Druckgießprozess ausgegangen, bei dem durch die flexible Fahrweise keine zusätzlichen Personalkosten anfallen. Darüber hinaus muss die DGM immer dann betriebsbereit sein, wenn der Prozess Nachbearbeitung aktiv ist. Die DGM darf nicht langfristig deaktiviert bleiben, solange Gussteile aus dem Lager entnommen werden. Über das PPS System werden Auftragsdaten generiert, die basierend auf der Schlupfzeitregel priorisiert werden. Die Auftragsfreigabe erfolgt dezentral durch die DGM. Vorausgesetzt wird eine korrekte Produktionsbedarfsplanung an Material und Ressourcen. Im Falle einer DGM ist dies eine ausreichende Versorgung mit Metallmasseln dar. Eine weitere Voraussetzung für Flexibilisierung ist die Entkopplung der Prozesse durch ein Zwischenlager. Die Füllstände der Lager sowie die aktuellen Prozessdaten der Maschinen werden elektronisch ausgelesen.

Das Energiemanagementsystem erfasst über eine Messstelle an den Transformatoren den Leistungsbezug der gesamten Fabrik. Eine Schnittstelle mit dem SCADA-System erlaubt eine Zuweisung des gemessenen Leistungsbezugs zu einzelnen Produktgruppen und Maschinen, welche in einer Datenbank hinterlegt werden.

Das-SCADA System ist über eine Schnittstelle mit dem Energiemarkt verbunden und steht in einem regelmäßigen Informationsaustausch mit den einzelnen Maschinen und den weiteren Datenbanken des Unternehmens. Es überwacht zusätzlich die Gesamtlast der Fabrik. Der aktuelle Strompreis und, falls vorhanden, die vom Netzbetreiber angefragte Regelleistung, werden über die Schnittstelle zum Energiemarkt an das SCADA-System übermittelt. Der Strompreis wird über einen Bus an die Maschinen kommuniziert, auf dessen Grundlage der dezentrale Algorithmus auf dem SPS Controller der Maschine den Produktionsdruck ermittelt. Diese Entscheidungsvariable kann ebenfalls als Grundlage für die Beantwortung von Regelergieanfragen genutzt werden. Je höher der Pd-Wert einer Maschine, desto wichtiger ist eine fortlaufende Produktion. Basierend auf dem Pd-Wert können die einzelnen

Anlagen sequentiell heruntergefahren werden, bis die angefragte Regelleistung erreicht ist. Der reduzierte Leistungsbezug kann vom Netzbetreiber eingesehen werden.

Über das PPS-System kann manuell festgelegt werden, welche Maschinen flexibel gefahren werden dürfen. Dadurch können durch den Algorithmus nicht erfasste Faktoren (kurzfristige Prozessprobleme, ungeplante Mitarbeiterausfälle, etc.) berücksichtigt und besonders kritische Prozesse von der energieflexiblen Regelung ausgenommen werden. Ist eine Maschine hiervon betroffen, wird ihr Produktionsdruck auf ein Maximum gesetzt. Dies schließt die Maschine einerseits von der energiepreisabhängigen Regelung aus und stellt andererseits sicher, dass die Maschine im Falle einer notwendigen Lastreduktion zuletzt heruntergefahren wird. Weiterhin kann manuell eine maximale Leistungsgrenze für die gesamte Fabrik festgelegt werden, deren Einhaltung nach dem oben beschriebenen Vorgehen sicherstellt. Durch diese Funktion können Leistungsspitzen vermieden werden, die selten und nur kurzzeitig auftreten, aber dennoch zu hohen Netzentgelten geführt hätten.

Aus dem Energiemanagementsystem können hinterlegte maschinen- und produktspezifische Leistungsbezüge abgerufen werden. Dieser Wert ist für die Wiederaufnahme des Betriebs relevant, da überprüft werden muss, ob sich der gesamte Leistungsbezug der Fabrik auch nach dem Start einer Anlage noch unterhalb des Grenzwerts befindet. Die Regelalgorithmen zur energieflexiblen Maschinenregelung befinden sich dezentral in der SPS der einzelnen DGMs. Der Strom wird entsprechend der Intradaymarktpreise bezogen. Die aktuellen Tarife werden an die einzelnen DGMs übertragen.

6.2.3 Systemzustände

Die Systemzustände ergeben sich aus der sequenziellen Ansteuerung der einzelnen Prozesskomponenten. Jedem Zustand wird ein charakteristischer und für die Dauer des Systemzustands zeitabhängiger Leistungsbezug zugeordnet (Bild 32).

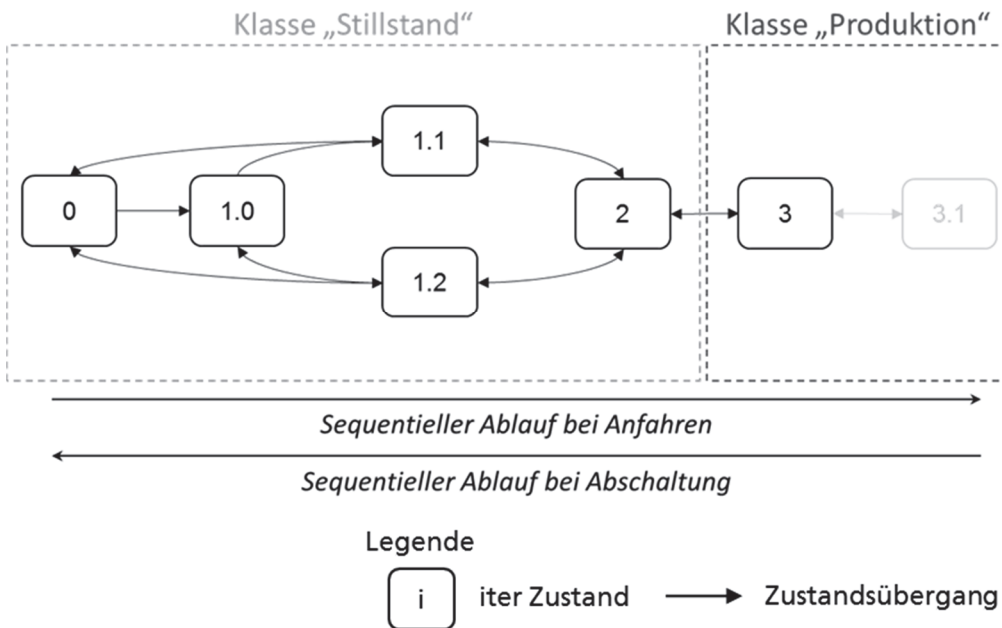


Bild 32: Betrachtete Prozesszustände der Druckgießmaschine

Die Zustände können in zwei Klassen unterteilt werden. Auf der einen Seite die Klasse „Stillstand“, in welcher keine Teile gegossen werden. Zustand 0 entspricht dem vollständigen Ruhezustand des gesamten Prozesses, alle Komponenten sind inaktiv. Von diesem Zustand können sequentiell die thermischen Geräte gestartet werden, in Zustand 1.0 der Ofen für das Halten des Temperaturniveaus „Nachtabsenkung“², in Zustand 1.1 für das Aufheizen auf Betriebstemperatur. Zustand 1.2 steht für das separate Anfahren der HKG, in Zustand 2 werden zuletzt beide Komponenten auf Betriebstemperatur geheizt. Auf der anderen Seite ergibt sich die Klasse „Produktion“, in welcher alle Prozesskomponenten in Betrieb sind (Zustände 3 und 3.1). Zustand 3.1 beschreibt Flexibilitätsoptionen während des Produktionsbetriebs.

² Dieser Zustand entspricht einem Heizniveau des Ofens, mit dem die Schmelze auf einem mittleren Temperaturniveau von 560°C gehalten wird. Dieses Temperaturniveau wird im Weiteren als „Nachtabsenkung“ bezeichnet, da es während des Regelbetriebs an Werktagen bei längeren Stillstandzeiten über Nacht gehalten wird.

Die Prozesszustände z und die zugehörigen Zustände der Prozesskomponenten können dabei in Abhängigkeit des Entscheidungskriteriums für die Zustandsübergänge strukturiert werden (Tabelle 25).

Tabelle 25: Übersicht über Prozesszustände der Druckgießmaschine

Zustand z	Ofen	HKG	DGM	Entscheidungskriterium
0	✘	✘	✘	Produktionsbeginn der DGM Kumulierte Stromkosten für den Aufheizprozess
1.0	☾	✘	✘	
1.1	✔	✘	✘	
1.2	✘	✔	✘	
2	✔	✔	✘	Pd(t)
3	✔	✔	✔	

Legende ✔ aktiv ✘ inaktiv ☾ Nachtabsenkung (560°C) Pd(t): Produktionsdruck

Aufgrund der sequenziellen Ansteuerung der Komponenten können nicht alle Systemübergänge abgebildet werden. Dazu gehört beispielsweise der direkte Übergang von Zustand 2 auf Zustand 0. Hier ist nur ein Wechsel über die Zustände 1.1 oder 1.2 möglich. Der Zustand 1.0 („Nachtabsenkung“) kann des Weiteren nur dann angesteuert werden, wenn der Ofen vorher komplett abgeschaltet war, da sonst das niedrigere zu haltende Temperaturniveau noch nicht erreicht wurde. Als Entscheidungskriterium für den Zeitpunkt eines Zustandsübergangs innerhalb dieser Klasse werden die Energiekosten herangezogen, eine logistische Komponente wird daher nicht berücksichtigt. Die Vorgehensweise bei der Berechnung des Startzeitpunktes wird in Kapitel 3.5.2 vorgestellt. Mit Ausnahme des Zustands 0, der dem Stillstand aller Prozesskomponenten entspricht, weisen alle Zustände der Klasse „Stillstand“ eine festgelegte minimale und maximale Verweilzeit auf. Ersteres wird von der benötigten Aufheizdauer festgelegt. Letzteres wird von dem maximalen Zeitraum begrenzt, innerhalb dessen der optimale Startzeitpunkt der thermischen Geräte ermittelt wird. Dieser wurde auf acht Stunden festgelegt, was der Dauer einer Schicht entspricht. Ein längerer Zeitraum erscheint aufgrund des großen Energieaufwands zur Temperaturhaltung bei einem frühen Start des Aufheizprozesses nicht mehr als sinnvoll.

Der Übergang zwischen den zwei Klassen „Stillstand“ und „Produktion“ (Übergang zwischen Zustand 2 und 3) entspricht dem An- und Abschalten der DGM. Das Entscheidungskriterium für diesen Übergang ist der Produktionsdruck P_d . Zustand 3 besitzt weder eine minimale noch eine maximale Verweilzeit, da keine Vorlaufzeit benötigt wird und prinzipiell sofort wieder in einen anderen Zustand gewechselt werden kann. Die DGM darf außerdem theoretisch unbegrenzt lange in Betrieb bleiben.³ Eine detaillierte Beschreibung des softwareseitigen Aufbaus der Maschinenregelung sowie der Quellcode finden sich im Anhang.

Dabei werden für die Systemzustände folgende Leistungsniveaus identifiziert (Tabelle 26).

Tabelle 26: Durchschnittliche Leistungsniveaus der Druckgießmaschine

<i>Systemzustände</i>	<i>Niveau</i>	<i>Leistung</i>
Leistung_Aufheizen	PAufheizen	177 kW
Leistung_Halten_685	PHalten, 685°C	27 kW
Leistung_Halten_560	PHalten, 560°C	16 kW
Leistung_Produktion	PProduktion	90 kW
Leistung_HKG_Aufheizen	PHKG, Aufheizen	138 kW
Leistung_HKG_Halten	PHKG, Halten	99 kW
Leistung_DGM	PDGM	65 kW

³ Für den reibungslosen Prozessablauf sollten in der Praxis allerdings regelmäßige Wartungsintervalle vorgesehen werden, wie z.B. eine ca. 30-minütige Ofenreinigung.

6.2.4 Szenariobildung und Ergebnisbewertung

In diesem Kapitel wird untersucht, welche Auswirkungen die entwickelte energieflexible Regelung des Produktionsprozesses hat und welche Einsparungen an Energiekosten realisiert werden können. Weiterhin wird die Sensibilität dieser Zielgröße zu fertigungsspezifischen Gegebenheiten geprüft.

6.2.4.1 Basisszenario Magnesiumdruckguss

Das Basisszenario des Druckgussunternehmens wird wie folgt definiert:

Es werden fünf parallele Fertigungslinien simuliert. Es sind zwei repräsentative Fertigungsaufträge von je 17500 Stück zu bearbeiten. Die Liefertermine sind der 12. und 24. Arbeitstag des Monats. Die Produktion läuft an Werktagen während allen drei Schichten und steht am Wochenende still. Das Zwischenlager hat eine Lagerkapazität von 500 Teilen, aus dem der Nachbearbeitungsprozess mit einer Stückzeit von 240 Sekunden Gussteile entnimmt. Die Mindestbetriebsdauer der DGM wurde auf drei Stunden festgelegt, was den einzuhaltenden Mindestbestand im Zwischenlager auf 45 Teile festlegt. Die Stückzeit der DGM liegt bei 91 Sekunden. Die Fertigung ist damit zu 88% unter idealen Bedingungen ausgelastet. Der Energiereferenzpreis wird auf Basis des Mittelwertes des gleichen Zeitraums des Vorjahres auf 155€/MWh festgelegt. Die Intervallgrenze E_{min} wird entsprechend der Standardabweichung auf 134 €/MWh festgelegt.

Zunächst soll die Beeinflussung des Betriebsverhaltens der Produktionsprozesse qualitativ veranschaulicht und untersucht werden. Dafür wurde ein beispielhafter Betriebsmonat simuliert. Die folgenden Grafiken zeigen die Ergebnisse der in AnyLogic untersuchten Modellparameter. Bild 33 zeigt den Strompreisverlauf für ein Intervall vom 528 Stunden (22 Arbeitstage), der auf Basis der Intraday EEX-Preise ermittelt wurde. Eine detaillierte Aufschlüsselung findet sich in Anhang C.

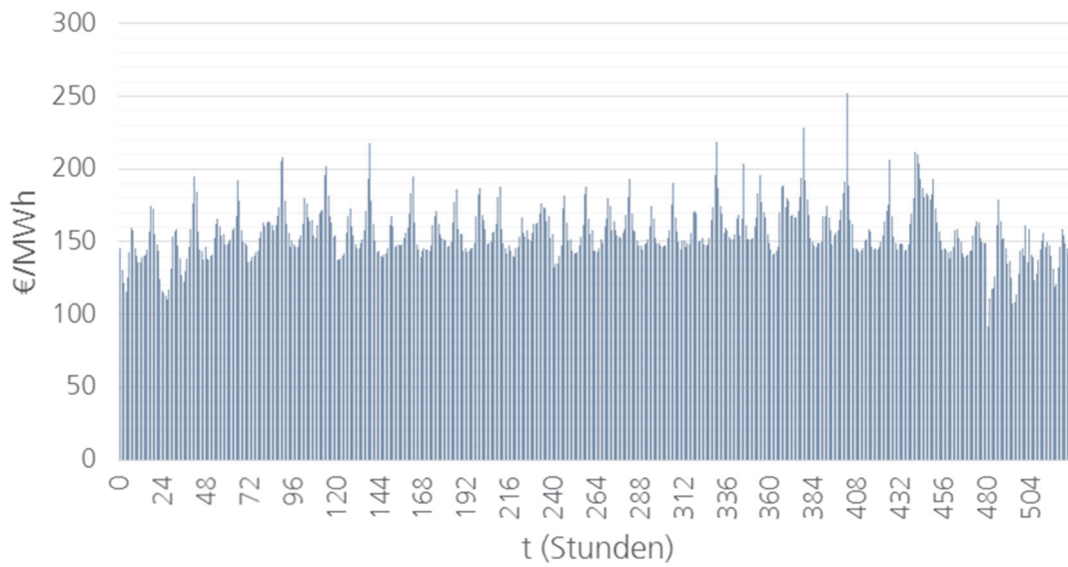


Bild 33: Nettostrompreisverlauf für den Simulationszeitraum

Auf Basis des Strompreises und der Eingangsdaten des Basisszenarios wird im ersten Schritt der zeitliche Verlauf der energetischen Komponente $E(t)$ und die logistische Komponente $L(t)$ berechnet (Bild 34). Die logistische Komponente bleibt dabei stets unter Null. Dies bedeutet, dass zu jedem Zeitpunkt potenziell mehr Produktionszeit zur Verfügung steht als benötigt wird. Nach 432 Stunden werden die logistische- und die energetische Komponente Null, da zu diesem Zeitpunkt der Auftrag abgeschlossen ist.

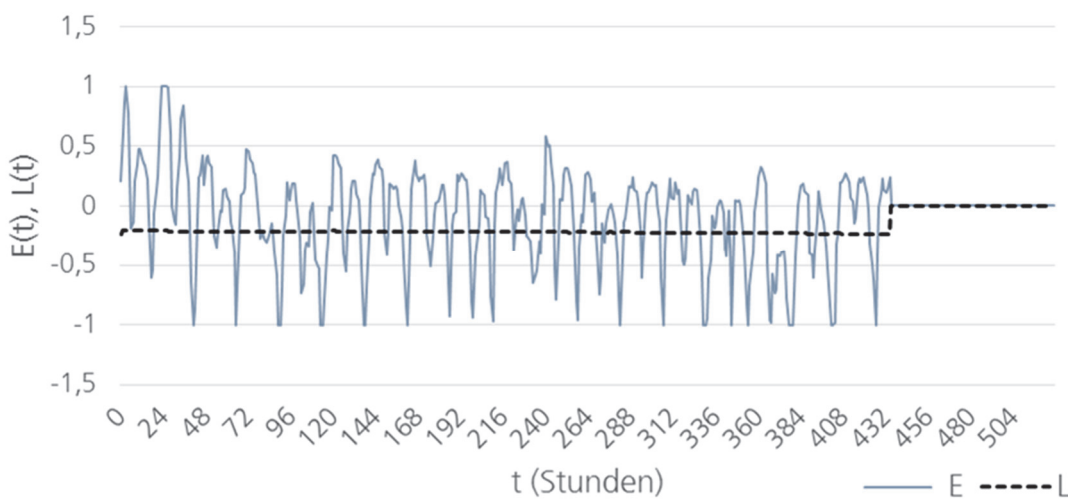


Bild 34: Verlauf der logistischen und der energetischen Komponente der DGM

Um den Verlauf der energetischen Komponente besser bewerten zu können, wird diese in Abhängigkeit des Energiepreisverlaufs dargestellt (Bild 35). Dabei ist zu erkennen, dass sich die energetische Komponente diametral zum Energiepreis verhält. Aus den beiden Komponenten L und E wird schließlich der Produktionsdruck Pd berechnet, nach dem die Produktionszeiten der Maschine ausgerichtet werden (Bild 36). Dabei ist zu erkennen, dass der Verlauf von Pd sehr stark dem Verlauf der energetischen Komponente folgt, aber durch die logistische Komponente abgeschwächt wird.

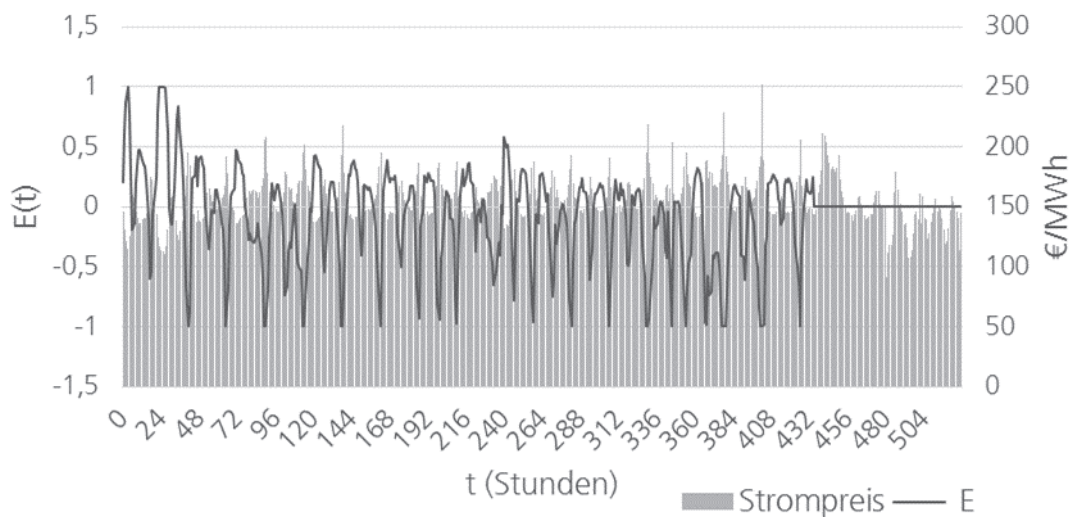


Bild 35: Verlauf der energetischen Komponente der DGM in Abhängigkeit des Strompreises

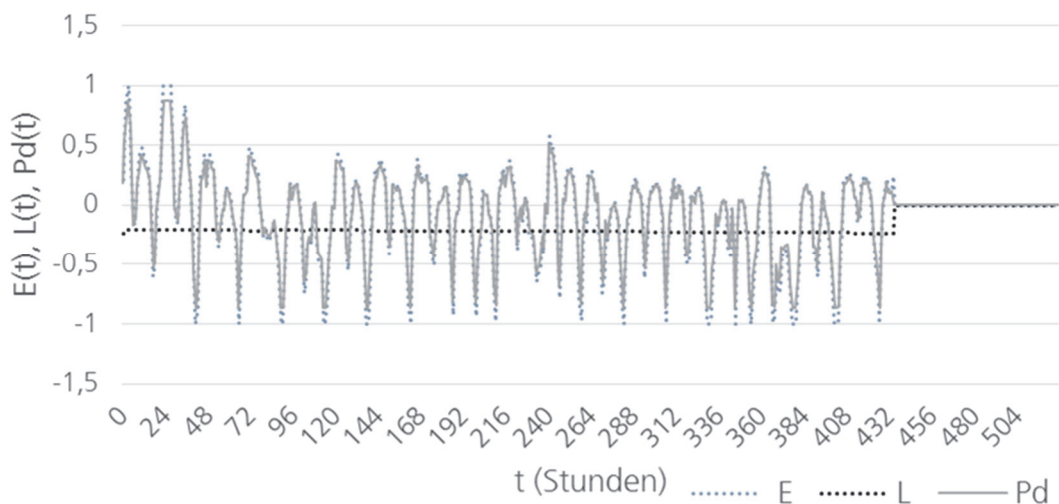


Bild 36: Verlauf des Produktionsdrucks der DGM

Im nächsten Schritt wird nun der Betriebszustand der Maschine in Abhängigkeit des Produktionsdrucks betrachtet (Bild 37). Dabei ist zu erkennen, dass das Schaltverhalten der Maschine für einen negativen Produktionsdruck, entsprechend der Vorgaben, erfüllt wird. Dies bedeutet, dass die Maschine bei negativem Produktionsdruck nicht in einem produktiven Zustand ist. Bei positivem Produktionsdruck hingegen ist zu erkennen, dass die Maschine nicht zu jedem Zeitpunkt in einem produktiven Betriebszustand ist.

Da der Lagerfüllgrad zusätzlich den Betriebszustand der Maschine beeinflusst, werden im nächsten Schritt der Lagerfüllgrad und der Produktionsdruck in Abhängigkeit der Zeit untersucht (Bild 38). Dabei zeigt sich, dass aufgrund der Stückzeitdifferenz der Druckgussmaschine und der Nachbearbeitung sowie der Gewichtung der logistischen Komponente des Produktionsdrucks das Lager am Rand seiner Kapazitätsgrenze von 500 Stück betrieben wird. Dies führt dazu, dass die Maschine nicht in einem produktiven Zustand ist, auch bei positivem Produktionsdruck.

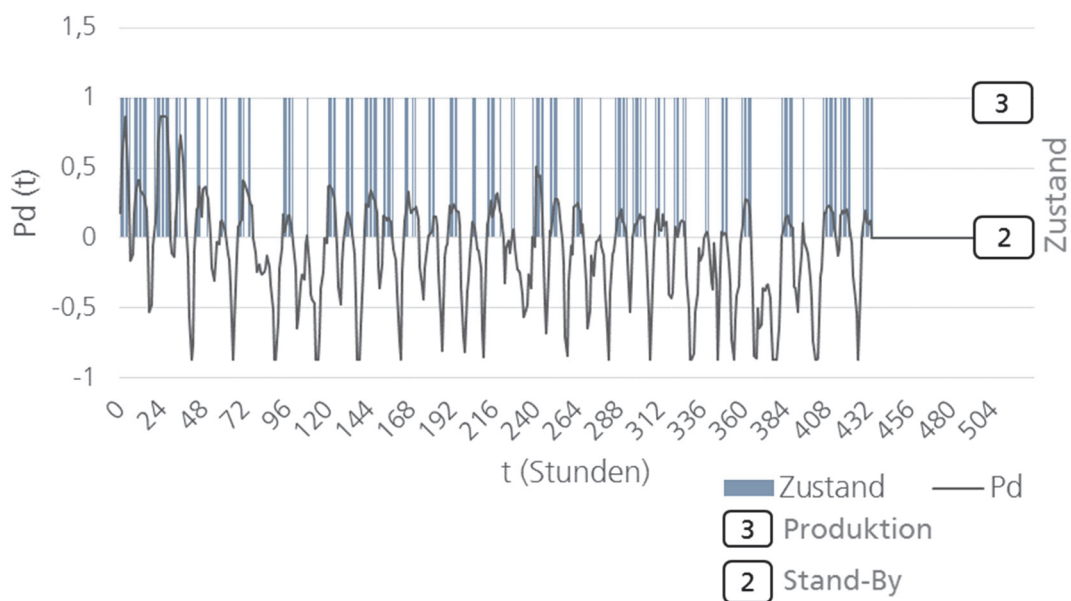


Bild 37: Schaltverhalten der DGM in Abhängigkeit des Produktionsdrucks

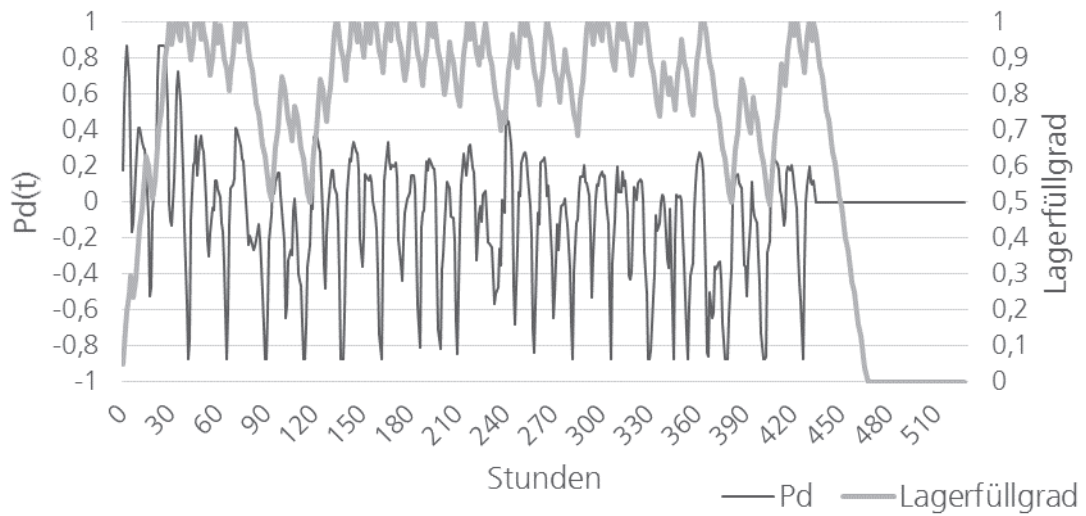


Bild 38: Verlauf des Lagerfüllgrads nach der DGM

Zur Bewertung der Ergebnisse werden in Abhängigkeit des Normalbetriebs die Stromkosten des energieflexiblen Betriebs auf Basis des Produktionsdrucks abgebildet (Bild 39). Gemessen am Normalbetrieb kann eine Reduktion der Energiekosten von 5% erzielt werden. Bei einer Auslastung von 100% sind schließlich die Kosten der zwei Szenarien identisch, da kein Flexibilitätspotenzial mehr vorhanden ist.

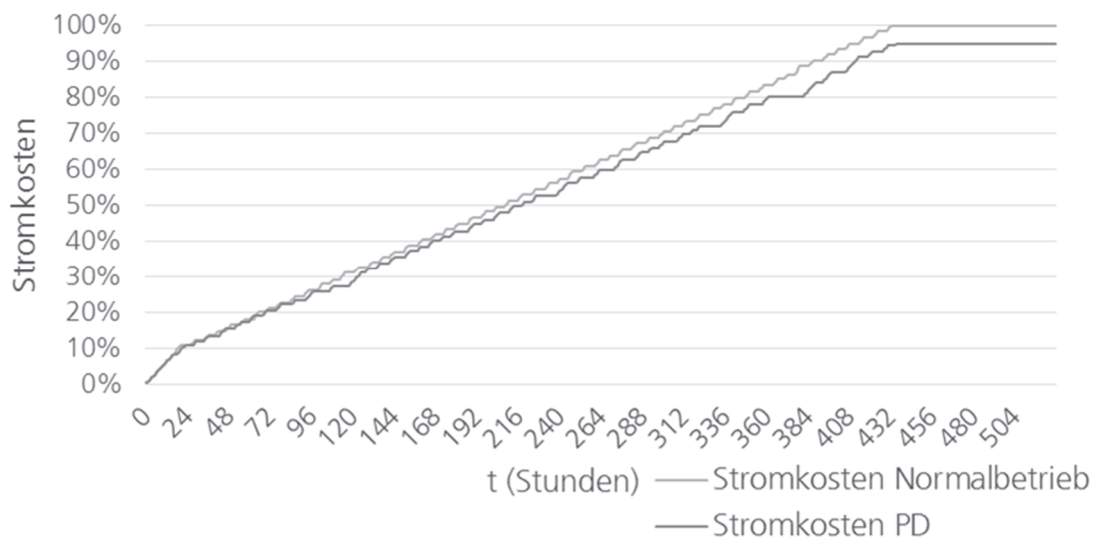


Bild 39: Stromkostenverlauf in Bezug zum Normalbetrieb der DGM

6.2.4.2 Parametervariation

Im nächsten Schritt wird der Einfluss der Szenariodaten auf die Zielgröße Energiekosten untersucht. Zu diesem Zweck werden die exogenen Variablen, also die Eingangsgrößen, in einem definierten Intervall und in Abhängigkeit einer Schrittgröße variiert (Tabelle 27).

Tabelle 27: Parametervariation des Basisszenarios des Druckgussproduktionssystems

<i>Exogene Variablen</i>	<i>Untere Intervallgrenze</i>	<i>Obere Intervallgrenze</i>	<i>Zähler</i>
<i>Mindestbetriebsdauer (Stunden)</i>	1	3	1
<i>Stückzeit Nachbearbeitung (Sekunden)</i>	192	240	20
<i>Lagervolumen (Stück)</i>	500	4000	500
<i>Mindestlagerbestand (Stück)</i>	45	200	50
E_{Ref} (€/MWh)	135,9	166,1	2
E_{min} (€/MWh)	117	143	5
<i>Gewichtung kE [-]</i>	1	5	1

Bezüglich des flexibilisierten Kernprozesses wird die Mindestbetriebsdauer im Intervall von ein bis drei Stunden betrachtet. Die Stückzeit der DGM kann prozesstechnisch nicht verändert werden. Die Stückzeit des Nachbearbeitungsprozesses wird schrittweise im Intervall von 240 Sekunden auf 192 Sekunden reduziert. Damit entspricht diese im Extremfall der Stückzeit der DGM und simuliert eine Kapazitätserhöhung der Nachbearbeitung. Eine weitere Reduktion der Stückzeit der Nachbearbeitung wird nicht mehr betrachtet, da in diesem Fall die Prozesse nicht mehr logistisch getrennt betrachtet werden können. Das Lagervolumen wird schrittweise von 500 Stück auf 4000 Stück vergrößert. Eine weitere Vergrößerung des Lagervolumens zeigt keine wesentlichen Effekte mehr hinsichtlich der Zielgröße. Der Mindestbestand des Lagers wird schrittweise von 45 Stück auf 200 Stück angehoben, was

den zu flexibilisierenden Lagerbestand beim minimalen Lagervolumen von 500 Stück auf 300 Stück reduziert. Der Energierferenzpreis sowie das untere Limit im Energierferenzintervall werden jeweils um 10% des Basiswertes variiert. Die Gewichtung der energetischen Komponente wird bis zum Faktor fünf erhöht.

Insgesamt werden somit 155.520 Szenarien untersucht. Dabei werden die linearen Hauptwirkungen sowie zweifachen Wechselwirkungen betrachtet. Da dreifachen Wechselwirkungen (und höhere Wechselwirkungen) in aller Regel sehr geringe Effekte gegenüber dem Vertrauensbereich haben, werden diese an dieser Stelle vernachlässigt (Egert 2012, S. 108). Die Modellgüte wird auf Basis des Bestimmtheitsmaßes und des multiplen Korrelationskoeffizienten als hoch eingeschätzt (Tabelle 28). Dies gilt auch für die Modellsignifikanz, was bedeutet, dass das multiple Regressionsmodell einen statistisch signifikanten Erklärungsbeitrag leistet.

Tabelle 28: Regressionsstatistik

Multipler Korrelationskoeffizient	Bestimmtheitsmaß R^2	Signifikanz Prüfgröße $F > f_{krit}$	Szenarien
0,979996049	0,960392256	168,2 > 5,93784E-70	155520

Betrachtet man die normierten Regressionskoeffizienten, so wird deutlich, dass im Wesentlichen drei Eingangsgrößen das Maschinenverhalten dominieren (Tabelle 29). Dies sind die Mindestbetriebsdauer, das Lagervolumen und der Energierferenzpreis E_{ref} . Auf Ebene der zweifachen Wechselwirkungen zeigt sich, dass eine Änderung von Lagervolumen und Energierferenzpreis ebenfalls eine signifikante Wirkung auf die Zielgröße haben.

Tabelle 29: Normierte Regressionskoeffizienten

<i>Exogene Variablen</i>	<i>Codierung</i>	<i>Korrelationskoeffizient normiert</i>
Mindestbetriebsdauer	A	-0,365
Stückzeit Nachbearbeitung	B	0,077
Lagervolumen	C	-0,141

<i>Exogene Variablen</i>	<i>Codierung</i>	<i>Korrelationskoeffizient normiert</i>
Mindestlagerbestand	D	0,000
Emin	F	0,050
Gewichtung kE	G	0,000
	A_B	-0,004
	A_C	0,018
	A_D	0,000
	A_E	0,055
	A_F	-0,050
	A_G	0,000
	B_C	-0,010
	B_D	0,000
	B_E	-0,032
	B_F	-0,023
	B_G	0,000
	C_D	0,000
	C_E	-0,130
	C_F	-0,018
	C_G	0,000
	D_E	0,000
	D_F	0,000
	D_G	0,000
	E_F	-0,050
	E_G	0,000
	F_G	0,000

6.2.4.3 Sensitivitätsanalyse Energiereferenzpreis

Der Effekt des Energiereferenzpreises auf die energetische Komponente E und damit auf die Entscheidungsvariable kann als maßgeblich betrachtet werden. Eine Reduktion von E_{ref} in Bezug zum echten Mittelwert führt damit zu einer negativen Verschiebung der E -Funktion auf der y -Achse (Bild 40). Dies bedeutet, dass der Energiepreisgrenzwert, der die energetische Komponente positiv in die Entscheidungsvariable P_d eingehen lässt, geringer wird. Dies trifft in umgekehrter Weise auch auf eine Erhöhung von E_{ref} zu (Bild 40). Die Steigung der E -Funktion und damit die Definition von E_{min} wird auf Basis der Szenarioanalyse als nicht maßgebend eingeschätzt.

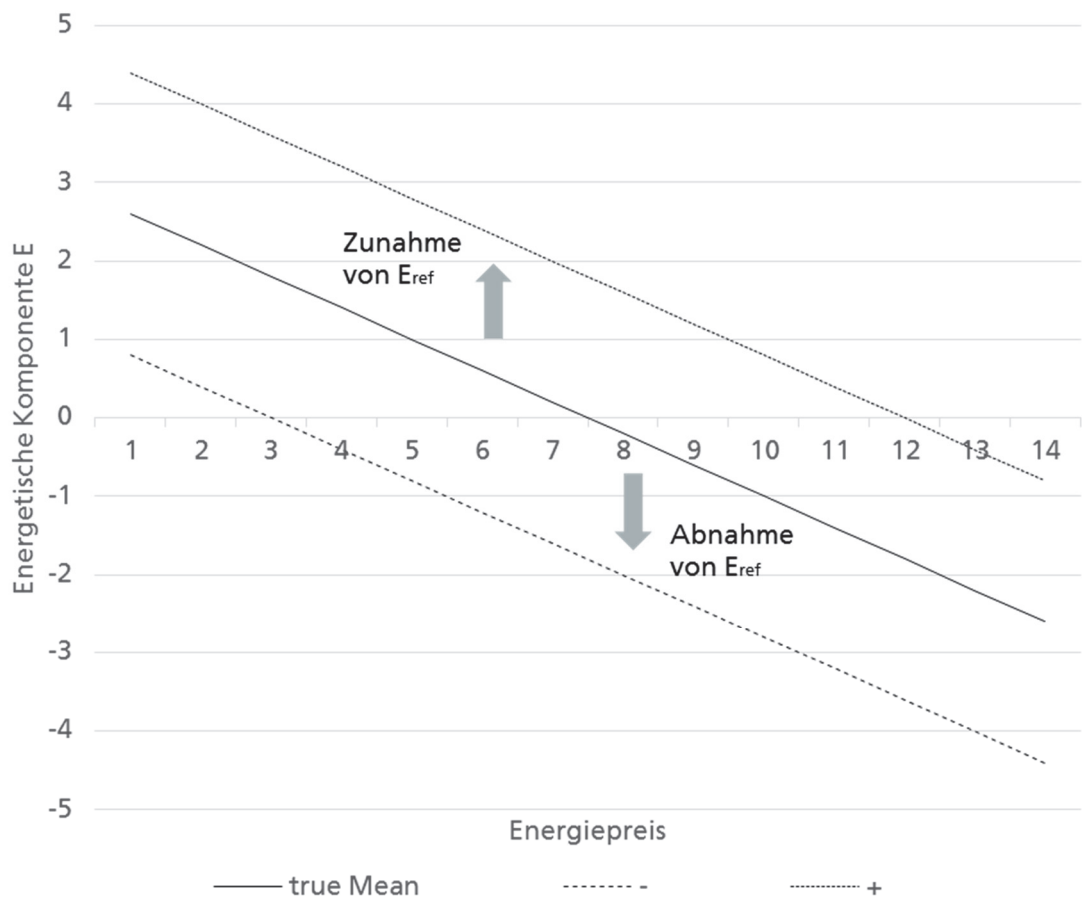


Bild 40: Effekt des Energiereferenzpreises auf die energetische Komponente der DGM

Wie in Kapitel 5.4.2.2 erläutert, kann der Wert von E_{ref} auf unterschiedliche Weise festgelegt werden. Im Folgenden wurde die Ermittlung der Größe aus historischen Energiepreisen verwendet, zum einen aus dem Mittelwert des Vorjahres, zum anderen aus dem mittleren Strompreis des Vorjahresmonats.

Für die Untersuchung der Auswirkung auf die Zielgröße der Energiekosten wurden drei einzelne Monate des Jahres 2018 simuliert. Die restlichen Eingangsvariablen wurden gegenüber dem Basisszenario nicht geändert. E_{ref} wurde jeweils aus dem Durchschnittspreis des Jahres 2017 („Jahresreferenzpreis“) bzw. des gleichen Monats aus dem Jahr 2017 („Monatsreferenzpreis“) berechnet. Durch die Wahl eines kleineren Zeitraums soll E_{ref} eventuelle saisonale Abhängigkeiten des Strompreises (z.B. durch stärkere Sonneneinstrahlung im Sommer) besser abbilden und zu höheren Einsparungen an Energiekosten führen.

In Tabelle 30 sind die gewählten Monate, die entsprechenden Monate des Vorjahres und das gesamte Vorjahr mit den durchschnittlichen Börsenpreisen aufgelistet. Diese wurden entsprechend dem jeweiligen Energiereferenzpreis E_{ref} zugewiesen. In der rechten Spalte sind die Charakteristika der Energiebepreisung in den einzelnen Zeiträumen genannt. Durch die Wahl verschiedener Monate wurden unterschiedliche saisonale Zeiträume abgebildet, in denen die Einspeisung erneuerbarer Energien unterschiedlich stark fluktuierte und zu einer unterschiedlichen Volatilität des Strompreises an der Börse führte.

Tabelle 30: Datenbasis zur Energierferenzpreisvariation (Nettopreise)

<i>Zeitraum</i>	<i>Ø-Preis [€/MWh]</i>	<i>Charakteristika</i>
März 2018	155,4	Gleiches Preisniveau wie im Vorjahresmonat und ähnlich wie im Vorjahr
März 2017	155,5	
2017	156,6	Höheres Preisniveau als im Vorjahresmonat und niedriger als im Vorjahr
August 2018	153,4	
August 2017	150,4	Niedrigeres Preisniveau als im Vorjahresmonat und ähnlich wie im Vorjahr
2017	156,6	
November 2018	157,1	
November 2017	160,8	
2017	154,1	

Im März lagen die Einsparungen aufgrund der beinahe identischen Energierferenzpreise in beiden Szenarien sehr nahe beieinander. Im Monat August konnten durch Verwendung des Mittelwerts des Vorjahresmonats für E_{ref} höhere Einsparungen realisiert werden als bei Verwendung des Jahresdurchschnitts, wohingegen für November der Jahresreferenzpreis zu höheren Einsparungen geführt hat. Grundsätzlich lassen sich durch die Verwendung des Monatsdurchschnittspreises geringfügig höhere Einsparungen erzielen (Tabelle 31).

Tabelle 31: Energiekosteneinsparung durch Energiereferenzpreisvariation gegenüber dem Normalbetrieb der DGM

<i>Monat</i>	<i>Jahresreferenzpreis</i>	<i>Monatsreferenzpreis</i>
März 2018	6,7 %	6,8 %
August 2018	5,3 %	7,1%
November 2018	7,3 %	5,5 %
<i>Durchschnitt</i>	<i>6,43 %</i>	<i>6,47 %</i>

6.2.4.4 Sensitivitätsanalyse Mindestbetriebsdauer und Lagervolumen

Neben dem Energiereferenzpreis beeinflussen auch die Mindestbetriebsdauer und das Lagervolumen den energieflexiblen Regelalgorithmus. Für alle folgenden Untersuchungen wurde für E_{ref} der Durchschnittspreis des Vorjahres verwendet.

Zwischen den logistischen Parametern bestehen insofern Abhängigkeiten, da die Mindestbetriebsdauer den unteren Grenzwert der minimalen und maximalen Bestandsmenge beeinflusst. Das Lager muss ausreichen, um bei Stillstand der Maschine den Nachbearbeitungsprozess zu versorgen. Weiterhin muss die während der Mindestbetriebsdauer angesammelte Menge an Produkten im Zwischenlager untergebracht werden können.

In Bild 41 wird der mögliche Lösungsraum der Sensibilitätsuntersuchung aufgespannt. Die Mindestbetriebsdauer wird zwischen eins und drei Stunden variiert. Die untere Grenze des Lagervolumens wird auf 500 Stück und die obere Grenze auf 4000 Stück festgelegt.

Die Simulationen wurden unter Ceteris-paribus-Bedingungen durchgeführt, neben der Lagergröße und der Mindestbetriebsdauer wurden keine weiteren Parameter des oben definierten Produktionsszenarios verändert. Die Simulation wurde für den Monat März 2018 durchgeführt. Tabelle 32 zeigt die Simulationsergebnisse für die Kombinationen beider Parameter.

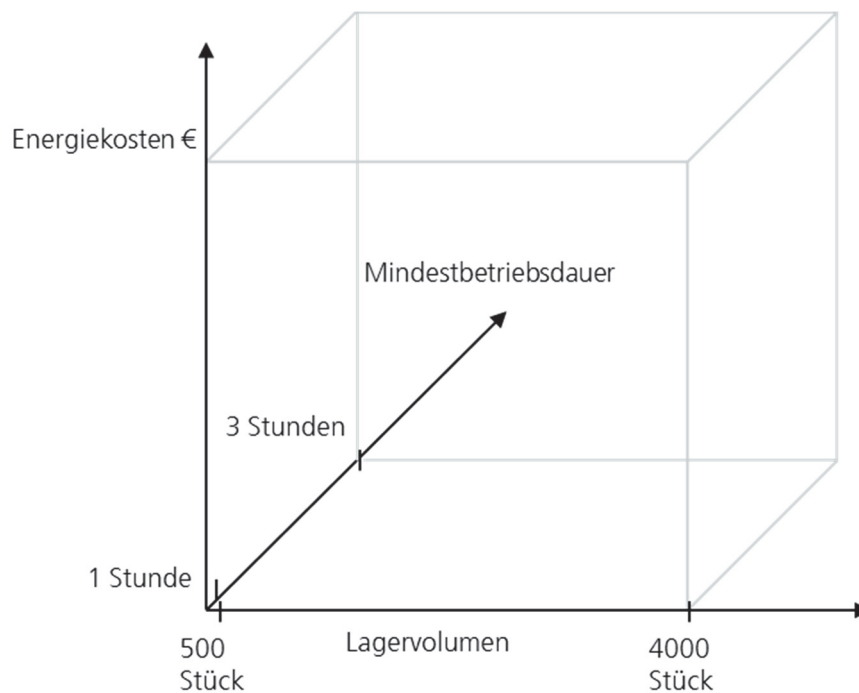


Bild 41: Lösungsraum für die Variation von Mindestbetriebsdauer und Lagergröße der DGM

Der Effekt durch die Reduktion der Mindestbetriebsdauer und der Erhöhung des Lagervolumens ist weniger ausgeprägt als der des Energiereferenzpreises (Tabelle 32). Ein positiver Effekt durch die Erhöhung des Lagervolumens ist nur bis zu einer Grenze von 2000 Stück zu erkennen. Darüber hinaus kann keine weitere Reduktion der Energiekosten festgestellt werden. Eine Reduktion der Mindestbetriebsdauer führt, wie die Erhöhung des Lagervolumens, zu einer Reduktion der Energiekosten. Eine weitere Reduktion der Mindestbetriebsdauer erscheint aus prozesstechnischer Sicht nicht mehr sinnvoll (vgl. 6.2.1).

Tabelle 32: Energiekostensparnis für die Variation der Mindestbetriebsdauer und der Lagergröße der DGM

		<i>Mindestbetriebsdauer [h]</i>		
		1	2	3
<i>Lagergröße [Stück]</i>	500	7,01%	6,99%	6,97%
	1000	7,38%	7,34%	7,32
	1500	7,53%	7,48%	7,45
	2000	7,72%	7,67%	7,64
	2500	7,73%	7,67%	7,64
	3000	7,73%	7,68%	7,64

6.2.4.5 Sensitivitätsanalyse Lagervolumen und Energierferenzpreis

Um die zweifachen Wechselwirkungen zwischen einer Änderung des Lagervolumens und des Energierferenzpreises zu untersuchen, wird der mögliche Lösungsraum der Sensibilitätsuntersuchung aufgespannt (Bild 42).

E_{ref} wird zwischen 133 €/MWh und 166 €/MWh variiert. Die untere Grenze des Lagervolumens wird auf 500 Stück und die obere Grenze auf 4000 Stück festgelegt. Die Simulationen wurden unter Ceteris-paribus-Bedingungen durchgeführt; neben der Lagergröße und der Mindestbetriebsdauer wurden keine weiteren Parameter des oben definierten Produktionsszenarios verändert. Die Simulation wurde für den Monat März 2018 durchgeführt. Bild 43 zeigt die Simulationsergebnisse für die Kombinationen beider Parameter.

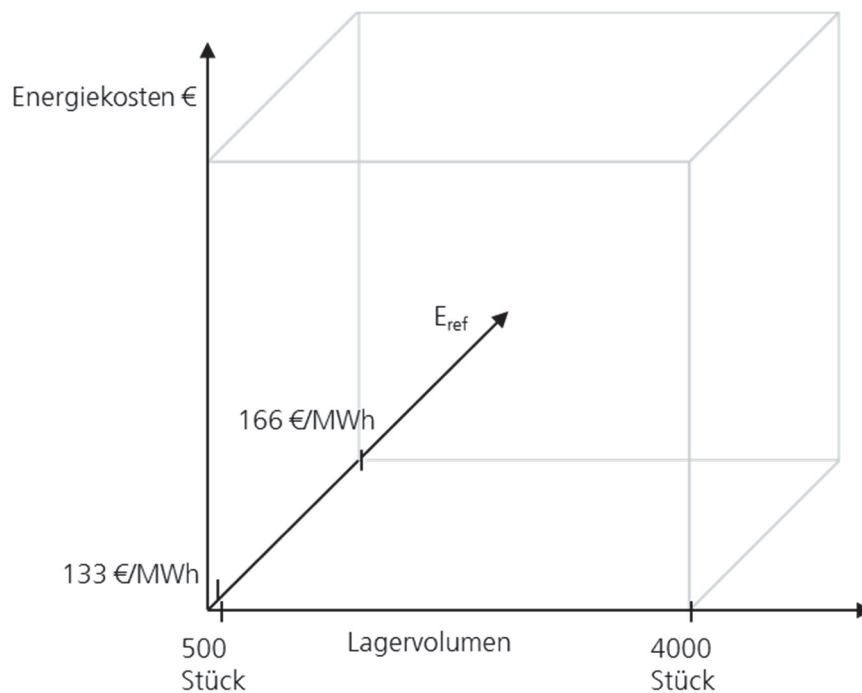
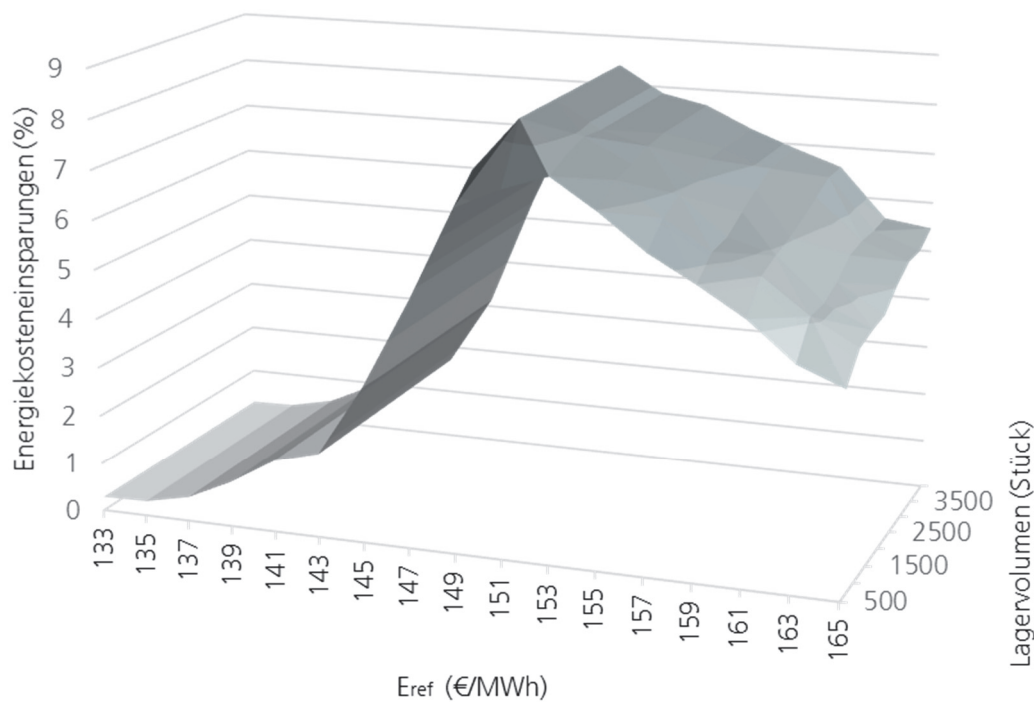


Bild 42: Lösungsraum für die Variation von Lagervolumen und Energiereferenzpreis der DGM

Es können zwei unterschiedliche Optima hinsichtlich des Energiereferenzpreises und des Lagervolumens unterschieden werden.

Für ein Lagervolumen von 500 Stück liegen die maximalen Einsparungen bei einem E_{ref} von 153 €/MWh. Ist der Wert von E_{ref} niedriger, sinkt die Reaktivität der DGM. Dies bedeutet, dass der Betriebszustand der DGM zunehmend durch den Lagermindestbestand bestimmt wird.

Für ein Lagervolumen von 1000 Stück und mehr liegen die maximalen Einsparungen bei einem E_{ref} von 151 €/MWh. Darüber hinaus wird auch hier der Betriebszustand der DGM zunehmend durch den Lagermindestbestand bestimmt. Der niedrigere Wert von E_{ref} kann in diesem Fall durch ein höheres Lagervolumen kompensiert werden. Es kann somit bei günstigeren Preisen mehr vorproduziert werden. Dieser Effekt kann bei Lagervolumina von mehr als 1000 Stück jedoch nicht weiter verstärkt werden.



**Bild 43: Energiekostenreduktion gegenüber dem Normalbetrieb in Abhängigkeit von Lager-
volumen und Energiereferenzpreis der DGM**

6.2.4.6 Parameteroptimierung und Ergebnisbewertung

Basierend auf den gewonnen Erkenntnissen wird eine optimierte Parametrierung der energieflexiblen Regelung für das Basisszenario vorgenommen. Vor dem Hintergrund des logistischen Zielsystems müssen dabei Durchlaufzeit, Termintreue, Auslastung und Bestände mitbetrachtet werden.

Eine Reduktion der Mindestbetriebsdauer erhöht die Flexibilität des Prozesses hinsichtlich der Volatilität des Energiepreises, wovon an dieser Stelle jedoch abgesehen wird. Dies erhöht die Anzahl der Schaltvorgänge der DGM, aber führt nicht zu einer maßgeblichen Reduktion der Energiekosten (vgl. Kapitel 6.2.4.4.) Eine Reduktion von E_{ref} auf 153 €/kWh führt zu einer Reduktion der Energiekosten von 7,5% gegenüber dem Normalbetrieb (Bild 44). Dabei reduziert sich die Durchlaufzeit um 6%

und der mittlere Lagerfüllgrad liegt bei 65%. Gegenüber dem Normalbetrieb mit einem mittleren Lagerfüllgrad von 50% entspricht dies einer Zunahme des mittleren Lagerfüllgrads von 15%. Dies entspricht einer mittleren Bestandserhöhung von 75 Stück. Damit können Einsparung in Höhe von 8200 € bezogen auf ein Jahr für die gesamte Produktion erzielt werden (fünf DGMs).

Eine Reduktion von E_{ref} auf 151 €/kWh und eine Erhöhung des Lagervolumens um 500 Stück führen zu einer Reduktion der Energiekosten von 8,4% gegenüber dem Normalbetrieb (Bild 44). Dabei reduziert sich in diesem Fall die Durchlaufzeit um 6,5% bei einem mittleren Lagerfüllgrad von 62%. Gegenüber dem Normalbetrieb mit einem mittleren Lagerfüllgrad von 50% entspricht dies einer Zunahme des mittleren Lagerfüllgrads von 12%. Dies entspricht einer mittleren Bestandserhöhung von 120 Stück. Damit können Einsparung in Höhe von 9200 € bezogen auf ein Jahr für die gesamte Produktion erzielt werden (fünf DGMs).

Basierend auf den vorliegenden Untersuchungen wird die Reduktion von E_{ref} auf 153 €/kWh bei gleichbleibendem Lagervolumen als optimale Parametrierung identifiziert. Basierend auf dem marktüblichen Effektivzinssatz und einer durchschnittlichen Lagerdauer von 30 Tagen kann der Lagerzinssatz berechnet werden. Bei einem

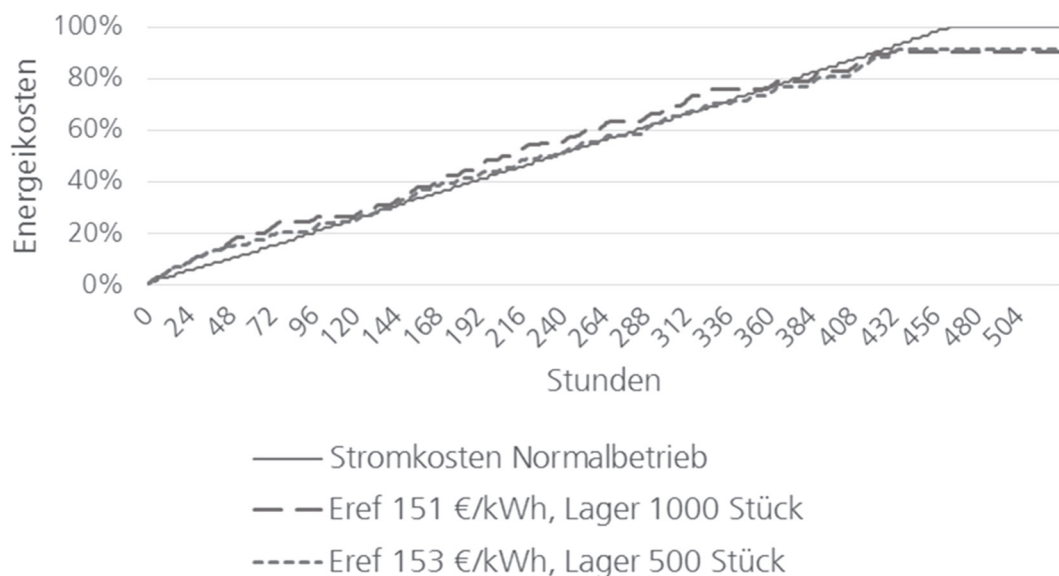


Bild 44: Prozentualer Stromkostenverlauf in Abhängigkeit des Normalbetriebs der DGM

Einstandspreis von 3 €/Stück und einem durchschnittlichen Bestand von 35000 Stück können so die entstehenden Lagerkosten betrachtet werden. Der marktübliche Effektivzinssatz für nichtfinanzielle Kapitalgesellschaften hatte seinen Maximalwert von 5,59% im Jahr 2007 und ist seitdem kontinuierlich gefallen. Seit 2014 liegt er unter 2% (Deutsche Bundesbank 2020). Legt man ein Effektivzinsintervall von 2% - 6% zugrunde, entstehen zusätzliche Lagerkosten in Höhe von 178,5 € bis 525 €. Damit können Einsparung im Bereich von 7675 € bis 8021,5 € bezogen auf ein Jahr für die gesamte Produktion erzielt werden (Bild 45).

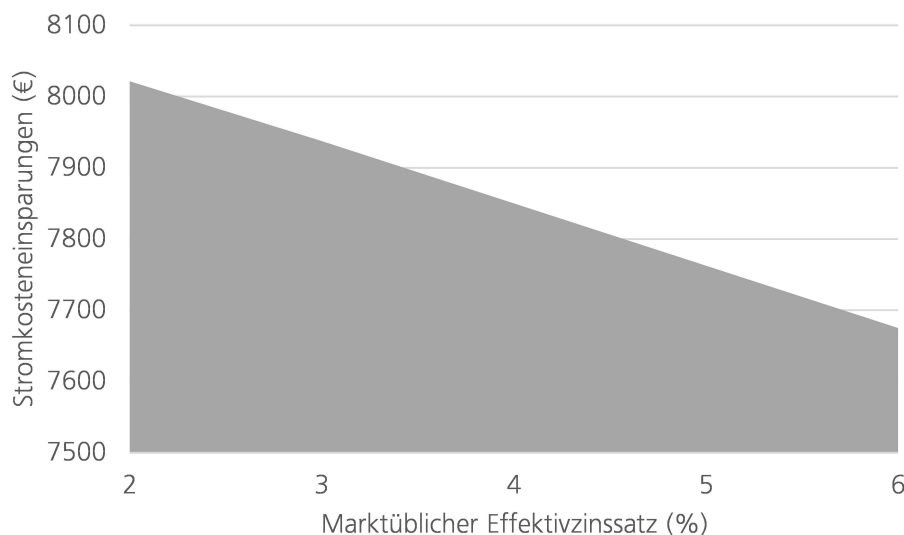


Bild 45 Stromkosteneinsparungen der DGMs in Abhängigkeit des Marktüblichen Effektivzinssatzes bezogen auf ein Jahr

6.2.4.7 Schaltverhalten thermischer Prozesskomponenten

Im Folgenden soll untersucht werden, ob und welche Einsparungen durch die Optimierung der Aufheizphasen der thermischen Komponenten des Prozesses, des Ofens und der HKG realisiert werden können.

Zunächst wurde ein Simulationsdurchlauf unter bisherigen Produktionsbedingungen für die Monate März, August und November des Jahres 2018 mit aktiver energieflexiblen Regelung durchgeführt. Über den gesamten Simulationsdurchlauf kam es zu keinem Zeitpunkt zu einer Verschiebung der Aufheizphase. Die Preisunterschiede

zwischen potenziellen Aufheizphasen waren zu gering, um Mehrkosten eines verlängerten Heizprozesses zur Temperaturhaltung überkompensieren zu können.

6.2.5 Fazit Automobilzulieferer Magnesiumdruckguss

Zusammenfassend lässt sich für das Unternehmen feststellen, dass eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Regelung der Produktion sinnvoll ist. Im Optimalfall kann mit Einsparungen in Höhe von 7,5% der Energiekosten der DGM gerechnet werden. Diese verursachen ein Drittel der gesamten Energiekosten der Produktion. Dabei ist jedoch von einer Erhöhung der mittleren Bestände um 15% gegenüber einem nicht energetisch flexibilisierten Betrieb auszugehen.

Eine Optimierung der Aufheizphasen der thermischen Komponenten des Prozesses, des Ofens und der HKG führt jedoch zu keinen Einsparungen bei den Energiekosten.

6.3 Automobilzulieferer Spritzgießen

Für das zweite Beispiel wurde auf die Produktion eines Unternehmens der Spritzgussindustrie zurückgegriffen. Aus dem Energiemonitoring-System konnten Leistungsdaten bezogen werden. Das PPS-System stellte logistische Daten zur Verfügung. Informationen zu Prozessabläufen (z.B. Anfahren der thermischen Verbraucher vor Produktionsbeginn) konnten in Experteninterviews erhoben werden. Die Produktion arbeitet im Dreischichtbetrieb von Schichten zu je acht Stunden. Der Betrieb erfolgt an 255 Tagen im Jahr.

Der Jahresenergiebedarf des Unternehmens liegt zwischen 0,9 bis 1,1 Mio. kWh. Der Stromtarif für Industrieunternehmen dieser Größe lag in Deutschland in den letzten fünf Jahren zwischen 15,1 und 17,2 Cent pro kWh. Bei Industrieunternehmen mit einem jährlichen Verbrauch von über 100 Megawattstunden (MWh) wird vom Netzbetreiber außerdem eine Messung der viertelstündig gemittelten Leistungswerte durchgeführt, deren Jahreshöchstwert zur Berechnung der zu zahlenden Netzentgelte herangezogen wird.

6.3.1 *Der Spritzgießprozess*

Das Spritzgießen ist ein diskontinuierliches Formverfahren. Dabei werden durch das Zusammenwirken elektrischer, mechanischer, hydraulischer und thermischer Komponenten Formteile aus Kunststoff hergestellt (Bonten 2016, S. 274–275). Zusätzlich zur Spritzgussmaschine an sich spielt das Werkzeug eine zentrale Rolle. Dabei können ein oder mehrere Teile erzeugt werden, indem das Werkzeug mit einer oder mehreren Kavitäten sowie entsprechenden Einrichtungen zur Befüllung der Kavitäten und zur Kühlung der heißen Formmasse ausgestattet ist. (Hopmann et al. 2017, S. 19–21)

Über einen Trichter an der Maschine wird das Material in Form von Granulat in die Maschine eingefüllt. In einem beheizten Zylinder wird das Material durch eine rotierende Schnecke oder mit einem Kolben durch verschiedene Temperaturzonen befördert, sodass das Material aufgeschmolzen und homogenisiert wird. Durch eine Düse wird das aufgeschmolzene Material unter Druck in den Hohlraum des Werkzeugs eingespritzt und abgekühlt. Nach einer definierten Kühl- und Härtezeit wird das Formteil ausgeworfen. (Hopmann et al. 2017, S. 64)

Die elektrische Leistung einer Spritzgussmaschine (SGM) setzt sich hauptsächlich aus der elektrischen Heizung und der Leistung des Hydraulikkreislaufs zusammen. Aus der Verteilung der Energieverbräuche über die Zyklen geht hervor, dass die Plastifizierphase mit Abstand den höchsten Energieverbrauch aufweist (Bild 46). Dies ist auf die hohe Wärmezufuhr zurückzuführen. Leistungsspitzen treten jedoch hauptsächlich im Bereich der Einspritzphase auf.

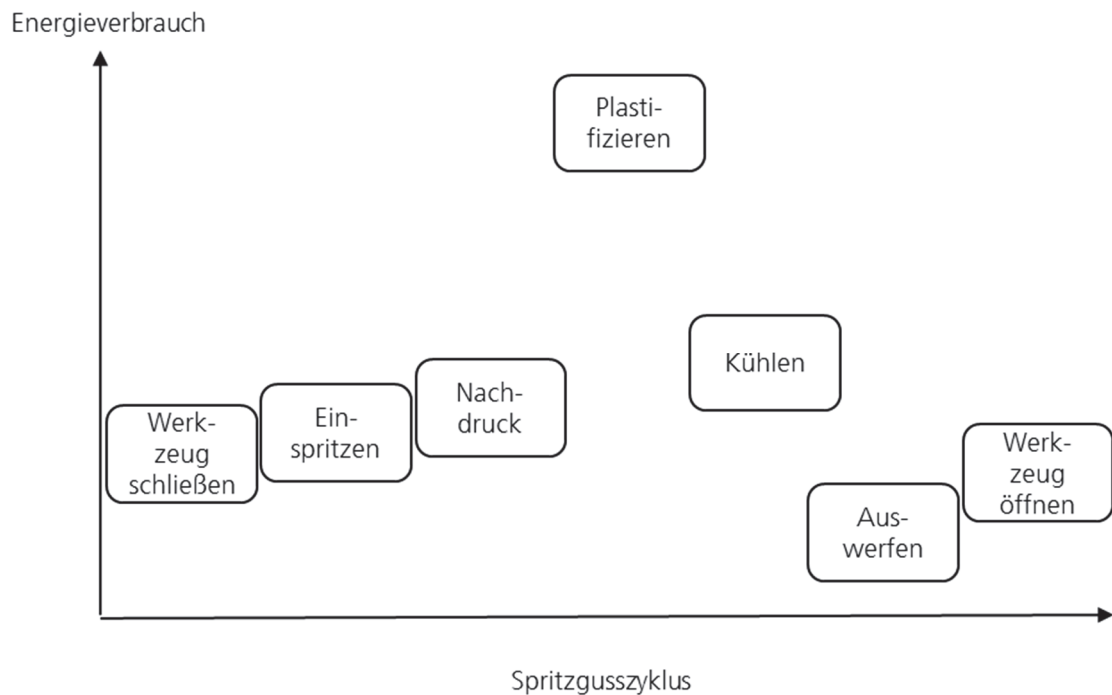


Bild 46: Komponentenbezogener Energieverbrauch eines Spritzgusszyklus

Der Spritzgießprozess eignet sich aus mehreren Gründen gut für eine Flexibilisierung des Energiebedarfs. Er ist, wie auch der Magnesiumdruckgießprozess, energieintensiv und besitzt träge thermische Komponenten. Zusätzlich ist der Gesamtprozess zum Großteil automatisiert. In diesem Zusammenhang wurden mögliche Flexibilisierungspotenziale analysiert:

- Energie ein- oder zwischenspeichern
 - Massetemperatur als Speicher ausnutzen
 - Temperatur des Werkzeugs ändern
 - Rückkühlsystem der Maschine als Speicher nutzen
- Prozessparameter anpassen
 - Zykluszeiten ändern
 - Maschinentemperatur ändern
 - Druckkräfte anpassen (Einspritzdruck, Staudruck, etc.)
- Organisatorische Maßnahmen
 - Pausenzeiten verschieben

- Schichtzeiten anpassen
- Maschinenbelegung anpassen
- Produktionsreihenfolge ändern

Auf Basis der bisherigen Beschreibungen lassen sich einige Anforderungen für die energetische Flexibilisierung ableiten, welche für eine Steuerung des Prozesses notwendig bzw. vorteilhaft sind (Tabelle 33).

Tabelle 33: Anforderungen an die Flexibilisierung der SGM

Anforderung 1:	Separate Ansteuerung von Teilkomponenten (motorische Komponenten, Heizsystem)
Anforderung 2:	Ansteuerung des Heizniveaus der thermischen Komponenten mit einem kontinuierlichen oder mehrstufig diskreten Signal

Um eine gleichmäßige und hohe Prozessqualität zu gewährleisten, wird das Kunststoffgranulat vor dem Spritzgießen getrocknet. Dabei wird in einem Trockner die Luft auf ein definiertes Temperaturniveau erwärmt und gehalten bis das Granulat seine gewünschte Restfeuchte erreicht.

Auch der Trocknungsprozess eignet sich aus mehreren Gründen gut für eine Flexibilisierung des Energiebedarfs. Dabei kann dieser als thermischer Speicher betrachtet werden. Der Prozess ist automatisiert. In diesem Zusammenhang wurden mögliche Flexibilisierungspotenziale analysiert:

- Energie ein- oder zwischenspeichern
 - Trockner als Speicher ausnutzen
- Prozessparameter anpassen
 - Zykluszeiten ändern

Auf Basis der bisherigen Beschreibungen lassen sich folgende Anforderungen für die energetische Flexibilisierung ableiten (Tabelle 34):

Tabelle 34: Anforderungen an die Flexibilisierung des Trockners

Anforderung 1:	Separate Ansteuerung von Teilkomponenten (motorisch Komponenten, Heizsystem)
Anforderung 2:	Ansteuerung des Heizniveaus der thermischen Komponenten mit einem kontinuierlichen oder mehrstufig diskreten Signal

6.3.2 Systemmodell

Ausgehend von den Voraussetzungen des Energiemarkts, der Kommunikationstechnologie, der PPS sowie der Prozessanalyse einer Spritzgießproduktion wurde ein Systemmodell aufgebaut, welches der entwickelten energieflexiblen Produktionssteuerung zugrunde liegt (Bild 47). Es werden fünf Prozessschritte simuliert. Diese umfassen den Trocknungsprozess des Kunststoffgranulats, den Spritzgießprozess, das Vorbehandeln und Lackierung sowie eine abschließende Montage. Die vier parallel geschalteten SGM werden als DC-Netz simuliert.

Das Energieverteilungsnetz wird auf Basis des Ersatzschaltbildes modelliert, wobei jede Maschine anhand ihrer Impedanz abgebildet wird und die Busspannung misst (Bild 48). In einem stabilen Netzbetrieb werden Angebot und Nachfrage in Abhängigkeit der Lastimpedanz der SGM und der Innenimpedanzen der Quelle ausgeglichen. Zusätzlich stellt das Spannungsniveau im DC-Bus die Verfügbarkeit von Energie im Netz dar. Je höher das Spannungsniveau ist, desto mehr Energie steht zur Verfügung. Die Einspeisung wird als Active Frontend mit einer internen Impedanz und einer internen idealen Spannungsquelle modelliert. Es wird davon ausgegangen, dass der interne Spannungspegel auf einen bestimmten Wert festgelegt ist. Da die DC-Bus-Spannung umgekehrt proportional zum Strom und zur Innenimpedanz ist, steigt der Spannungsabfall über den Innenwiderstand, wenn der Stromfluss aus dem Netz steigt. Ein kommunikationsloses Steuerschema, das nur die Spannung verwendet, ist eingerichtet. Bei steigenden Energiepreisen im externen Netz gibt das Active Frontend Informationen über eine geringere Energieverfügbarkeit durch Absenken des Spannungsniveaus an den DC-Bus weiter.

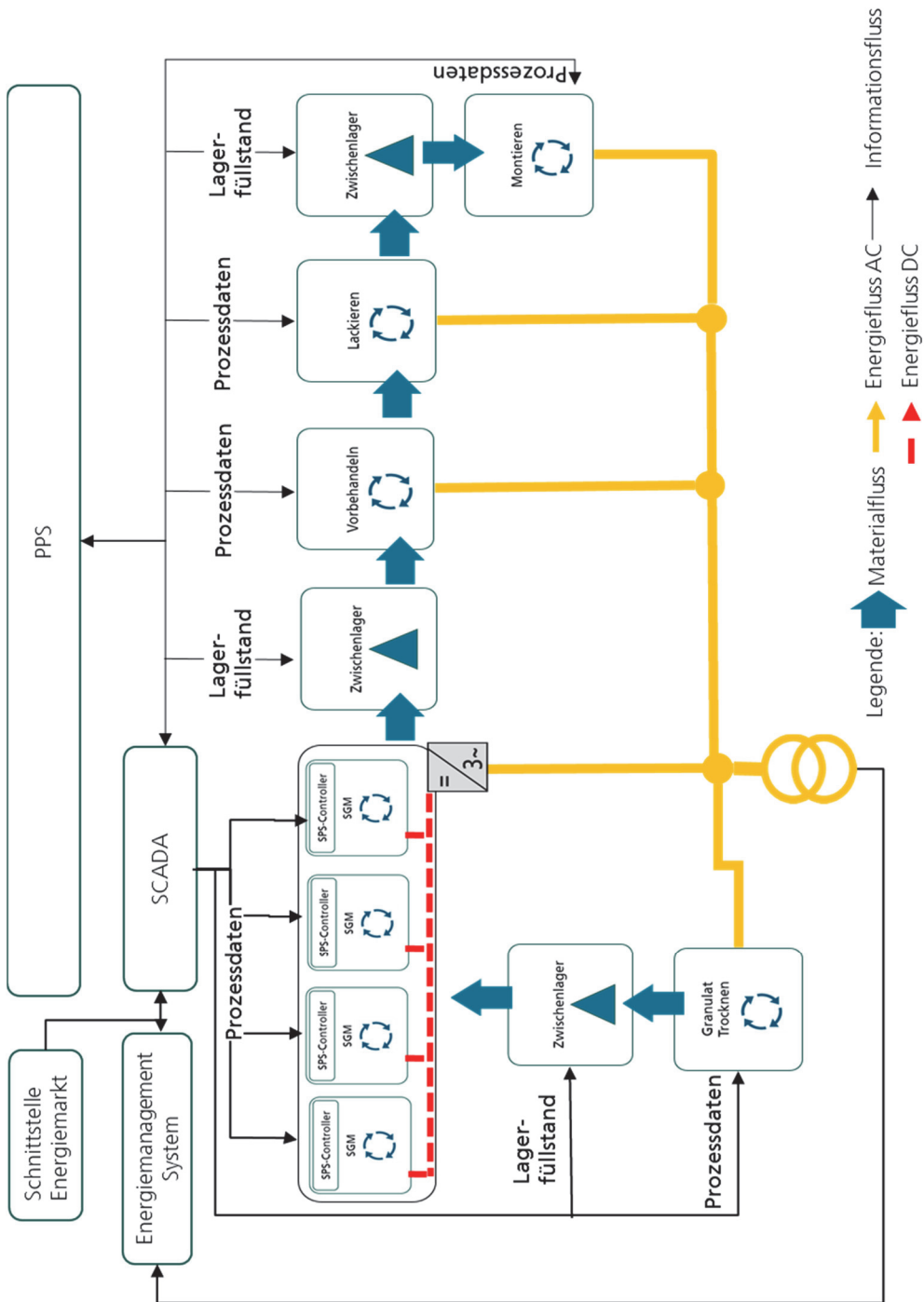


Bild 47: Systematischer Aufbau des Simulationsmodells des Spritzgussproduktionssystems

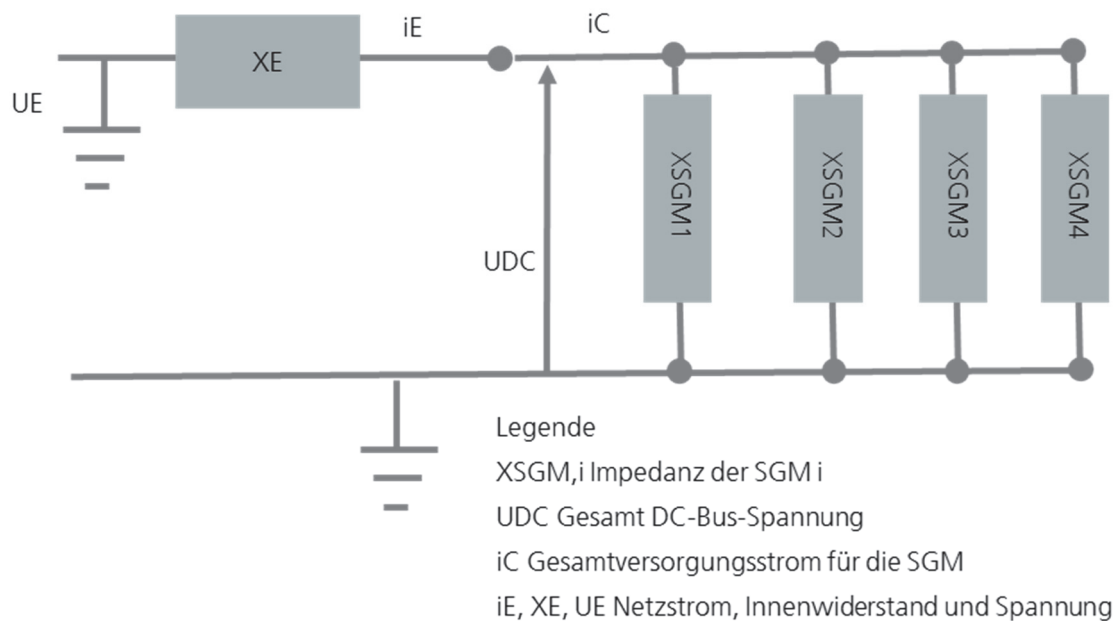


Bild 48: Ersatzschaltbild des DC-Netzes der SGM

Über das PPS-System werden Auftragsdaten generiert. Die Reihenfolgebildung erfolgt basierend auf der Schlupfzeitregel. Die Auftragsfreigabe erfolgt dezentral durch die Maschinen. Vorausgesetzt wird eine korrekte Produktionsbedarfsplanung von Material und Ressourcen. Eine weitere Voraussetzung für Flexibilisierung ist die Entkopplung der Prozesse durch ein Zwischenlager. Die Füllstände der Lager sowie aktuelle Prozessdaten der Maschinen werden elektronisch eingelesen.

Das Energiemanagement-System erfasst über eine Messstelle an den Transformatoren den Leistungsbezug der gesamten Fabrik. Eine Schnittstelle mit dem SCADA-System erlaubt eine Zuweisung des gemessenen Leistungsbezugs zu einzelnen Produktgruppen und Maschinen, welche in einer Datenbank hinterlegt werden.

Das SCADA-System stellt die Schnittstelle zum Energiemarkt dar und steht in einem regelmäßigen Informationsaustausch mit den einzelnen Maschinen und den weiteren Datenbanken des Unternehmens. Es überwacht zusätzlich die Gesamtlast der Fabrik. Der aktuelle Strompreis und, falls vorhanden, die vom Netzbetreiber angefragte Regelleistung werden über das Internet an das SCADA-System übermittelt.

Es sollen sowohl die SGMs als auch die Granulattrocknungsanlage energetisch flexibilisiert werden. Der Strompreis, auf dessen Grundlage der dezentrale Algorithmus auf dem SPS-Controller der Maschine den Produktionsdruck ermittelt, wird über einen Bus an diese Maschinen kommuniziert.

Über das PPS-System kann manuell festgelegt werden, welche Maschinen flexibel gefahren werden dürfen. Dadurch können durch den Algorithmus nicht erfasste Faktoren (z.B. kurzfristige Prozessprobleme, ungeplante Mitarbeiterausfälle) berücksichtigt und besonders kritische Prozesse von der energieflexiblen Regelung ausgenommen werden. Ist eine Maschine hiervon betroffen, wird ihr Produktionsdruck auf ein Maximum gesetzt.

6.3.3 *Systemzustände*

Die Systemzustände ergeben sich durch die sequenzielle Ansteuerung der einzelnen Prozesskomponenten. Jedem Zustand wird ein charakteristischer und für die Dauer des Systemzustands zeitabhängiger Leistungsbezug zugeordnet (Bild 49).

Die Zustände können in zwei Klassen unterteilt werden. Auf der einen Seite die Klasse „Stillstand“, in welcher keine Teile produziert werden. Zustand 0 entspricht dem vollständigen Ruhezustand des gesamten Prozesses, alle Komponenten sind inaktiv. Von diesem Zustand werden sequenziell die thermischen Geräte gestartet. Zustand 1.1 beschreibt das Aufheizen auf Betriebstemperatur. Zustand 1.2 steht für das separate Anfahren der motorischen Leistung. In Zustand 3 ist die Maschine betriebsbereit. Zustand 4 entspricht der Produktion von Teilen. Zustand 2 entspricht dem Zustand Standby-by. Der motorische Verbrauch wird heruntergefahren und die Heizleistung auf ein Minimum reduziert.

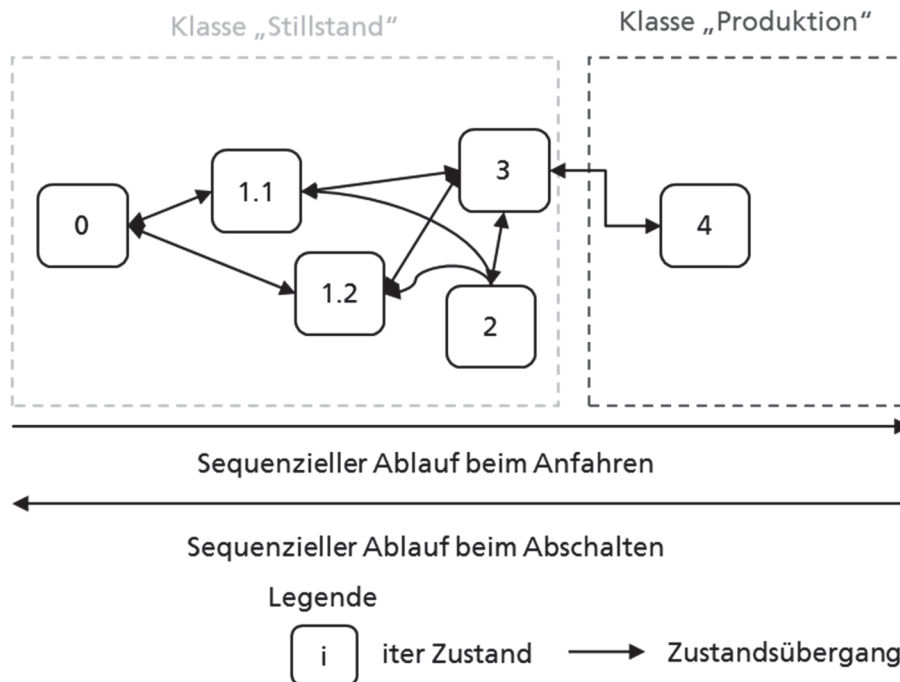


Bild 49: Betrachtete Systemzustände der SGM

Der Übergang zwischen den zwei Klassen „Stillstand“ und „Produktion“ (Übergang zwischen Zustand 2 zu 3 zu 4) soll im Folgenden durch das Entscheidungskriterium Produktionsdruck P_d geregelt werden. Zustand 3 besitzt dabei weder eine minimale noch eine maximale Verweilzeit, da keine Vorlaufzeit benötigt wird und prinzipiell sofort wieder in einen anderen Zustand gewechselt werden kann. Die SGM darf außerdem theoretisch unbegrenzt lange in Betrieb bleiben. Dabei werden für die Systemzustände unterschiedliche Leistungsniveaus identifiziert (Tabelle 35).

Tabelle 35: Durchschnittliche Leistungsniveaus in Abhängigkeit der Systemzustände der SGM

<i>Parameter in AnyLogic</i>	<i>Niveau</i>	<i>Leistung</i>
Leistung_Aufheizen	PAufheizen	35 kW
Leistung_Produktion	PProduktion	45 kW
Leistung_Motorenanfahren	PAnfahren	20 kW
Leistung_Stand-by	PStandby	10 kW

Die Leistungsniveaus werden über den Betrachtungszeitraum gemittelt. Kurzzeitig können die Leistungsniveaus abweichen. Dies ist jedoch für die energetische Betrachtung der Flexibilitätsanalyse nicht von Bedeutung.

Für den Trocknungsprozess wird zwischen den Betriebszuständen Stillstand und Produktion unterschieden (Bild 50). Auch hier entspricht der Zustand 0 dem vollständigen Ruhezustand des gesamten Prozesses, alle Komponenten sind inaktiv. Zustand 1 entspricht dem Trocknen von Granulat. Dabei werden für diesen Systemzustand Produktion ein Leistungsniveau von 20 kW identifiziert.

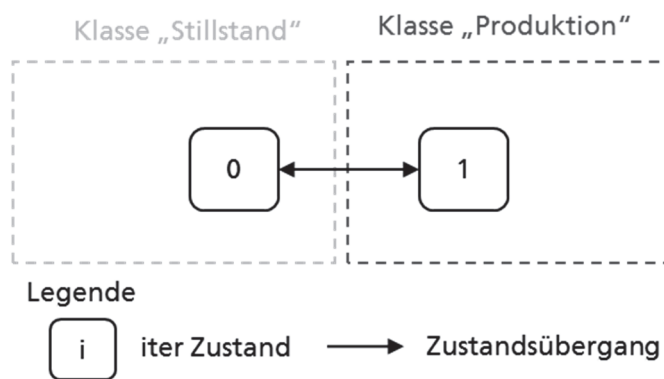


Bild 50: Betrachtete Systemzustände des Trocknungsprozesses

6.3.4 Szenariobildung und Ergebnisbewertung

In diesem Kapitel wird untersucht, welche Auswirkungen die entwickelte energieflexible Regelung des Produktionsprozesses hat und welche Einsparungen an Energiekosten realisiert werden können. Weiterhin wird die Sensibilität dieser Zielgröße zu fertigungsspezifischen Gegebenheiten geprüft.

6.3.4.1 Basisszenario Spritzguss

Das Basisszenario des Spritzgussunternehmens wird wie folgt definiert:

Es wird eine Fertigungslinie simuliert. Es sind drei repräsentative Fertigungsaufträge zu bearbeiten (Tabelle 36).

Tabelle 36: Untersuchte Fertigungsaufträge der Spritzgussproduktion

<i>Auftrag</i>	<i>Liefertermin</i>	<i>Volumen</i>
I	Arbeitstag 5	24000 Stück
II	Arbeitstag 10	24000 Stück
III	Arbeitstag 22	57500 Stück

Die Produktion läuft an Werktagen während allen drei Schichten und steht am Wochenende still. Pro Schicht werden im Schnitt 300 kg Kunststoffgranulat verarbeitet. Der Trockner hat ein Volumen von 100 kg bei einer Prozesszeit von einer Stunde. Das Trockenlager besitzt ein Volumen von 300 kg. Das minimale Lagervolumen liegt bei 100 kg. Das Zwischenlager hat eine Lagerkapazität von 600 Teilen, aus dem jede Stunde 200 Teile dem Lackierprozess zugeführt werden. Die Mindestbetriebsdauer der SGM wurde auf zwei Stunden festgelegt. Der Mindestbestand des Lagers liegt bei 300 Stück, um eine sichere Versorgung der Lackieranlage zu gewährleisten. Die Stückzeit liegt bei 60 Sekunden. Die Fertigung ist damit zu stark ausgelastet. Der Energiereferenzpreis wird auf Basis des Mittelwertes des gleichen Zeitraums des Vorjahres auf 155€/MWh festgelegt. Die Intervallgrenze E_{min} wird entsprechend der Standardabweichung auf 134 €/MWh festgelegt.

Zunächst soll die Beeinflussung des Betriebsverhaltens der Produktionsprozesse qualitativ veranschaulicht und untersucht werden. Dafür wurde beispielhaft ein Betriebsmonat simuliert. Die folgenden Grafiken zeigen die Ergebnisse der in AnyLogic untersuchten Modellparameter. Bild 51 zeigt den Strompreisverlauf für ein Intervall vom 528 Stunden (22 Arbeitstage), der auf Basis der Intraday EEX-Preise ermittelt wurde. Zusätzlich ist die in Abhängigkeit der Energiepreise transformierte DC Busspannung dargestellt. Eine detaillierte Aufschlüsselung findet sich in Anhang C.

Auf Basis des Strompreises und der Eingangsdaten des Basisszenarios wird im ersten Schritt der zeitliche Verlauf der energetischen Komponente $E(t)$ und die logistische

Komponente $L(t)$ für den Trockner und die SGM berechnet (Bild 52, Bild 53). Betrachtet man die logistische Komponente des Trockners, so können sehr deutlich die Produktionszyklen identifiziert werden.

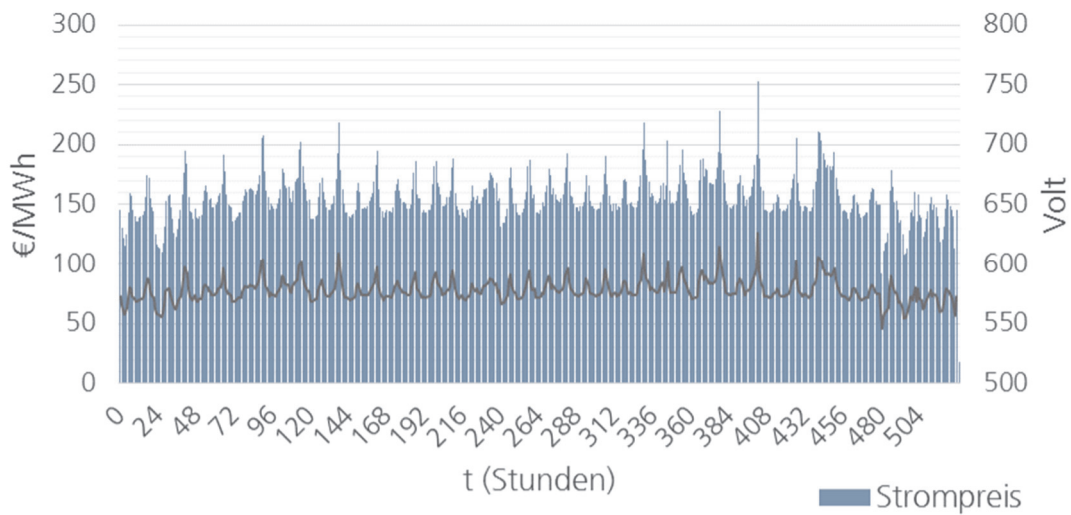


Bild 51: Nettostrompreisverlauf und DC Busspannung für den Simulationszeitraum

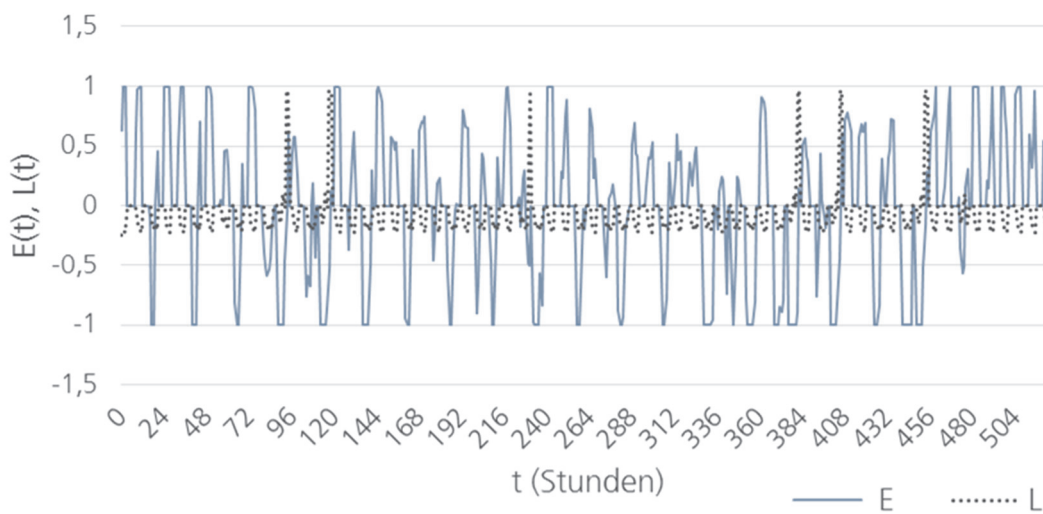


Bild 52: Verlauf der logistischen und energetischen Komponente des Trockners

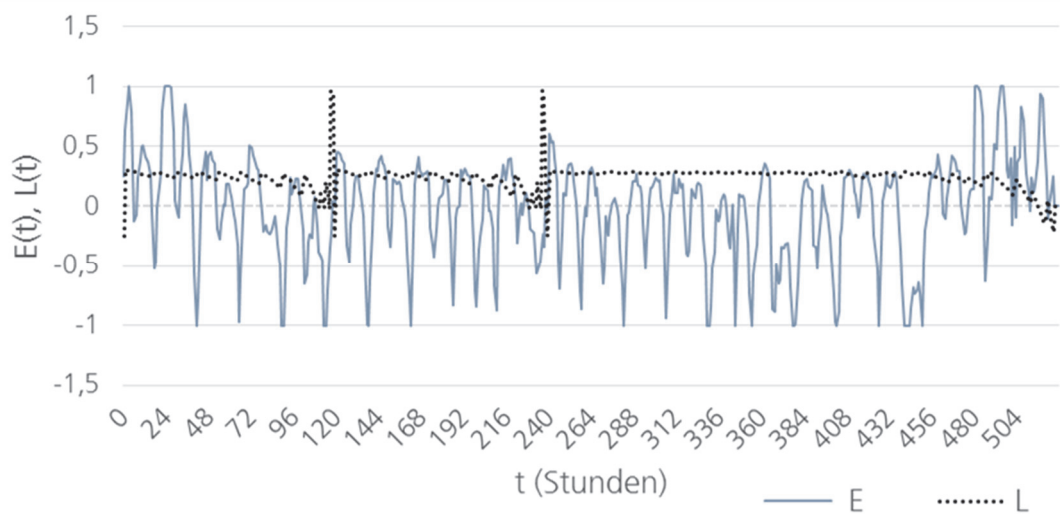


Bild 53: Verlauf der logistischen und energetischen Komponente der SGM

Betrachtet man die logistische Komponente SGM, so sind auch hier die Fertigungsaufträge mit deren Abschlüssen bei 120, 240 und 528 Stunden zu erkennen. Die drastischen Anstiege der logistischen Komponente zum Ende des ersten und zweiten Fertigungsauftrags sind dabei auf den zunehmenden Zeitdruck in Abhängigkeit des Fertigstellungstermins zurückzuführen.

Um den Verlauf der energetischen Komponente besser bewerten zu können, wird diese in Abhängigkeit des Energiepreisverlaufs für den Trockner und in Abhängigkeit der DC Busspannung dargestellt (Bild 54, Bild 55). Dabei ist zu erkennen, dass sich die energetische Komponente diametral zum Energiepreis wie auch zur DC-Busspannung verhält.

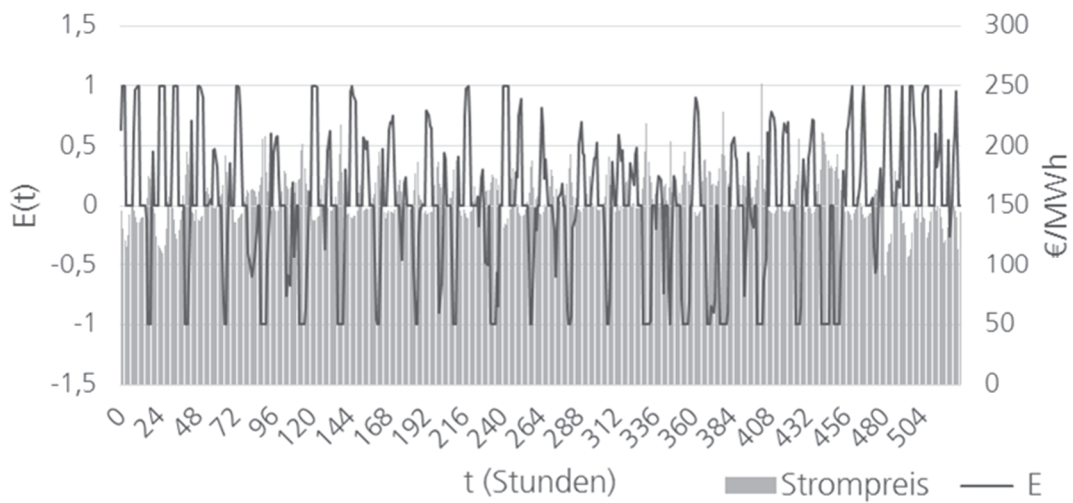


Bild 54: Verlauf der energetischen Komponente des Trockners in Abhängigkeit des Strompreises

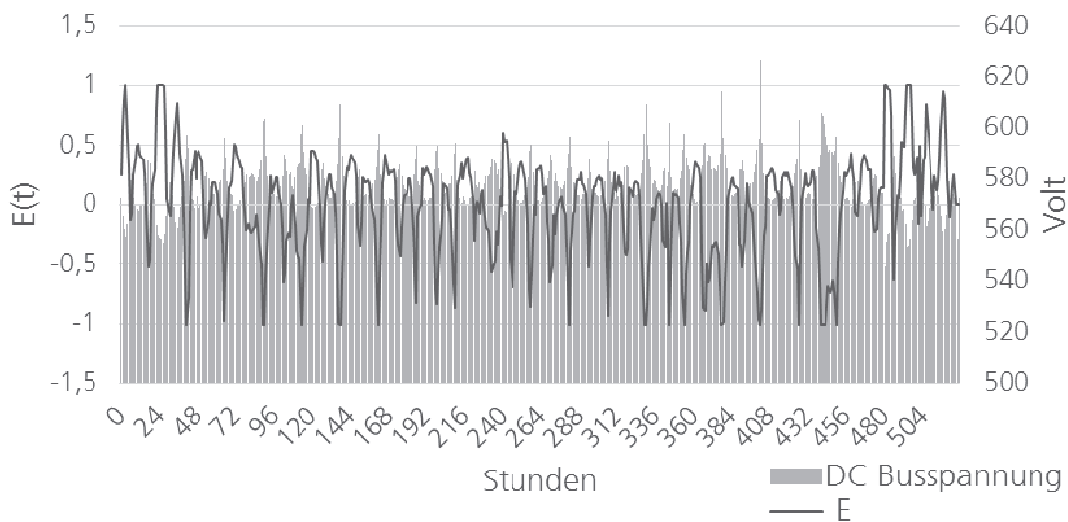


Bild 55: Verlauf der energetischen Komponente der SGM in Abhängigkeit der Busspannung

Aus den beiden Komponenten L und E wird schließlich der Produktionsdruck P_d berechnet, nach dem die Produktionszeiten der Maschine ausgerichtet werden (Bild 56, Bild 57).

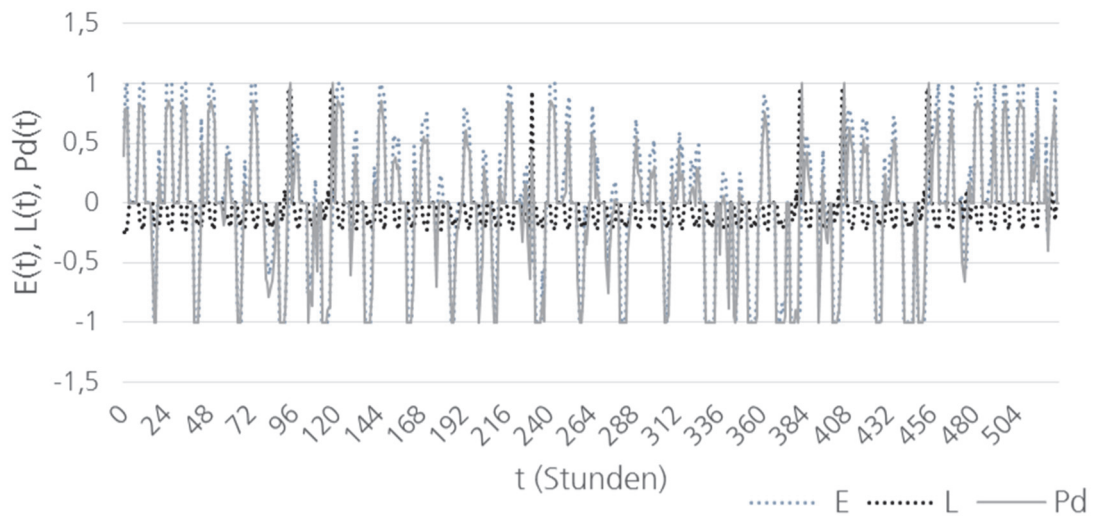


Bild 56: Verlauf des Produktionsdrucks des Trockners

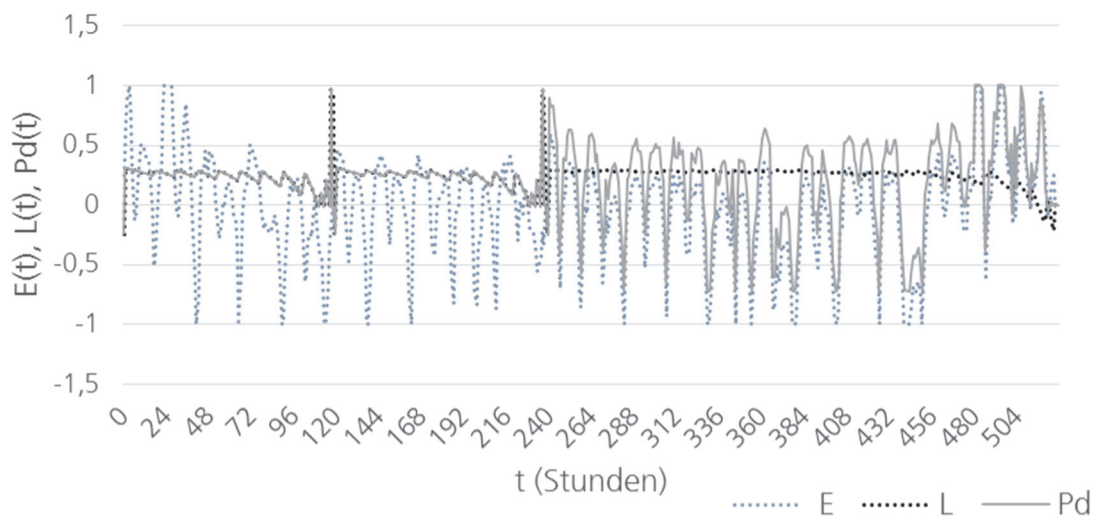


Bild 57: Verlauf des Produktionsdrucks der SGM

Dabei ist zu erkennen, dass der Verlauf von Pd sehr stark dem Verlauf der energetischen Komponente folgt, aber durch die logistische Komponente und im Falle des Trockners abgeschwächt wird. Im Falle der SGM findet aufgrund der höheren Auslastung eine positive Verstärkung statt.

Im nächsten Schritt wird nun der Betriebszustand der Maschine in Abhängigkeit des Produktionsdrucks betrachtet (Bild 58, Bild 59). Dabei ist zu erkennen, dass das Schaltverhalten des Trockners die Vorgaben des Produktionsdrucks erfüllt. Für die

SGM ist zu erkennen, dass, aufgrund der hohen Auslastung, eine energetische Optimierung der Produktion nur in den wenigsten Fällen möglich ist.

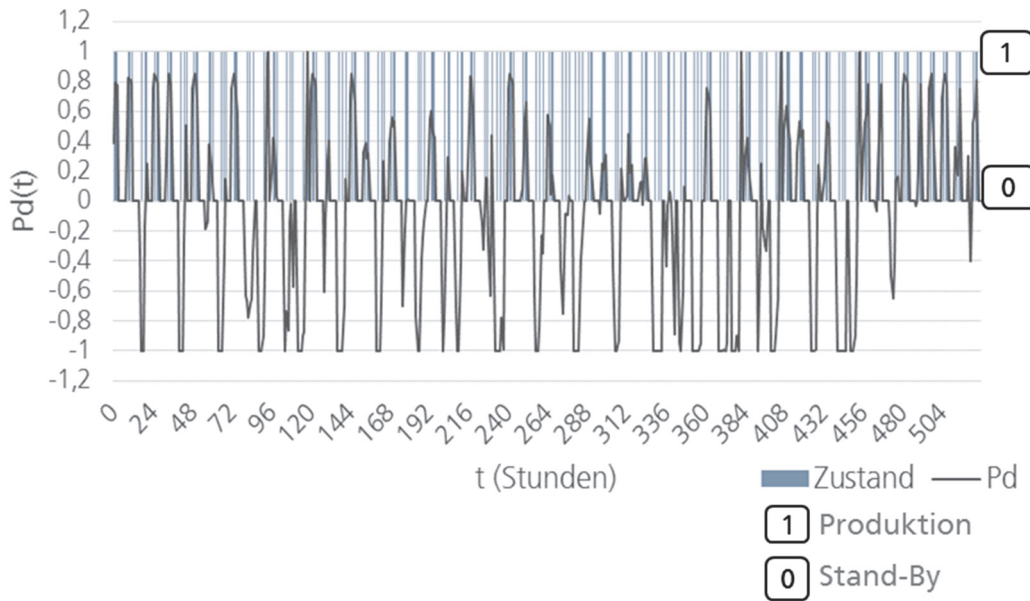


Bild 58: Schaltverhalten des Trockners in Abhängigkeit des Produktionsdrucks

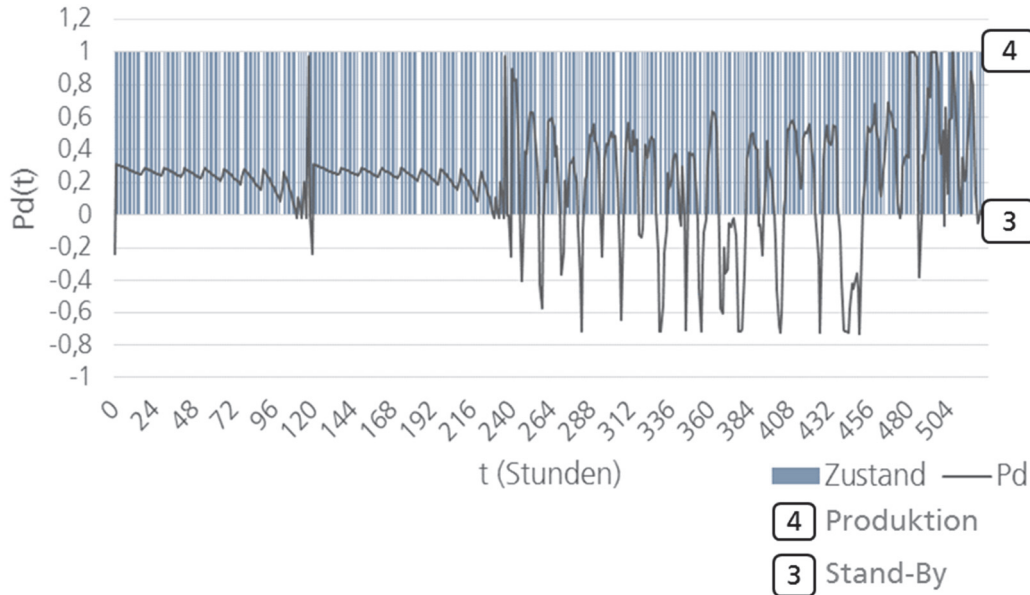


Bild 59: Schaltverhalten der SGM in Abhängigkeit des Produktionsdrucks

Da der Lagerfüllgrad zusätzlich den Betriebszustand der SGM und des Trockners beeinflusst, werden im nächsten Schritt der Lagerfüllgrad und der Produktionsdruck in Abhängigkeit der Zeit untersucht (Bild 60, Bild 61). Dabei zeigt sich insbesondere, dass aufgrund der Stückzeitdifferenz zwischen SGM und dem Lackierprozess sowie der hohen Auslastung das Lager am Rand seiner Kapazitätsgrenze betrieben wird.

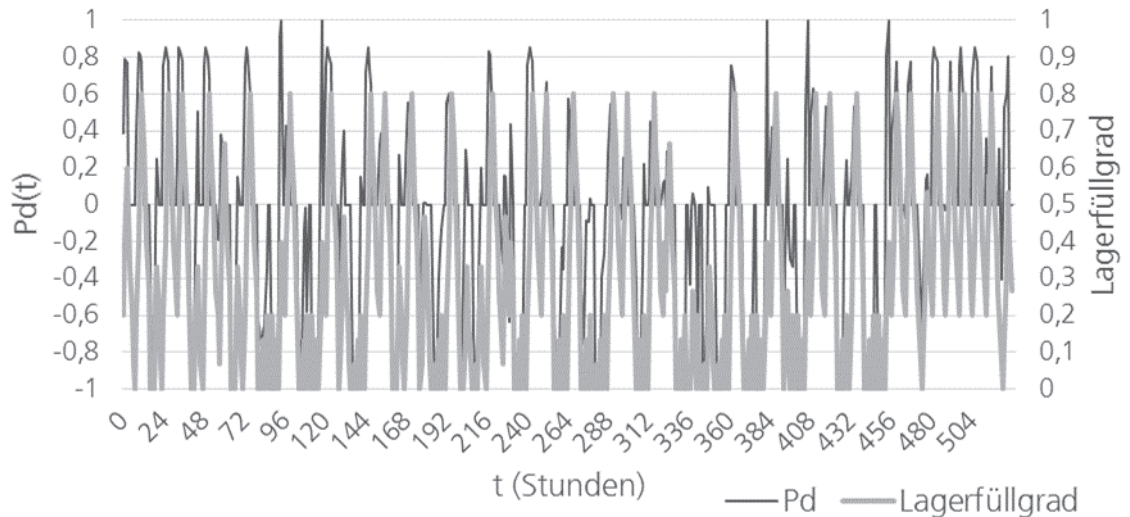


Bild 60: Verlauf des Lagerfüllgrads nach dem Trockner

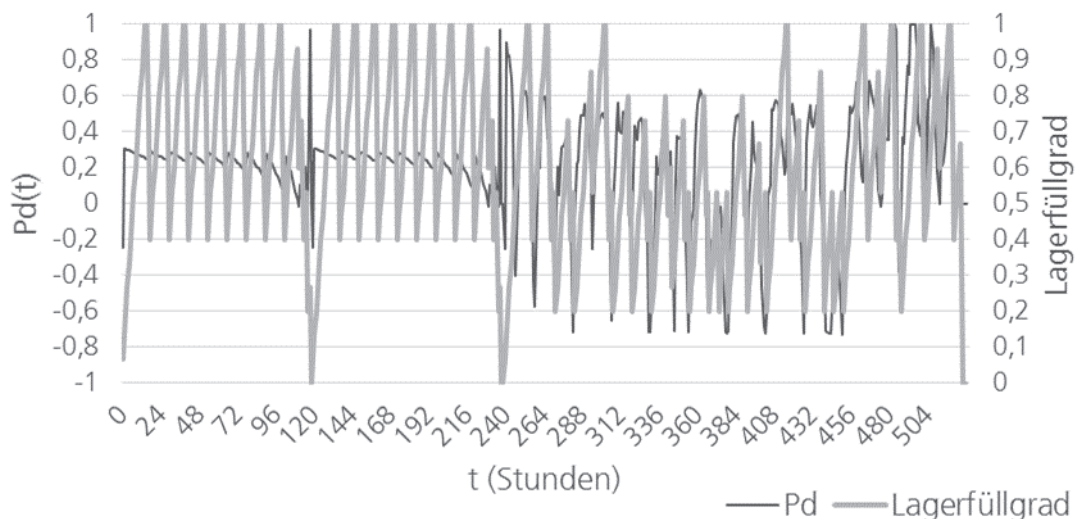


Bild 61: Verlauf des Lagerfüllgrads nach den SGM

Zur Bewertung der Ergebnisse werden die Einsparungen durch einen energieflexiblen Betrieb in Abhängigkeit des Normalbetriebs betrachtet, bei dem die energetische Komponente mit dem Faktor Null gewichtet wird (Bild 62, Bild 63).

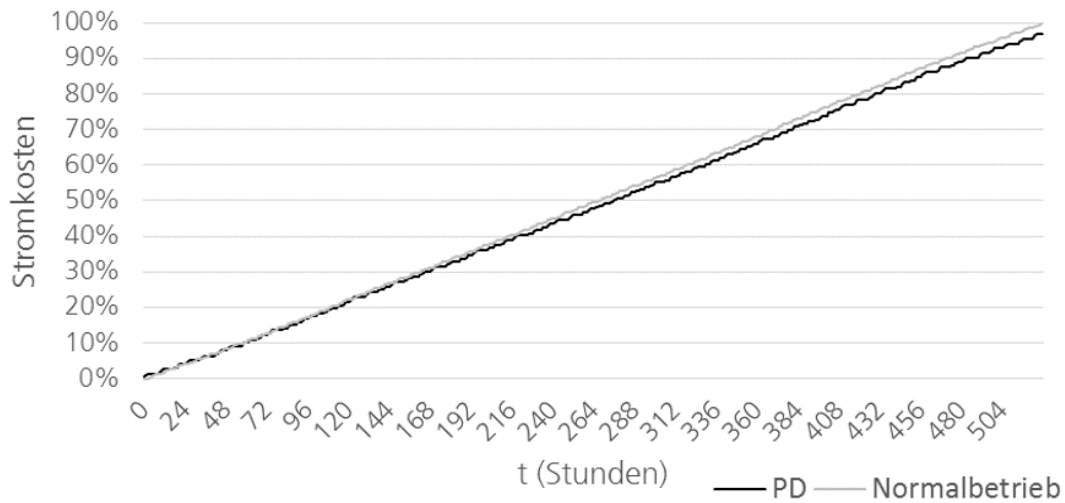


Bild 62: Stromkostenverlauf des Trockners in Abhängigkeit des Normalbetriebs

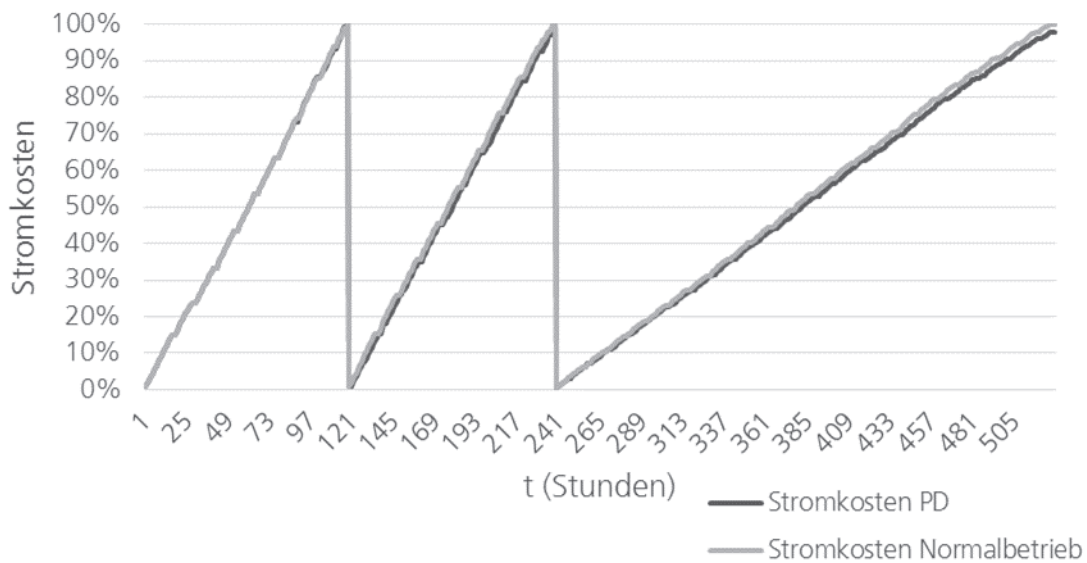


Bild 63: Stromkostenverlauf der SGM in Abhängigkeit des Normalbetriebs

Gemessen am Normalbetrieb kann für den Trockner eine Verminderung der Energiekosten von 2% durch einen energieflexiblen Betrieb erreicht werden. Für die SGM belaufen sich die gesamten Einsparungen auf unter zwei Prozent, wobei bei den ersten beiden Aufträgen Einsparungen von unter einem Prozent erreicht werden. Dies liegt an der geringen Stückzeitdifferenz zwischen den SGMs und dem Lackierprozess sowie der grundsätzlich hohen Auslastung der jeweiligen Prozesse. Betrachtet man die Schaltfrequenz der SGM, so wird klar, dass in diesem Fall kein weiteres energetisches Optimierungspotenzial zu erschließen ist. Von einer energetischen Flexibilisierung der SGMs der betrachteten Fertigungslinie muss daher an dieser Stelle abgeraten werden.

6.3.4.2 Parametervariation

Im nächsten Schritt wird der Einfluss der Szenariodaten auf die Zielgröße Energiekosten untersucht. Zu diesem Zweck werden die exogenen Variablen, also die Eingangsgrößen, in einem definierten Intervall und in Abhängigkeit einer Schrittgröße variiert (Tabelle 37).

Tabelle 37: Parametervariation des Basisszenarios der Spritzgießproduktion

<i>Exogene Variablen</i>	<i>Untere Intervallgrenze</i>	<i>Obere Intervallgrenze</i>	<i>Zähler</i>
Lagervolumen (kg)	300	900	getrennte Modellbetrachtung
Mindestbetriebsdauer (Stunden)	1	3	2
Mindestlagerbestand (kg)	20	100	20
E-Ref (€/MWh)	140,9	166,1	2
E _{min} (€/MWh)	117	143	5
Gewichtung kE [-]	1	5	1

Das Lagervolumen soll an dieser Stelle gesondert betrachtet werden. Es wird zwischen einem Volumen von 300 kg und 900 kg unterschieden. Mit einem Volumen von 900 kg kann Granulat für einen Produktionstag vorgetrocknet werden. Dies bedarf jedoch baulicher und organisatorischer Maßnahmen. Aus diesem Grund wird eine energetische Flexibilisierung mit bestehender Infrastruktur sowie mit veränderter Infrastruktur getrennt betrachtet.

Bezüglich des flexibilisierten Kernprozesses wird die Mindestbetriebsdauer im Intervall von ein bis drei Stunden betrachtet. Die Stückzeit der SGM sowie des Trockners werden nicht verändert. Der Mindestbestand des Lagers wird schrittweise von 100 kg auf 20 kg reduziert, was den zu flexibilisierenden Lagerbestand beim minimalen Lagervolumen von 300 kg auf 280 kg reduziert. Der Energiereferenzpreis sowie das untere Limit im Energiereferenzintervall werden jeweils um 10% des Basiswertes variiert. Die Gewichtung der energetischen Komponente wird bis zum Faktor fünf erhöht.

Insgesamt werden somit jeweils 2167 Szenarien untersucht. Dabei werden die linearen Hauptwirkungen sowie zweifache Wechselwirkungen betrachtet. Da dreifache Wechselwirkungen (und höhere Wechselwirkungen) in aller Regel sehr geringe Effekte gegenüber dem Vertrauensbereich haben, werden sie an dieser Stelle vernachlässigt. Die Modellgüte wird auf Basis des Bestimmtheitsmaßes und des multiplen Korrelationskoeffizienten als jeweils hoch eingeschätzt (Tabelle 38). Dies gilt auch für die Modellsignifikanz, was bedeutet, dass die multiplen Regressionsmodelle einen statistisch signifikanten Erklärungsbeitrag leisten.

Tabelle 38: Regressionsstatistik

Lager- volumen	Multipler Korrelationskoeffizient	Bestimmtheitsmaß R^2	Signifikanz Prüfgröße $F > f_{krit}$	Szenarien
300 kg	0,967326049	0,970482256	123,4 >3,62134E-50	2167
900 kg	0,967326032	0,970482389	123,4 >3,62158E-50	2167

Betrachtet man die normierten Regressionskoeffizienten, so wird deutlich, dass im Wesentlichen drei Eingangsgrößen das Maschinenveralten dominieren (Tabelle 39). Dies sind die Mindestbetriebsdauer, der Mindestlagerbestand und der Energiereferenzpreis E_{ref} . Auf Ebene der zweifachen Wechselwirkungen zeigt sich, dass eine Änderung des Mindestlagerbestands und Energiereferenzpreis ebenfalls eine signifikante Wirkung auf die Zielgröße zeigen.

Für ein Lagervolumen von 300 kg ist nicht mehr E_{ref} der dominante Einfluss, sondern die Mindestbetriebsdauer. Bei einer Zunahme des Lagervolumens auf 900 kg erhöht sich das zu flexibilisierende Zeitintervall von acht auf 24 Stunden. Damit erhöht sich auch in Abhängigkeit des Lagerabgangs die Flexibilität. Dies macht sich in einer drastischen Reduktion des Einflusses der Mindestbetriebsdauer sowie in einer Zunahme des Korrelationskoeffizientens für E_{ref} bemerkbar.

Tabelle 39: Normierte Regressionskoeffizienten

<i>Exogene Variablen</i>	<i>Codierung</i>	<i>Korrelationskoeffizient normiert Lager 300 kg</i>	<i>Korrelationskoeffizient normiert Lager 900 kg</i>
Lagervolumen	A	0,000	0,000
Mindest-betriebs- dauer	B	-0,789	-0,322
Mindest-lagerbe- stand	C	-0,431	-0,401
E_{ref}	D	-0,635	-0,726
E_{min}	E	0,050	0,050
Gewichtung kE	F	0,000	0,000
	A_B	-0,000	-0,000
	A_C	0,013	0,012
	A_D	0,000	0,000
	A_E	0,049	0,056
	A_F	-0,043	-0,043
	B_C	-0,009	-0,009
	B_D	0,000	0,000
	B_E	-0,042	-0,042
	B_F	-0,032	-0,032
	C_D	-0,180	-0,150
	C_E	-0,030	-0,030
	C_F	-0,028	-0,026
	D_E	0,000	0,000
	D_F	0,000	0,000
	E_F	-0,030	-0,030

6.3.4.3 Sensitivitätsanalyse Energiereferenzpreis

Der Effekt des Energiereferenzpreises auf die energetische Komponente E und damit auf die Entscheidungsvariable kann als maßgeblich betrachtet werden.

Wie in Kapitel 5.4.2.2 erläutert, kann der Wert von E_{ref} auf unterschiedliche Weise festgelegt werden. Im Folgenden wurde die Ermittlung der Größe aus historischen Energiepreisen verwendet, zum einen aus dem Mittelwert des Vorjahres, zum anderen aus dem mittleren Strompreis des Vorjahresmonats.

Wie auch für das Magnesiumdruckgussbeispiel wurden für die Untersuchung der Auswirkung auf die Zielgröße der Energiekosten drei einzelne Monate des Jahres 2018 simuliert. Die restlichen Eingangsvariablen wurden gegenüber dem Basisszenario nicht geändert. E_{ref} wurde jeweils aus dem Durchschnittspreis des Jahres 2017 („Jahresreferenzpreis“) bzw. des gleichen Monats aus dem Jahr 2017 („Monatsreferenzpreis“) berechnet. Durch die Wahl eines kleineren Zeitraums soll E_{ref} eventuelle saisonale Abhängigkeiten des Strompreises (z.B. durch stärkere Sonneneinstrahlung im Sommer) besser abbilden und zu höheren Einsparungen an Energiekosten führen.

In Tabelle 40 sind die gewählten Monate, die entsprechenden Monate des Vorjahres und das gesamte Vorjahr mit den durchschnittlichen Börsenpreisen aufgelistet. Die Durchschnittspreise des Vorjahres bzw. Vorjahresmonats wurden entsprechend dem Energiereferenzpreis E_{ref} zugewiesen. In der rechten Spalte sind die Charakteristika der Energiebepreisung in den einzelnen Zeiträumen genannt. Durch die Wahl verschiedener Monate wurden unterschiedliche saisonale Zeiträume abgebildet, in denen die Einspeisung erneuerbarer Energien unterschiedlich stark fluktuiert und zu unterschiedlicher Volatilität des Strompreises an der Börse führen.

Tabelle 40: Datenbasis zur Energiereferenzpreisvariation (Nettopreise)

<i>Zeitraum</i>	<i>Ø-Preis [€/MWh]</i>	<i>Charakteristika</i>
März '18	155,4	Gleiches Preisniveau wie im Vorjahresmonat und ähnlich wie im Vorjahr
März '17	155,5	
'17	156,6	
August '18	153,4	Höheres Preisniveau als im Vorjahresmonat und niedriger als im Vorjahr
August '17	150,4	
'17	156,6	
November '18	157,1	Niedrigeres Preisniveau als im Vorjahresmonat und ähnlich wie im Vorjahr
November '17	160,8	
'17	154,1	

Tendenziell gestalten sich die Ergebnisse sehr ähnlich zu den Untersuchungen für das Druckgießunternehmen. Im März sind die Einsparungen aufgrund der beinahe identischen Energiereferenzpreise in beiden Szenarien fast identisch. Im Monat August können durch Verwendung des Mittelwerts des Vorjahresmonats für E_{ref} höhere Einsparungen realisiert werden als bei Verwendung des Jahresdurchschnitts. Im November führt der Jahresreferenzpreis zu höheren Einsparungen. Grundsätzlich lassen sich durch die Verwendung des Monatsdurchschnittspreises geringfügig höhere Einsparungen erzielen. (Tabelle 41)

Tabelle 41: Energiekosteneinsparung durch Energiereferenzpreisvariation gegenüber dem Normalbetrieb des Trockners

<i>Monat</i>	<i>Jahresreferenzpreis</i>		<i>Monatsreferenzpreis</i>	
	300 kg	900 kg	300 kg	900 kg
März 2018	2,1 %	5,3 %	2,2 %	5,5 %
August 2018	1,3 %	4,1 %	3,6%	5,9 %
November 2018	2,9 %	6,1 %	1,5 %	4,4%
<i>Durchschnitt</i>	<i>2,10 %</i>	<i>5,17 %</i>	<i>2,63 %</i>	<i>5,27 %</i>

6.3.4.4 Sensitivitätsanalyse Mindestbetriebsdauer und Mindestlagerbestand

Neben dem Energiereferenzpreis beeinflussen auch die Mindestbetriebsdauer und der Mindestlagerbestand die Zielgröße Energiekosten. Für alle folgenden Untersuchungen wurde für E_{ref} der Durchschnittspreis des Vorjahres verwendet.

Zwischen den logistischen Parametern bestehen insofern Abhängigkeiten, da die Mindestbetriebsdauer den unteren Grenzwert der minimalen und maximalen Bestandsmenge beeinflusst. Das Lager muss ausreichen, um bei Stillstand der Maschine den folgenden Prozess zu versorgen. Weiterhin muss die während der Mindestbetriebsdauer angesammelte Menge an Produkten im Zwischenlager untergebracht werden können.

In Bild 64 wird der mögliche Lösungsraum der Sensibilitätsuntersuchung aufgespannt. Die Mindestbetriebsdauer wird zwischen ein und drei Stunden variiert. Der Mindestlagerbestand wird zwischen 20 kg und 100 kg variiert.

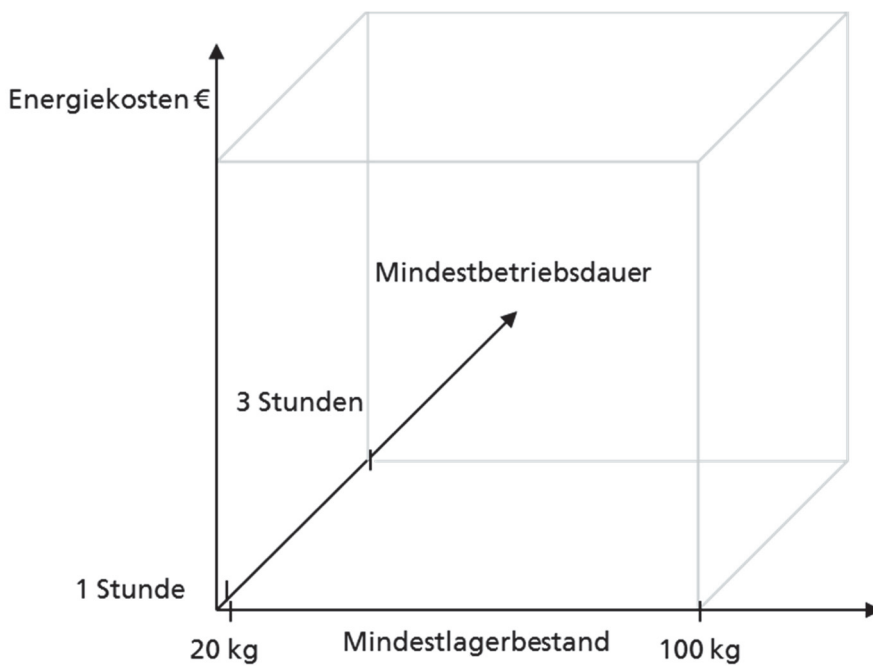


Bild 64: Lösungsraum für Mindestbetriebsdauer und Mindestlagerbestand des Trockners

Die Simulationen wurden unter Ceteris-paribus-Bedingungen durchgeführt; neben der Lagergröße und dem Mindestlagerbestand wurden keine weiteren Parameter des oben definierten Produktionsszenarios verändert. Die Simulation wurde für den Monat März 2018 durchgeführt. Tabelle 42 und Tabelle 43 zeigen die Simulationsergebnisse für die Kombinationen beider Parameter.

Tabelle 42: Energiekostensparnis für die Variation von Mindestbetriebsdauer und Mindestlagerbestand des Trockners (Lagervolumen 300 kg)

		Mindestbetriebsdauer [h]		
		1	2	3
Mindestlagerbestand [kg]	20	2,10%	1,59%	0,02%
	40	2,00%	1,58%	0,02%
	60	1,89%	1,50%	0,02%
	80	1,79%	1,43%	0,02%
	100	1,70%	1,36%	0,02%

Tabelle 43: Energiekostensparnis für die Variation von Mindestbetriebsdauer und Mindestlagerbestand des Trockners (Lagervolumen 900 kg)

		Mindestbetriebsdauer [h]		
		1	2	3
Mindestlagerbestand [kg]	20	5,30%	5,00%	4,70%
	40	5,04%	4,76%	4,48%
	60	4,79%	4,51%	4,24%
	80	4,56%	4,33%	4,04%
	100	4,34%	4,08%	3,83%

Es zeigt sich der dramatische Einfluss der Mindestbetriebsdauer. Bei einer Mindestbetriebsdauer von drei Stunden hat der Mindestbestand des Lagers keinen Einfluss mehr und es findet keine energetische Optimierung mehr statt. Dies liegt daran, dass zu Beginn jeder Schicht der Mindestbestand des Lagers unterschritten wird und der Trocknungsprozess beginnt. Dieser läuft entsprechend der Mindestbetriebsdauer für drei Stunden und ist damit für die entsprechende Schicht abgeschlossen. Es kann also keine energetische Optimierung stattfinden. Dieser Effekt nimmt mit der Reduktion der Mindestbetriebsdauer und der Erweiterung des Optimierungszeitraumes auf einen Tag ab.

6.3.4.5 Sensitivitätsanalyse Mindestlagerbestand und Energiereferenzpreis

Um die zweifachen Wechselwirkungen zwischen einer Änderung des Mindestlagerbestands und des Energiereferenzpreises zu untersuchen, wird der mögliche Lösungsraum der Sensibilitätsuntersuchung aufgespannt (Bild 65). E_{ref} wird zwischen 133 €/MWh und 166 €/MWh variiert. Die untere Grenze des Mindestlagerbestands wird auf 20 kg und die obere Grenze auf 100 kg festgelegt.

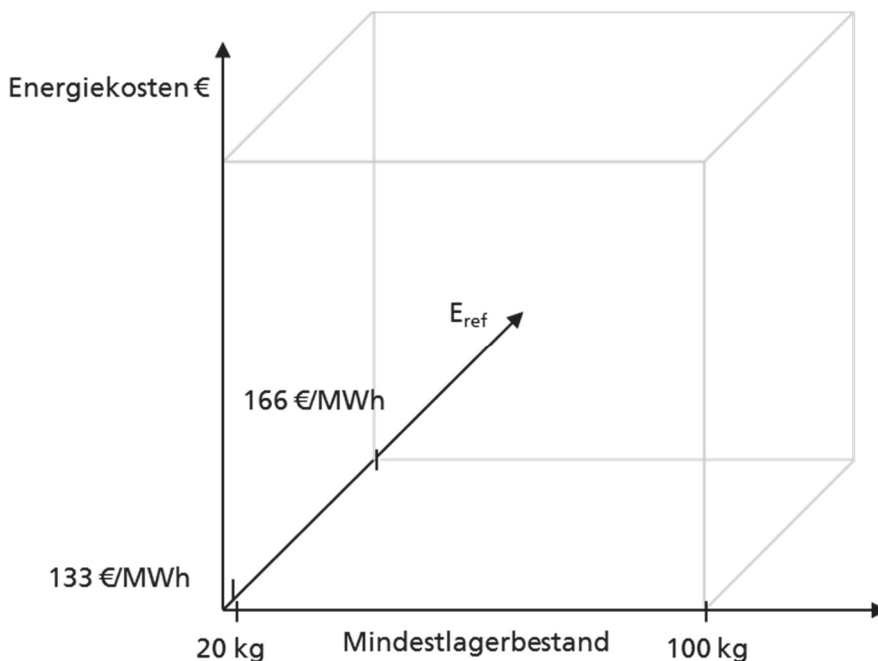


Bild 65: Lösungsraum für Mindestlagerbestand und Energiereferenzpreis des Trockners

Die Simulationen wurden unter Ceteris-paribus-Bedingungen durchgeführt, neben dem Mindestlagerbestand und der Mindestbetriebsdauer wurden keine weiteren Parameter des oben definierten Produktionsszenarios verändert. Die Simulation wurde für den Monat März 2018 durchgeführt. Bild 66 und Bild 67 zeigen die Simulationsergebnisse für die Kombinationen beider Parameter.

In Abhängigkeit des Mindestlagerbestandes und von E_{ref} kann jeweils ein definiertes Optimum identifiziert werden. Für beide Ausprägungen des Lagervolumens liegt dieses jeweils beim minimalen Mindestlagerbestand. Bei höherem Lagervolumen und damit höherem Flexibilitätspotenzial liegt das Optimum bei einem E_{ref} von 151 €/MWh bei niedrigerem Lagervolumen E_{ref} von 153 €/MWh. Für niedrigere Werte von E_{ref} wird der Betriebszustand zunehmend durch den Lagermindestbestand bestimmt und kann nicht mehr in Abhängigkeit der Energiepreise optimiert werden.

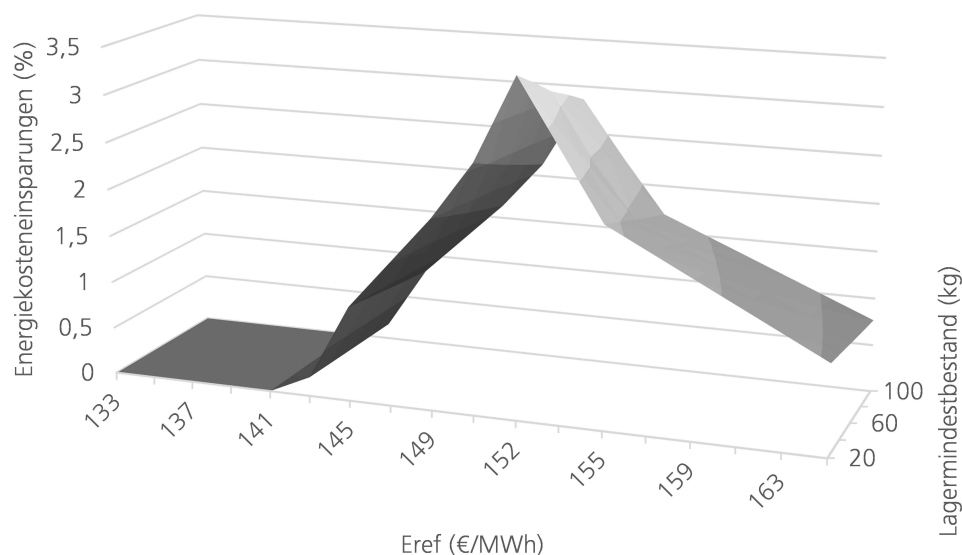


Bild 66: Energiekostenreduktion gegenüber Normalbetrieb in Abhängigkeit von Lagermindestbestand und Energiereferenzpreis (Ladevolumen 300 kg)

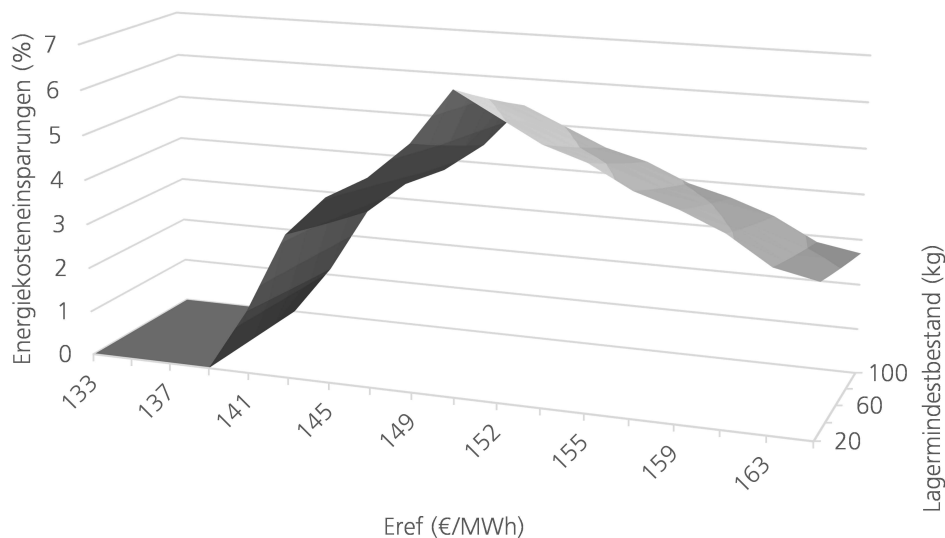


Bild 67: Energiekostenreduktion gegenüber Normalbetrieb in Abhängigkeit von Lagermindestbestand und Energiereferenzpreis (Ladevolumen 900 kg)

6.3.4.6 Parameteroptimierung und Ergebnisbewertung

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird eine optimierte Parametrierung der energieflexiblen Regelung für das Basisszenario vorgenommen. Vor dem Hintergrund des logistischen Zielsystems müssen dabei Durchlaufzeit, Termintreue, Auslastung und Bestände mit betrachtet werden.

Die Auslastung der Produktion wird nicht beeinflusst, da diese als feste Randbedingungen etabliert ist. Die Einhaltung der Termintreue wird über die logistische Komponente des Produktionsdrucks sichergestellt.

Parameteroptimierung für ein Lagervolumen von 300 kg

Die Mindestbetriebsdauer wird auf eine Stunde festgelegt. Zusätzlich wird E_{ref} von 155 €/kWh auf 153 €/kWh reduziert. Der minimale Lagerbestand wird zusätzlich

auf 20 kg reduziert. Dies führt zu einer Reduktion der Energiekosten von 3,5% gegenüber dem Normalbetrieb (Bild 68). Damit können Einsparungen in Höhe von 260 € bezogen auf ein Jahr erzielt werden.

Dabei erhöht sich die Durchlaufzeit im Mittel um 15% bezogen auf einen Zeitraum von acht Stunden. Der mittlere Lagerfüllgrad liegt 12% über dem Normalbetrieb, was einem mittleren Lagerfüllgrad von 30% und einer mittleren Bestandserhöhung von 10,8 kg entspricht. Legt man ein Effektivzinsintervall von 2% - 6% zugrunde, entstehen zusätzliche Lagerkosten in Höhe von 24 € bis 83 € (Deutsche Bundesbank 2020). Damit können Einsparung im Bereich von 177 € bis 236 € bezogen auf ein Jahr erzielt werden (Bild 69)

Parameteroptimierung für ein Lagervolumen von 900 kg

Die Mindestbetriebsdauer wird auch hier auf eine Stunde festgelegt. Zusätzlich wird E_{ref} von 155 €/kWh auf 151 €/kWh reduziert. Der minimale Lagerbestand wird zusätzlich auf 20 kg reduziert. Dies führt zu einer Reduktion der Energiekosten von 6,6% gegenüber dem Normalbetrieb (Bild 68). Dies entspricht einer Einsparung in Höhe von 485 € bezogen auf ein Jahr.

Dabei erhöht sich die Durchlaufzeit im Mittel um 20% bezogen auf einen Zeitraum von 24 Stunden. Der mittlere Lagerfüllgrad liegt 15% über dem Normalbetrieb mit einem mittleren Lagerfüllgrad von 30%. Dies entspricht einer mittleren Bestandserhöhung von 13,5 kg. Legt man hier ebenfalls ein Effektivzinsintervall von 2% - 6% zugrunde, entstehen zusätzliche Lagerkosten in Höhe von 30 € bis 90 € (Deutsche Bundesbank 2020). Damit können Einsparung im Bereich von 395 € bis 455 € bezogen auf ein Jahr erzielt werden (Bild 69)

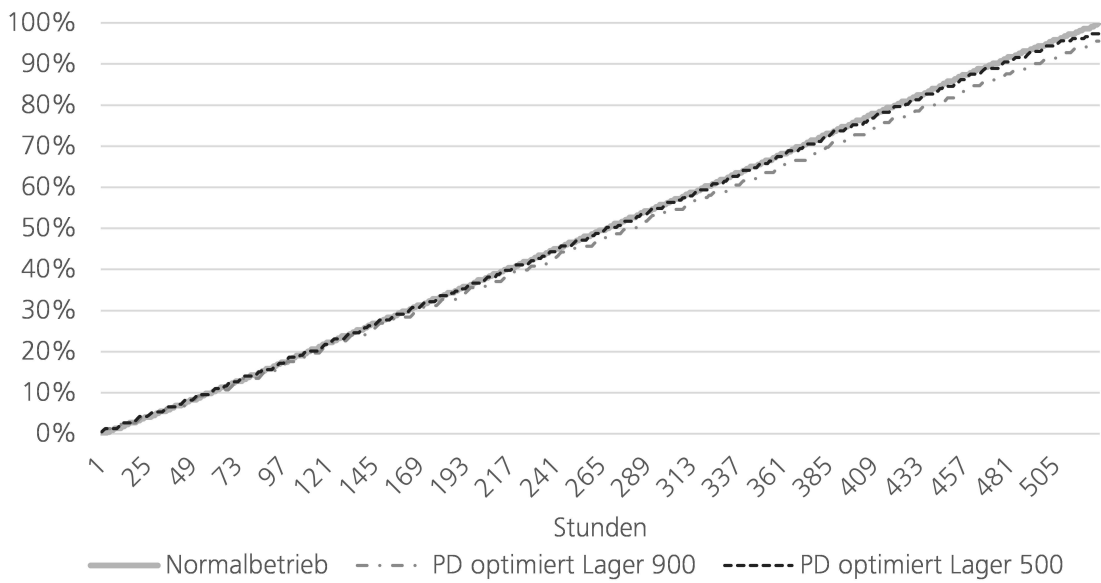


Bild 68: Prozentualer Stromkostenverlauf in Bezug auf den Normalbetrieb des Trockners

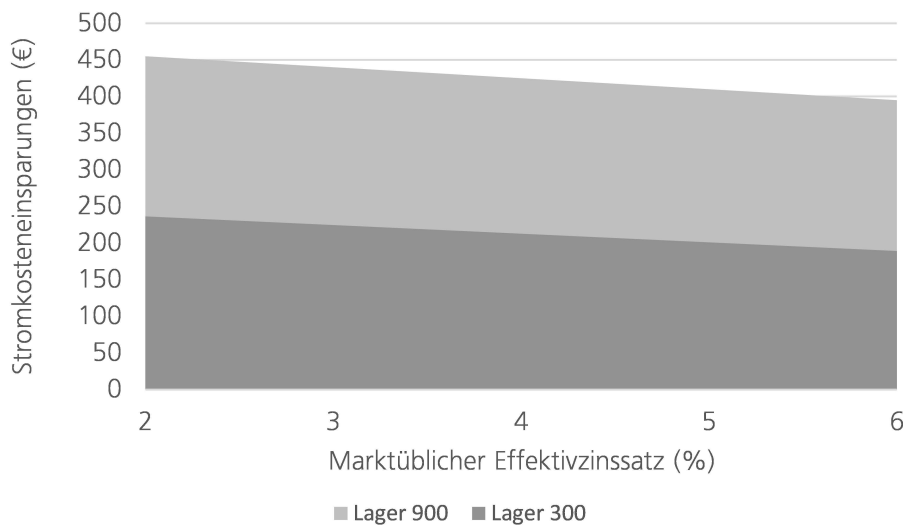


Bild 69 Stromkosteneinsparungen des Trockners in Abhängigkeit des Marktüblichen Effektivzinssatzes bezogen auf ein Jahr

6.3.5 Fazit Automobilzulieferer Spritzguss

Zusammenfassend lässt sich für das Unternehmen feststellen, dass eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Regelung für den Prozess des Granulattrocknens etabliert werden kann. Im Optimalfall kann mit Einsparungen in Höhe von 3,5% der

Energiekosten des Trockners gerechnet werden. Dabei ist jedoch von einer Erhöhung der mittleren Bestände um 12% gegenüber einem nicht energetisch flexibilisierten Betrieb auszugehen.

Einsparungen in Höhe von 6,6% können durch eine Vergrößerung des Lagervolumens erzielt werden. Dies geht jedoch mit Investitionen in einen Lagerausbau und erhöhten Betriebskosten einher.

Die energetische Flexibilisierung der SGMs, auf Basis der vorhandenen logistischen Rahmenbedingungen, führt zu keinem Einsparpotenzial. Vielmehr bietet es sich an, auf Basis der SGM spezifische Lastprofile und einer maschinenübergreifenden Koppelung in Kombination mit Energiespeichern, die Anschlussleistung des Systems zu reduzieren und Lastspitzen zu glätten.

6.4 Anwendungsübergreifende Analyse und Zwischenfazit

In dem zurückliegenden Kapitel wurde die dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung anhand zweier Anwendungsbeispiele simulativ getestet. Damit kann die Forschungsfrage beantwortet werden: *Wie kann eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Produktionssteuerung implementiert und simulativ getestet werden?*

Zudem können auf Basis der Ergebnisse der untersuchten Anwendungsbeispiele die gewonnen Erkenntnisse kombiniert und übergreifend formuliert werden.

Grundsätzlich beeinflusst die energetische Optimierung nicht die Auslastung des Produktionssystems. Vielmehr wird diese als feste Randbedingung etabliert. Das Potenzial der energetischen Flexibilität verhält sich diametral zur Auslastung. Die Einhaltung der Termintreue wird über die logistische Komponente des Produktionsdrucks sichergestellt und nicht negativ beeinflusst. Die energetische Flexibilisierung geht jedoch mit einer Erhöhung der Lagerbestände einher. Die Durchlaufzeit ändert sich in Abhängigkeit der Energiepreisverteilung innerhalb des Optimierungszeitraums. Liegt der Energiepreis meist unter dem Energierferenzpreis, verkürzt sich

die Durchlaufzeit. Liegt der Energiepreis meist über dem Energiereferenzpreis, verlängert sich die Durchlaufzeit.

Die Optimierung der Produktionsdruckfunktion und damit die Senkung der Energiekosten wird durch die Wahl des Energiereferenzpreises, des Lagervolumens und der Mindestbetriebsdauer dominiert.

Dabei gilt grundsätzlich:

- In Abhängigkeit der Stückzeit von vor- und nachgelagerten Prozessen führt eine Erhöhung des Lagervolumens zu einer Erhöhung der energetischen Flexibilität. Dies gilt so lange, bis das für die Ausschöpfung der energetischen Flexibilität benötigte Lagervolumen erreicht ist.
- Eine Reduktion der Mindestbetriebsdauer erhöht die Flexibilität des Prozesses hinsichtlich der Volatilität des Energiepreises. Dies gilt so lange, bis die Mindestbetriebsdauer gleich der Frequenz der Energiepreisvariation ist.
- Eine Reduktion des Energiereferenzpreises gegenüber dem Strompreismittelwert senkt die Energiekosten. Dies gilt so lange, bis die durch den energetischen Referenzpreis entstehende Prozessträgheit durch den Lagermindestbestand, in Abhängigkeit der Stückzeit des nachgelagerten Prozesses, dominiert wird.

Abschließend festzuhalten ist, dass auf Basis der beiden Praxisbeispiele die Funktionalität der energieflexiblen Produktionssteuerung und Maschinenregelung nachgewiesen wird.

Die Praxisbeispiele zeigen zudem das Potenzial des dezentralen und preisbasierten Charakters, indem komplexe Optimierungsprobleme in Echtzeit gelöst werden. So wird ein integriertes Energie- und Produktionssystem geschaffen, das kostengünstig, robust, hochdynamisch und flexibel ist. Ein anreiz- oder preisbasierter Ansatz bietet darüber hinaus das Potenzial, sich zu einem selbstoptimierenden Ökosystem zu entwickeln, das keine harten externen Regelungseingriffe benötigt. Dies schafft zum einen eine höhere Systemakzeptanz und verringert zum anderen die Systemkosten.

7 Reflexion

Die grundlegende Funktion der entwickelten dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung von Produktionssystemen konnte im vorangegangenen Kapitel nachgewiesen werden. Offen bleibt jedoch, ob die in Kapitel 4 gestellten Anforderungen erfüllt werden und die zentrale Forschungsfrage abschließend beantwortet werden kann.

7.1 Bewertung der Erfüllung der Anforderungen

Zur Strukturierung der Anforderungen wurden drei Anforderungsklassen definiert. Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich, Anforderungen an das Steuerungs- und Regelungssystem und Anforderungen an die Systemoptimierung. Im Folgenden werden diese mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Steuerungsansatz abgeglichen.

Die Definition des Bilanz- und Objektbereichs beschreibt den Wirkungsraum des Steuerungssystems und ist somit von zentraler Relevanz für die Entwicklung der dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung.

Abbildung des relevanten Objektbereichs

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, umfasst der definierte Objektbereich die Fabrik, bestehend aus Produktions-, Steuerungs- und Energiesystem. Das Produktionssystem enthält die Betriebsmittel zur wertschöpfenden Transformation. Das Energiesystem umfasst an dieser Stelle alle Anlagen zur Verteilung elektrischer Energie in der Fabrik. Die entwickelte dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung optimiert maschinenübergreifend, auf Basis des in Kapitel 5.2 entwickelten fachtechnischen Lösungskonzeptes, das Produktions- und Energiesystem. Damit ist sichergestellt, dass alle Komponenten innerhalb des Bilanzraumes erfasst und integriert werden. Daher kann das Anforderungskriterium als voll erfüllt bewertet werden.

Vollständigkeit des Zielsystems

Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, wird das logistische Zielsystem um den Faktor Energie erweitert. Die in dieser Arbeit entwickelte dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung optimiert maschinenübergreifend die Energiekosten in Abhängigkeit von Termintreue und Auslastung. Zusätzlich werden, innerhalb vorgegebener Grenzen, die Durchlaufzeit und die Bestände beeinflusst und optimiert. Das logistische Zielsystem wird daher in seiner Gänze mit einbezogen und wird Teil der Systemlösung. Aus diesem Grund kann die Anforderung als voll erfüllt bewertet werden.

Dynamische Skalierbarkeit

Produktionssysteme sind dynamische Systeme, die sich im Laufe der Zeit wandeln. Das dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerungssystem muss demnach in der Lage sein, sowohl neue Teilnehmer als auch neue Teilnehmerklassen aufzunehmen, um sich dem Produktionssystem anpassen zu können. Das Systemkonzept des entwickelten energieflexiblen Steuerungssystems ist hinsichtlich seiner dezentralen Struktur so angelegt, dass, in Abhängigkeit der Teilnehmerklassen, eine unbegrenzte Anzahl an Teilnehmern existieren kann. Diese können individuell eingestellt und hinzugefügt werden, ohne das gesamte System neu zu strukturieren. Somit kann diese Anforderung als erfüllt bewertet werden.

Das energieflexible Steuerungs- und Regelungssystem muss in der Lage sein, in kürzester Zeit komplexe, ausgedehnte und große (eine große Anzahl von Teilnehmern) Systeme zu steuern und zu optimieren.

Automatisierung des Steuerungssystems und dezentrale Steuerungsarchitektur

Das Steuerungssystem muss in der Lage sein, selbsttätig und automatisiert Entscheidungen zur Steuerung und Regelung von Prozessen zu treffen. Die Entscheidungen des Systems beruhen auf der Verknüpfung von Eingangsdaten mit den jeweiligen

Zuständen des Systems. Dezentrale Steuerungsansätze in der Produktion ermöglichen es zudem einzelnen Objekten, Informationen selbstständig zu verarbeiten und Entscheidungen zu treffen. Dies führt zu einer Verschlankung der Planung und Verlagerung der Entscheidungen hin zur Produktionssteuerung in Echtzeit. Die in dieser Arbeit entwickelte dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung ermöglicht es einzelnen Teilnehmern des Regelungssystems, energetische Informationen selbstständig zu verarbeiten und Entscheidungen in Echtzeit zu treffen. Im entwickelten Ansatz dieser Arbeit trifft jeder aktive Teilnehmer notwendige Entscheidungen, auf Basis der jeweils aktuell verfügbaren Energie und der logistischen Vorgaben in Echtzeit. Somit können umfangreiche und zeitaufwändige zentrale Berechnungen vermieden und es kann schnell, effizient und automatisiert auf plötzliche Veränderungen reagiert werden. Demnach können auch diese Anforderungen als erfüllt bewertet werden.

Geschlossene Regelkreise zur energetischen Systemoptimierung

Ein geschlossener Regelkreis ermöglicht die Rückführung energiebezogener Prozessdaten der eingebundenen Systemteilnehmer. Der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz regelt den Maschinenzustand in Abhängigkeit des Zieltermins des Auftrags, des Auftragsabarbeitungsstatus, der Schlupfzeit und der Energiepreise. Dabei wird ein Echtzeit-Soll-Ist-Vergleich der Zielkriterien auf der Maschinenebene vorgenommen. Damit wird zu jedem Zeitpunkt ein geschlossener Regelkreis sichergestellt. Demnach kann diese Anforderung als erfüllt bewertet werden.

Definition von mathematischen Steuerungsalgorithmen

Um das Steuerungssystem softwaretechnisch abbilden zu können, müssen die energetische Optimierung des Produktionssystems mathematisch beschrieben werden und Steuerungsalgorithmen zur Lösungsfindung formuliert werden. Der entwickelte Regelalgorithmus beschreibt mathematisch die energieflexible Optimierung einzelner Systemteilnehmer und damit verbunden die energieflexible Optimierung des Gesamtsystems. Somit kann diese Anforderung als erfüllt bewertet werden.

Die Systemoptimierung kann auf unterschiedlichen Produktionsebenen und vor dem Hintergrund unterschiedlicher Optimierungsziele erfolgen.

Preisbasierte Systemoptimierung

Preisbasierte Ansätze bieten den Nutzern zeitabhängig variable Energiepreise. Die Idee besteht darin, dass die Verbraucher dynamisch ihre Energieverbrauchsmuster entsprechend dem Verlauf der Strompreise anpassen, anstatt ihre Lasten durch externe Regelungseingriffe beeinflussen zu lassen. Im entwickelten Ansatz dieser Arbeit passen alle aktiven Systemteilnehmer, auf Basis der zur Verfügung gestellten Energiepreise, ihr Energieverbrauchsmuster effizient und schnellstmöglich an. Dabei sind insbesondere keine extern gesteuerten Regelungseingriffe notwendig. Demnach kann diese Anforderung als erfüllt bewertet werden.

Echtzeitfähige Systemoptimierung

Um auf hochfrequente Änderungen in der Energieversorgung reagieren zu können, sind kurze Reaktionszeiten erforderlich. Das Regelungs- und Steuerungssystem muss in der Lage sein, möglichst in Echtzeit Systemoptimierungen vorzunehmen. Die in dieser Arbeit entwickelte dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung ermöglicht es einzelnen Teilnehmern des Regelungssystems, energetische Informationen selbstständig zu verarbeiten und Entscheidungen in Echtzeit zu treffen. So wird die Echtzeitfähigkeit des Gesamtsystems sichergestellt und schließlich kann auch diese Anforderung als erfüllt bewertet werden.

Die Diskussion der Anforderungserfüllung zeigt, dass alle Anforderungen erfolgreich und zielorientiert umgesetzt und somit auch die Anforderungsklassen erfüllt werden konnten (Tabelle 44). Für die Reflexion der Ergebnisse ist neben der Anforderungserfüllung weiterhin zu prüfen, inwieweit die vorgestellte dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung die zu Beginn gestellten Forschungsfragen und damit auch die zentrale Forschungsfrage beantwortet.

Tabelle 44: Bewertung der dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Produktionssteuerung hinsichtlich der Anforderungsklassen

Autor	Weckmann
Anforderungen an den Bilanz- und Objektbereich	●
Anforderungen an das Steuerungs- und Regelungssystem	●
Anforderungen an die Systemoptimierung	●
Legende:	
nicht erfüllt	○
in Teilen erfüllt	◐
erfüllt	●

7.2 Beantwortung der Forschungsfrage

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist erreicht, wenn die zentrale Forschungsfrage vollumfassend beantwortet werden kann und ein fundierter Ergebnismachweis vorliegt. Ausgehend von der zentralen Forschungsfrage -

Wie kann ein Produktionssystem dezentral, automatisiert und energieflexibel gesteuert werden?

- wurden vier Teilforschungsfragen abgeleitet, die in Summe die Antwort auf die zentrale Forschungsfrage bilden. Diese wurden bereits in den vorangegangenen Kapiteln systematisch und umfassend beantwortet:

1. *Was sind die relevanten Bestandteile eines Produktionssystems für eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Produktionssteuerung?*

Im Kapitel zwei wurden die Grundlagen der vorliegenden Arbeit hinsichtlich des Bezugsraums (Produktionssystems), der Produktionsplanung und Steuerung sowie der industriellen Energieflexibilität erarbeitet, die gleichzeitig auch die relevanten Bestandteile des Produktionssystems im Hinblick auf die dezentrale, automatisierte und energieflexible Produktionssteuerung bilden.

2. *Welche Anforderungen werden an eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Produktionssteuerung gestellt?*

In Kapitel vier wurden Anforderungen für eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung definiert. Diese wurden hinsichtlich des Bilanz- und Objektbereichs, des Steuerungs- und Regelungssystems und der Systemoptimierung strukturiert.

3. *Wie kann der Systementwurf einer dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Produktionssteuerung aufgebaut werden?*

In Kapitel fünf wurde das Konzept für eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung der Produktion entwickelt. Dabei wurden, auf Basis der Struktur eines Industrienetzes und seiner Komponenten, Teilnehmerklassen entwickelt. Für die Teilnehmerklasse Verbraucher wurde entlang der Planung und Steuerung der Produktion ein energieflexibles, automatisiertes und dezentrales Steuerungssystem entwickelt.

4. *Wie kann diese Steuerung implementiert und simulativ getestet werden?*

In Kapitel sechs wurde die dezentrale, automatisierte und energieflexible Steuerung anhand zweier Anwendungsbeispiele simulativ getestet und eine Implementierungsstrategie entwickelt. Zudem können auf Basis der Ergebnisse der untersuchten Anwendungsbeispiele die gewonnenen Erkenntnisse kombiniert und übergreifend formuliert werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Steuerungsansatz entwickelt, der einzelne Maschinen dazu befähigt, dezentral und in Echtzeit auf Basis von Energieindikatoren, eine energetische Optimierung des Produktionssystems vor dem Hintergrund des logistischen Zielsystems vorzunehmen. Darüber hinaus wurde dieser Ansatz auf der Basis von zwei repräsentativen Praxisbeispielen erfolgreich getestet, analysiert und bewertet. Diese zeigen auf der einen Seite, dass der neu entwickelte effiziente Steuerungsansatz praxistauglich ist und die Energiekosten des Produktionssystems nachhaltig gesenkt werden. Auf der anderen Seite ist jedoch auch festzuhalten, dass eine

Dynamisierung der Energiepreisstruktur die Wirtschaftlichkeit des vorgestellten Ansatzes definiert. Somit kann auch die zentrale Forschungsfrage beantwortet und der Forschungsprozess dieser Arbeit abgeschlossen werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der Industrie gewinnt die Frage nach einer sicheren, kostengünstigen und qualitativ hochwertigen Energieversorgung zunehmend an Bedeutung, insbesondere vor dem Hintergrund steigender und volatiler Energiepreise sowie einer zunehmend schwankenden Bereitstellung von Energie. Unternehmen agieren auf globaler Ebene und sind gezwungen, ihre Produktivität und damit die Wettbewerbsfähigkeit kontinuierlich zu steigern. Schwankende sowie steigende Energiepreise werden somit zunehmend zu einem Kostenrisiko und rücken die Energiekosten in den Fokus vieler Unternehmen.

Vor diesem Hintergrund war es das **Ziel** dieser Arbeit, eine dezentrale, automatisierte und energieflexible Produktionssteuerung zu entwickeln, die sowohl die Energie- als auch die Produktionskosten nachhaltig senkt. Dabei sollte die Auslastung der Produktion und die Termintreue der Aufträge nicht (negativ) beeinflusst werden. Im Fokus der Arbeit stehen dabei die Produktionssteuerung und die damit verbundenen wertschöpfenden Maschinen und Anlagen sowie die bestehende elektrische Infrastruktur des Produktionssystems. Das Ergebnis der Arbeit ist ein zukunftsorientiertes Steuerungssystem mit effizienten Regelalgorithmen, die es erlauben, das Produktionssystem hinsichtlich der Energiekosten zu minimieren. Damit kann die Produktion, im Hinblick auf ein von erneuerbaren Energien dominiertes Energiesystem, zukunftsorientiert und nachhaltig betrieben werden.

Dazu wurden Grundlagen des Produktionssystems und dessen Abgrenzung, Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung sowie Grundlagen der Definition von Energieflexibilität systematisch analysiert und aufgearbeitet. Darauf aufbauend wurde der Stand der Technik mit dem Schwerpunkt auf Ansätze einer energieflexiblen Produktionssteuerung recherchiert und bewertet. In diesem Zusammenhang konnten weder in der Wissenschaft noch im Praxiseinsatz vergleichbare dezentrale, preisbasierte Ansätze identifiziert werden.

Auf dieser Basis wurde anschließend ein fachtechnisches Lösungskonzept und eine Verfahrensentwicklung für die in dieser Arbeit entwickelte, dezentrale und automatisierte energieflexible Steuerung konzipiert. Zudem wurde diese als Softwarelösung realisiert.

Das Softwarepaket wurde anschließend an zwei Praxisbeispielen getestet sowie Bandbreiten verschiedener Praxisparameter simuliert. Damit konnte im Ergebnis der entwickelten dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung eine deutliche Reduktion der Energiekosten nachgewiesen werden. Die Forschungsfrage – Wie kann ein Produktionssystem dezentral, automatisiert und energieflexibel gesteuert werden? – konnte damit zum Abschluss des Forschungsprozesses abschließend beantwortet werden.

Die **Grenzen** der dezentralen, automatisierten und energieflexiblen Steuerung liegen einerseits in der derzeitigen Ausgestaltung als „Push-Kanban-Konzept“ und den dafür geeigneten unterschiedlichen Produktionstypen. Andererseits wird das zu hebende Energieflexibilitätpotenzial insbesondere durch die Auslastung des Produktionssystems beschränkt. Zudem ist eine Dynamisierung der Energiepreisstruktur Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit des vorgestellten Ansatzes.

Die **Potenziale** sind neben der Auslastung auch vom Energiepreishebel abhängig. Folglich hängen sie von der Volatilität der Energiepreise und dem Anteil der Energiekosten an den jeweiligen verfahrensspezifischen Produktionskosten ab. Dem stehen erhöhte Betriebskosten gegenüber, die auf einer Erhöhung des Lagerbestands beruhen, der sich durch die Optimierung ergibt.

Der dezentrale und preisbasierte Charakter der Steuerung und Regelung ermöglicht den Aufbau eines echtzeitfähigen und integrierten Energie- und Produktionssystems. Der preisbasierte Ansatz ermöglicht zudem ein selbstoptimierendes Ökosystem. Dies schafft zum einen eine höhere Systemakzeptanz und verringert parallel dazu die Systemkosten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte innovative Steuerungssystem ein enormes Zukunftspotenzial für die Lösung

der immer komplexeren und zunehmend dynamischen Probleme bietet, die mit einer nachhaltigen und flexiblen Energieversorgung eines Produktionssystems verbunden sind.

Die vorliegende Arbeit ist aktuell bereits Ausgangsbasis für **weitere Untersuchungen** im Bereich von dezentralen und automatisierten Steuerungsansätzen für das Energiesystem der Fabrik der Zukunft. Insbesondere in Verbindung mit einer Gleichstromversorgung entstehen große zusätzliche Potenziale in der Produktion hinsichtlich Versorgungsqualität, Effizienz, Flexibilität und Nachhaltigkeit. Eine durchgehende Nutzung von Gleichstrom ermöglicht es, dass eine Vielzahl von energetischen Wandlungsschritten eingespart sowie maschinenübergreifend Energie rekuperiert und damit Energiekosten reduziert werden können.

Darüber hinaus wird empfohlen, den Schwerpunkt zukünftig verstärkt auf eine energieträgerübergreifende und sektorkoppelnde Optimierung zu legen, um die Herausforderungen einer nachhaltigen Energiewende im globalen Wettbewerb erfolgreich zu meistern.

9 Literaturverzeichnis

- Abele et al. 2007** Abele, Eberhard; Liebeck, Tobias; Wörn, Arno, 2007. Flexibilität im Investitionsentscheidungsprozess: Bestimmen der Flexibilität für Investitionsentscheidungen in Fertigungssysteme. *wt Werkstattstechnik online* **2007** (1/2), S. 85–89
- Abele et al. 2016** Abele, Eberhard; Schraml, Philipp; Moog, Daniel, 2016. Electric Load Management on Machine Tools. *Procedia CIRP* **55**, S. 164–169
DOI: 10.1016/j.procir.2016.08.046
- Adams et al. 2007** Adams, Marcus; Kuhn, Wolfgang; Stor, Thomas; Zelm, Martin, 2007. DIN EN 62264 - die neue Norm zur Interoperabilität von Produktion und Unternehmensführung: Teil 1. *Automatisierungstechnische Praxis atp* **49** (5), S. 52–57
- Arnold 2002** Arnold, Dieter (Hrsg.), 2002. *Handbuch Logistik: Mit 77 Tabellen*. Berlin: Springer. ISBN 3540419969
- Artigues et al. 2013** Artigues, Christian; Lopez, Pierre; Haït, Alain, 2013. The energy scheduling problem: Industrial case study and constraint propagation techniques. *International Journal of Production Economics* **143** (1), S. 13–23
DOI: 10.1016/j.ijpe.2010.09.030
- Ashok et al. 2001** Ashok, Sharmila; Banerjee, Rangan, 2001. An optimization mode for industrial load management. *IEEE Transactions on Power Systems* **16** (4), S. 879–884
DOI: 10.1109/59.962440
- Bauernhansl 2017** Bauernhansl, Thomas, 2017. Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 1–31
ISBN 978-3-662-53253-9
DOI: 10.1007/978-3-662-53254-6_1

- BDEW 2019a** BDEW, 2019.
BDEW-Strompreisanalyse Juli 2019: Haushalte und Industrie.
Berlin.
Verfügbar unter: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/>
Zugriff am: 01.08.2019
- BDEW 2019b** BDEW, 2019.
Redispatch in Deutschland: Auswertung der Transparenzdaten April 2013 bis einschließlich Dezember 2018.
Berlin.
Verfügbar unter: <https://www.bdew.de/service/anwendungshilfen/redispatch-deutschland/>
Zugriff am: 01.04.2019
- BDEW 2020** BDEW, 2020.
BDEW-Strompreisanalyse Januar 2020.
Berlin.
Verfügbar unter: https://www.bdew.de/media/documents/BDEW-Strompreisanalyse_Januar_2020.pdf
Zugriff am: 10.01.2020
- Bechte 1984** Bechte, Wolfgang, 1984.
Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung, Dissertation Uni. Hannover.
Düsseldorf: VDI-Verlag.
Fortschrittberichte VDI: Reihe 2 Nr. 70
- Bego et al. 2014** Bego, Andres; Li, Lin; Sun, Zeyi, 2014. Identification of reservation capacity in critical peak pricing electricity demand response program for sustainable manufacturing systems.
International Journal of Energy Research **38** (6), S. 728–736
DOI: 10.1002/er.3077
- Beier et al. 2017a** Beier, Jan; Thiede, Sebastian; Herrmann, Christoph, 2017. Energy flexibility of manufacturing systems for variable renewable energy supply integration: Real-time control method and simulation.
Journal of Cleaner Production **141**, S. 648–661
DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.09.040

- Beier et al. 2017b** Beier, Jan; Herrmann, Christoph; Kara, Sami; Sangwan, Kuldip Singh, 2017.
Simulation approach towards energy flexible manufacturing systems.
Cham: Springer.
Sustainable production, life cycle engineering and management.
ISBN 978-3-319-46638-5
- Bertsch et al. 2017** Bertsch, Joachim; Schweter, Helena; Sitzmann, Amelie; Fridgen, Gilbert, Sachs, Thomas; Schöpf, Michael, 2017.
Ausgangsbedingungen für die Vermarktung von Nachfrageflexibilität: Status-Quo-Analyse und Meta-studie.
Köln.
Verfügbar unter: http://www.ewi.research-scenarios.de/cms/wp-content/uploads/2017/07/ewi_ERS_FIM_FIT.pdf.
Zugriff am: 01.04.2019
- Bichler et al. 2013** Bichler, Klaus; Riedel, Guido; Schöppach, Frank, 2013.
Grundlagen der Lagerwirtschaft.
In: Bichler, Klaus; Riedel, Guido; Schöppach, Frank (Hrsg.): *Kompakt Edition: Lagerwirtschaft.*
Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 1–8
ISBN 978-3-658-01611-1
DOI: 10.1007/978-3-658-01612-8_1
- BIHK 2017a** BIHK, 2017.
Energiewende im Strommarkt - Versorgungsqualität.
München.
Verfügbar unter: <https://www.ihk-muenchen.de/de/%C3%9Cber-uns/IHK-Publikationen.html>
Zugriff am: 01.01.2020
- BIHK 2017b** BIHK, 2017.
Energiewende im Strommarkt - Versorgungsqualität.
München.
Verfügbar unter: <https://www.ihk-muenchen.de/de/%C3%9Cber-uns/IHK-Publikationen.html>
Zugriff am: 01.01.2020
- BMWi 2018** BMWi, 2018.
Energiedaten: Gesamtausgabe: Stand August 2018
Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>
- Böning 2013** Böning, Christian, 2013. Stromintensive Fertigung – Energiekostenorientierte Belegungsplanung.
IT und Production **14** (12), S. 88–89

- Bonten 2016** Bonten, Christian, 2016.
Kunststofftechnik: Einführung und Grundlagen.
2 Auflage.
München: Hanser.
ISBN 978-3-446-44917-6
- Bruzzone et al. 2012** Bruzzone, Alessandro; Anghinolfi, Davide; Paolucci, Massimo; Tonelli, Flavio, 2012. Energy-aware scheduling for improving manufacturing process sustainability: A mathematical model for flexible flow shops.
CIRP Annals **61** (1), S. 459–462
DOI: 10.1016/j.cirp.2012.03.084
- Bundesnetzagentur 2018** Bundesnetzagentur, 2018.
Monitoringbericht 2018: Monitoringbericht gemäß § 63 Abs. 3 i. V. m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i. V. m. § 53 Abs. 3 GWB Stand: 8. Februar 2019.
Bonn
Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2018/Monitoringbericht_Energie2018.html
- Canzler 2018** Canzler, Weert, 2018. Die infrastrukturelle Umsetzung der Energiewende.
der moderne staat – Zeitschrift für Public Policy, Recht und Management **11** (2), S. 461–477
DOI: 10.3224/dms.v11i2.10
- Consentec GmbH 2014** Consentec GmbH, 2014.
Beschreibung von Regelleistungskonzepten und Regelleistungsmarkt, Studie im Auftrag der deutschen Übertragungsnetzbetreiber.
Aachen
Verfügbar unter: <https://www.regelleistung.net/ext/download/marktbeschreibung>
- Czichos 2000** Czichos, Horst (Hrsg.), 2000.
Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften.
31. neubearbeitete und erweiterte Auflage.
Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN 978-3-662-06652-2
- Dam et al., 2008** Dam, Binh; Mohagheghi, Salman; Stoupis, James, 2008.
Intelligent Demand Response Scheme for Customer Side Load Management.
In: *IEEE Energy 2030*,
11/17/2008 - 11/18/2008, Atlanta, GA, USA, S. 1–7

- Deindl et al.** Deindl, Matthias; Block, Carsten; Vahidov, Rustam; Neumann, Dirk.
Load Shifting Agents for Automated Demand Side Management in Micro Energy Grids.
In: *2008 Second IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems, Venezia*, S. 487–488
DOI: 10.1109/SASO.2008.64
- DENA 2012** DENA, 2012.
Handbuch Lastmanagement: Vermarktung flexibler Lasten: Erlöse erwirtschaften – zur Energiewende beitragen.
Berlin
Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/.../Pdf/1408_Lastmanagement_Handbuch.pdf
- Deng et al. 2015** Deng, Ruilong; Yang, Zaiyue; Chow, Mo-Yuen; Chen, Jiming, 2015. A Survey on Demand Response in Smart Grids: Mathematical Models and Approaches.
IEEE Transactions on Industrial Informatics **11** (3), S. 570–582
DOI: 10.1109/TII.2015.2414719
- Deutsche Bundesbank 2020** Deutsche Bundesbank, 2020.
MFI-Zinsstatistik.
Verfügbar unter: <https://www.bundesbank.de/de/statistiken/geld-und-kapitalmaerkte/zinssaetze-und-renditen/mfi-zinsstatistik-bestaende-neugeschaeft-650658>
Zugriff am: 01.08.2020
- DIN Norm 50160 2017** DIN 50160:2017-02.
DIN EN 50160/A1:2016-02, Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen; Deutsche Fassung EN_50160:2010/A1:2015.

- DIN Norm 61000-1-2 2017** DIN 61000-1-2:2017-07.
DIN EN 61000-1-2:2017-07, Elektromagnetische Verträglichkeit_(EMV)_- Teil_1-2: Allgemeines_- Verfahren zum Erreichen der funktionalen Sicherheit von elektrischen und elektronischen Systemen einschließlich Geräten und Einrichtungen im Hinblick auf elektromagnetische Phänomene (IEC_61000-1-2:2016); Deutsche Fassung EN_61000-1-2:2016.
- DIN Norm 62264-1 2014** DIN 62264-1:2014-07.
DIN EN 62264-1:2014-07, Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen_- Teil_1: Modelle und Terminologie (IEC_62264-1:2013); Deutsche Fassung EN_62264-1:2013.
- DIN Norm 60050-351 2014** DIN 60050-351:2014.
DIN IEC 60050-351:2014-09, Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch_- Teil_351: Leittechnik (IEC_60050-351:2013).
- Dombrowski et al. 2014** Dombrowski, Uwe; Wagner, Tobias, 2014. Mental Strain as Field of Action in the 4th Industrial Revolution.
Procedia CIRP **17**, S. 100–105
DOI: 10.1016/j.procir.2014.01.077
- Dragicevic et al. 2015** Dragicevic, Tomislav; Lu, Xiaonan; Vasquez, Juan; Guerrero, Josep, 2015. DC Microgrids–Part I: A Review of Control Strategies and Stabilization Techniques.
IEEE Transactions on Power Electronics **31** (7), S. 4876–4891
DOI: 10.1109/TPEL.2015.2478859
- Duffie et al. 2002** Duffie, Neil; Falu, I., 2002. Control-Theoretic Analysis of a Closed-Loop PPC System.
CIRP Annals **51** (1), S. 379–382
DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61541-8
- Dyckhoff 2006** Dyckhoff, Harald, 2006.
Produktionstheorie: Grundzüge industrieller Produktionswirtschaft.
5., überarb. Aufl.
Berlin: Springer.
Springer-Lehrbuch.
ISBN 3-540-32600-6

- Eberspächer 2016** Eberspächer, Philipp, 2016.
Zustandsmodellbasierte, steuerungsnahe Energieverbrauchs-optimierung von Werkzeugmaschinen.
Stuttgart, Univ. Stuttgart, Dissertation, 2016.
DOI: 10.18419/opus-9064
- Egert 2012** Egert, Christoph, 2012.
Lineare statistische Modellierung und Interpretation in der Praxis.
Oldenburg: De Gruyter.
ISBN 978-3-486-72380-9
- Eisenhauer et al. 2018** Eisenhauer, Stefan; Reichart, Markus; Sauer, Alexander; Weckmann, Sebastian; Zimmermann, Fabian, 2018.
Energieflexibilität in der Industrie - Eine Metastudie.
Stuttgart 2018
Verfügbar unter: <https://www.eep.uni-stuttgart.de/institut/publikationen/>
- Elsner et al. 2015** Elsner, Peter; Fishedick, Manfred; Sauer, Marc Uwe (Hrsg.), 2015.
Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien - Szenarien - Systemzusammenhänge.
München: Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.
ISBN 978-3-9817048-5-3
- Emec et al. 2013** Emec, Soner; Kuschke, Maren; Huber, F,W; Stephan, R; Strunz, Kai; Seliger, Günther, 2013.
Stochastic optimization method to schedule production steps according to volatile energy price.
In: Seliger, Günther (Hrsg.): *Proceedings / 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing.*
Berlin: Univ.-Verl. der TU, S. 637–642
ISBN 978-3-7983-2609-5
- Engelhardt 2015** Engelhardt, Philipp Ronald, 2015.
System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage.
München: Utz.
IWB-Forschungsberichte 299.
ISBN 978-3-8316-4472-8

- Engler et al. 2005** Engler, Alfred; Sultanis, Nikos, 2005. Droop control in LV-grids. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE (Hrsg.): *2005 International Conference on Future Power Systems*: IEEE, 1-6
ISBN 9078205024
DOI: 10.1109/FPS.2005.204224
- Fang et al. 2011** Fang, Kan; Uhan, Nelson; Zhao, Fu; Sutherland, John W., 2011. A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction.
Journal of Manufacturing Systems **30** (4), S. 234–240
DOI: 10.1016/j.jmsy.2011.08.004
- Fernandes et al. 2006** Fernandes, Nuno Octávio; do Carmo-Silva, Sílvio, 2006. Generic POLCA—A production and materials flow control mechanism for quick response manufacturing.
International Journal of Production Economics **104** (1), S. 74–84
DOI: 10.1016/j.ijpe.2005.07.003
- Fernandez et al. 2013** Fernandez, Mayela; Li, Lin; Sun, Zeyi, 2013. “Just-for-Peak” buffer inventory for peak electricity demand reduction of manufacturing systems.
International Journal of Production Economics **146** (1), S. 178–184
DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.06.020
- Fischäder** Fischäder, Holm.
Störungsmanagement in netzwerkförmigen Produktionssystemen.
Ilmenau, Techn. Univ. Ilmenau, Institut für Betriebswirtschaft, Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Herfried Schneider.
DOI: 10.1007/978-3-8350-9375-1
- Fleischer 2018** Fleischer, Holger, 2018.
Handelsgesetzbuch: Mit Einführungsgesetz, Publizitätsgesetz und Handelsregisterverordnung : Textausgabe.
63. überarbeitete Auflage.
München: dtv; C. H. Beck 5002.
ISBN 9783406734786

- Florea et al. 2013** Florea, Anna; Luttamus, Juha; Postelnicu, Corina; Martinez Lastra, Jose, 2013. Agent -Based Control of Operational Conditions for Smart Factories: The Peak Load Management. In: Maik, Vladimir; Martinez Lastra, Jose L; Skobelev, Petr (Hrsg.): *Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 83–94 ISBN 978-3-642-40090-2
- Franke et al. 2010** Franke, Jörg; Merhof, Jochen; Hopfensitz, Sebastian, 2010. Einsatz von dezentralen Multiagentensystemen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **105** (12), S. 1075–1078 DOI: 10.3139/104.110452
- Friedl 2012** Friedl, Birgit, 2012. *Kostenrechnung: Grundlagen, Teilrechnungen und Systeme der Kostenrechnung*. 2 Auflage. München: Oldenbourg. ISBN 9783486591262
- Frigerio et al. 2015** Frigerio, Nicla; Matta, Andrea, 2015. Analysis of an Energy Oriented Switching Control of Production Lines. *Procedia CIRP* **29**, S. 34–39 DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.177
- Gellings et al. 2016** Gellings, Clark W; Parmenter, Kelly E., 2016. Demand-Side Management. In: Kreith, Frank; D. Yogi Goswami (Hrsg.): *Energy Management and Conservation Handbook*. 2. Milton: CRC Press ISBN 9781466585164
- EnWG 2005** EnWG Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG), Fassung vom Zuletzt geändert durch Art. 3 G v. 17.12.2018 I 2549
- Gong et al. 2015** Gong, Xu; Pessemier, Toon de; Joseph, Wout; Martens, Luc, 2015. An Energy-Cost-Aware Scheduling Methodology for Sustainable Manufacturing. *Procedia CIRP* **29**, S. 185–190 DOI: 10.1016/j.procir.2015.01.041

- Götze 2010** Götze, Uwe, 2010.
Kostenrechnung und Kostenmanagement.
Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN 978-3-642-11823-4
DOI: 10.1007/978-3-642-11824-1
- Graßl et al. 2014** Graßl, Markus; Reinhart, Gunther, 2014. Evaluating Measures for Adapting the Energy Demand of a Production System to Volatile Energy Prices.
Procedia CIRP **15**, S. 129–134
DOI: 10.1016/j.procir.2014.06.081
- Graßl 2015** Graßl, Markus, 2015.
Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion.
München: Utz, Herbert.
Forschungsberichte IWB 300.
ISBN 978-3-8316-4476-6
- Grave et al. 2015** Grave, Katharina; Bader, Nikolas; Blücher, Felix von; Nicolosi, Marco; Chatre, Baptiste; Bosquet, Michelle; Kuwahata; Rena; Breitschopf, Barbara; Friedrichsen, Nele, 2015.
Politisch induzierte Strompreiskomponenten und Ausnahmeregelungen für die Industrie, Vorhaben: Überprüfung der aktuellen Ausnahmeregelungen für die Industrie im Bereich des EEG im Hinblick auf Treffsicherheit und Konsistenz mit anderen Ausnahmeregelungen im Energiebereich unter Berücksichtigung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit und Strompreissituation.
Berlin.
Verfügbar unter: https://www.isi.fraunhofer.de/de/competence-center/energiepolitik-energiemaerkte/projekte/strompreiswirkung_330639.html
Zugriff am: 01.05.2019
- Grinninger 2012** Grinninger, Jürgen, 2012.
Schlanke Produktionssteuerung zur Stabilisierung von Auftragsfolgen in der Automobilproduktion.
München, Tech. Unv. München, Lehrstuhl für Förder-technik Materialfluss Logistik, Dissertation, 2012.
urn:nbn:de:bvb:91-diss-20120716-1098801-1-9

- Grosch et al. 2019** Grosch, Benedikt; Weitzel, Timm; Panten, Niklas; Abele, Eberhard, 2019. A metaheuristic for energy adaptive production scheduling with multiple energy carriers and its implementation in a real production system.
Procedia CIRP **80**, S. 203–208
DOI: 10.1016/j.procir.2019.01.043
- Grosfeld-Nir et al. 2002** Grosfeld-Nir, Abraham; Magazine, Michael, 2002. Gated MaxWIP: A strategy for controlling multistage production systems.
International Journal of Production Research **40** (11), S. 2557–2567
DOI: 10.1080/00207540210128251
- Große Böckmann 2014** Große Böckmann, Markus, 2014. *Senkung der Produktionskosten durch Gestaltung eines Energieregelleitungs-Konzeptes*, Diss. RWTH Aachen. 1. Aufl.
Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag.
ISBN 3863592409
- Gudehus 2011** Gudehus, Timm, 2011. *Logistik: Grundlagen, Strategien, Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN 978-3-540-89389-9
- Günther et al. 2019** Günther, Jens; Lehmann, Harry; Lorenz, Ulrich; Purr, Katja, 2019. *Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten*. Berlin.
Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen>
Zugriff am: 01.09.2019
- Gutenberg 1979** Gutenberg, Erich, 1979. *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Erster Band Die Produktion*. 23. unveränderte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
Enzyklopädie der Rechts- und Staatswissenschaft, Abteilung Staatswissenschaft.
ISBN 978-3-662-21965-2
- Haag 2013** Haag, Holger, 2013. *Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion*. Stuttgart: Fraunhofer-Verl.
Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 11.
ISBN 978-3-8396-0547-9

- Häckel et al. 2019** Häckel, Björn; Übelhör, Jochen, 2019. Digitale Geschäftsmodelle in der Industrie: Eine Analyse der Auswirkungen und Herausforderungen. In: Meinhardt, Stefan; Pflaum, Alexander (Hrsg.): *Digitale Geschäftsmodelle*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 167–181
ISBN 978-3-658-26315-7
DOI: 10.1007/978-3-658-26316-4_9
- Hackstein 1984** Hackstein, Rolf, 1984. *Produktionsplanung und -steuerung (PPS): Ein Handbuch für die Betriebspraxis*. Düsseldorf: VDI-Verl.
ISBN 3184006107
- Häfner 2018** Häfner, Lukas, 2018. Demand Side Management. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik* **55** (3), S. 627–645
DOI: 10.1365/s40702-017-0363-9
- Heinemeyer 1992** Heinemeyer, Wolfgang, 1992. Die Planung und Steuerung des logistischen Prozesses mit Fortschrittszahlen. In: Adam, Dietrich (Hrsg.): *Fertigungssteuerung*. Wiesbaden: Gabler Verlag, S. 161–188
ISBN 978-3-409-17916-4
DOI: 10.1007/978-3-322-89141-9_9
- Hernández Morales 2003** Hernández Morales, Roberto, 2003. *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*. Düsseldorf: VDI Verlag. Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 16, Technik und Wirtschaft Nr. 149.
ISBN 9783183149162
- Herold 2011** Herold, Gerhard, 2011. *Drehstromsysteme, Leistungen, Wirtschaftlichkeit*. 3., überarb. Aufl. Wilburgstetten: Schlembach. Elektrische Energieversorgung.
ISBN 9783935340694
- Hesse et al. 1994** Hesse, Wolfgang; Barkow, Georg; Braun, Hubert v; Kittlaus, Hans-Bernd; Scheschonk, Gert, 1994. Terminologie der Softwaretechnik, Ein Begriffssystem für die Analyse und Modellierung von Anwendungssystemen, Teil 2: Tätigkeits- und ergebnisbezogene Elemente. *Informatik Spektrum* **17** (2), S. 96–105

- Heuck et al. 2013** Heuck, Klaus; Dettmann, Klaus-Dieter; Schulz, Detlef, 2013.
Elektrische Energieversorgung.
Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN 978-3-8348-1699-3
DOI: 10.1007/978-3-8348-2174-4
- Hochreiter 1999** Hochreiter, Thomas A., 1999.
comparative simulation study of Kanban, CONWIP, and MRP manufacturing control systems in a flow-shop.
Florida, University of Florida, 1999.
etd.fcla.edu/etd/uf/1999/amg2162/hochreiter_t.pdf
- Hommelberg et al. 2008** Hommelberg, Maarten P.F; van der Velde, Jorgen; Warmer, Cor; Kamphuis, Rene; Kok, Koen, 2008.
A novel architecture for real-time operation of multi-agent based coordination of demand and supply.
In: *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 7/20/2008 - 7/24/2008, Pittsburgh, PA, USA*, S. 1–5
- Hopmann et al. 2017** Hopmann, Christian; Michaeli, Walter; Greif, Helmut; Ehrig, Frank, 2017.
Technologie des Spritzgießens: Lern- und Arbeitsbuch.
4. Auflage.
München: Carl Hanser Verlag.
Hanser eLibrary.
ISBN 978-3-446-45404-0
- Horx et al. 2019** Horx, Matthias; Boeing, Niels; Gatterer, Harry; Horx-Strathern, Oona; Horx, Tristan; Kirig, Anja; Lanzinger, Christof; Papasabbas, Lena; Schuldt, Christian; Seitz, Janine; Tajmar, Martin, 2019.
Zukunftsreport 2019: Das Jahrbuch für gesellschaftliche Trends und Business-Innovationen.
Frankfurt am Main: Zukunftsinstitut.
ISBN 978-3-945647-56-1
- Hülsmann et al. 2011** Hülsmann, Michael; Scholz-Reiter, Bernd; Windt, Katja, 2011.
Autonomous Cooperation and Control in Logistics: Contributions and Limitations - Theoretical and Practical Perspectives.
Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN 978-3-642-19468-9

- Jodlbauer 2007** Jodlbauer, Herbert, 2007.
Produktionsoptimierung: Wertschaffende sowie kundenorientierte Planung und Steuerung.
Wien: Springer Wien.
ISBN 978-3-211-78140-1
DOI: 10.1007/978-3-211-78141-8
- Joos 2014** Joos, Thomas, 2014.
Controlling, Kostenrechnung und Kostenmanagement.
Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN 978-3-658-01343-1
DOI: 10.1007/978-3-658-01344-8
- Junge 2007** Junge, Mark, 2007.
Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung.
Kassel, Universität Kassel, Institut für Produktionstechnik und Logistik (IPL), Dissertation, 2007.
urn:nbn:de:0002-3016
- Keller et al. 2015** Keller, Fabian; Reinhart, Gunther, 2015. Produktionsplanung unter Berücksichtigung des Energiebezugs.: Energie: Mengen, Kosten, Beschaffung und Erzeugung am Standort als neue Randbedingungen.
wt Werkstattstechnik online **105** (3), S. 141–147
- Keller et al. 2016a** Keller, Fabian; Schultz, Cedric; Braunreuther, Stefan; Reinhart, Gunther, 2016. Enabling Energy-Flexibility of Manufacturing Systems through New Approaches within Production Planning and Control.
Procedia CIRP **57**, S. 752–757
DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.130
- Keller et al. 2016b** Keller, Fabian; Reinhart, Gunther, 2016. Energy Supply Orientation in Production Planning Systems.
Procedia CIRP **40**, S. 244–249
DOI: 10.1016/j.procir.2016.01.113
- Keller et al. 2016c** Keller, Fabian; Braunreuther, Stefan; Reinhart, Gunther, 2016. Integration of On-site Energy Generation into Production Planning Systems.
Procedia CIRP **48**, S. 254–258
DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.158

- Keller 2018** Keller, Fabian Karl, 2018.
Methodik zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung, Diss. TU München.
München: Herbert Utz Verlag.
Forschungsberichte IWB Band 341.
ISBN 978-3-8316-7433-6
- Kiank et al. 2010** Kiank, Hartmut; Fruth, Wolfgang, 2010.
Planungsleitfaden für Energieverteilungsanlagen: Konzeption, Umsetzung und Betrieb von Industrienetzen.
Hoboken: John Wiley & Sons.
ISBN 978-3-89578-359-3
- Kienzle 2011** Kienzle, Florian, 2011.
Fertigungssteuerung in der Musterfertigung von Systemlieferanten.
Chemnitz, Technischen Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2011.
urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-81248
- Klobasa 2009** Klobasa, Marian, 2009.
Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz.
Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl.
ISI-Schriftenreihe "Innovationspotenziale".
ISBN 9783816779919
- Koether 2011** Koether, Reinhard, 2011.
Taschenbuch der Logistik.
München: Carl Hanser Verlag.
ISBN 978-3-446-42512-5
- Konstantin 2009** Konstantin, Panos, 2009.
Praxisbuch Energiewirtschaft.
Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN 978-3-540-78591-0
DOI: 10.1007/978-3-540-78592-7
- Köse et al. 2019** Köse, Ekrem; Sauer, Alexander; Bark, Cyrus; Tauporn, Thomas, 2019.
Nichteisenmetalldruckguss.
In: Sauer, Alexander; Abele, Eberhard; Buhl, Hans U. (Hrsg.): *Energieflexibilität in der deutschen Industrie*.
Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 559–578
ISBN 978-3-8396-1479-2

- Kreith et al. 2007** Kreith, Frank; Goswami, D. Yogi (Hrsg.), 2007. *Handbook of energy efficiency and renewable energy*. Boca Raton: Taylor & Francis. ISBN 0849317304
- Kubicek 1976** Kubicek, Herbert, 1976. *Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesign als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung*. Berlin: Inst. für Unternehmensführung im Fachbereich Wirtschaftswiss. d. Freien Univ. Arbeitspapier Nr. 16. ISBN 3-88398-016-1
- Kuhlmann et al. 2017** Kuhlmann, Timm; Bechtoldt, Thorben; Sauer, Alexander, 2017. Dezentrales Netzmanagement in einem industriellen DC-Netz. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **112** (11), S. 797–801
DOI: 10.3139/104.111771
- Kurzweil 1999** Kurzweil, Peter, 1999. *Das Vieweg Einheiten-Lexikon: Formeln und Begriffe aus Physik, Chemie und Technik*. Braunschweig: Vieweg. Studium und Praxis. ISBN 3528069872
- Küster et al. 2013** Küster, Tobias; Lützenberger, Marco; Freund, Daniel; Albayrak, Sahin, 2013. Distributed Evolutionary Optimisation for Electricity Price Responsive Manufacturing using Multi-Agent System Technology. *International Journal On Advances in Intelligent Systems* **6** (1), S. 27–40
- Land 2004** Land, Martin J., 2004. *Workload control in job shops, grasping the tap*. Ridderkerk: Labyrinth Publications. ISBN 90-5335-027-6
- Land 2008** Land, Martin J., 2008. Cobacabana (control of balance by card-based navigation): A card-based system for job shop control. *International Journal of Production Economics* **117** (1), S. 97–103
DOI: 10.1016/j.ijpe.2008.08.057
- Langer et al. 2014** Langer, Tino; Schlegel, Andreas; Stoldt, Johannes; Putz, Matthias, 2014. A Model-based Approach to Energy-saving Manufacturing Control Strategies. *Procedia CIRP* **15**, S. 123–128
DOI: 10.1016/j.procir.2014.06.019

- Langrock et al. 2015** Langrock, Thomas; Achner, Sigggi; Jungbluth, Christian; Marambio, Constanze; Michels, Armin; Weinhard, Paul; Baumgart, Bastian; Otto, Achim, 2015. *Potentiale regelbarer Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energien*. Dessau-Roßlau
Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_19_2015_potentiale_regelbarer_lasten.pdf
- Lauber et al. 1999** Lauber, Rudolf; Göhner, Peter, 1999. *Prozessautomatisierung 2*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-65319-6
DOI: 10.1007/978-3-642-58447-3
- Le et al. 2013** Le, Cao Vinh; Pang, Chee Khiang, 2013. Fast reactive scheduling to minimize tardiness penalty and energy cost under power consumption uncertainties. *Computers & Industrial Engineering* **66** (2), S. 406–417
DOI: 10.1016/j.cie.2013.07.006
- Leo et al. 2018** Leo, Egidio; Engell, Sebastian, 2018. Integrated day-ahead energy procurement and production scheduling. *at - Automatisierungstechnik* **66** (11), S. 950–963
DOI: 10.1515/auto-2018-0016
- Li et al. 2017** Li, Yi-Chang; Hong, Seung Ho, 2017. Real-Time Demand Bidding for Energy Management in Discrete Manufacturing Facilities. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **64** (1), S. 739–749
DOI: 10.1109/TIE.2016.2599479
- Li et al. 2012** Li, Lin; Sun, Zeyi; Tang, Zhijun, 2012. Real time electricity demand response for sustainable manufacturing systems: Challenges and a case study. In: *2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 8/20/2012 - 8/24/2012, Seoul, Korea (South), S. 353–357

- Liu et al. 2014** Liu, Ying; Dong, Haibo; Lohse, Niels; Petrovic, Sanja; Gindy, Nabil, 2014. An investigation into minimising total energy consumption and total weighted tardiness in job shops.
Journal of Cleaner Production **65**, S. 87–96
DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.07.060
- Liu 2015** Liu, Cheng-Hsiang, 2015. Mathematical programming formulations for single-machine scheduling problems while considering renewable energy uncertainty.
International Journal of Production Research **54** (4), S. 1122–1133
DOI: 10.1080/00207543.2015.1048380
- Liu et al. 2019** Liu, Xinyue; Wang, Liming; Kong, Lin; Li, Fangyi; Li, Jianfeng, 2019. A Hybrid Genetic Algorithm for Minimizing Energy Consumption in Flow Shops Considering Ultra-low Idle State.
Procedia CIRP **80**, S. 192–196
DOI: 10.1016/j.procir.2018.12.013
- Lödding 2001** Lödding, Hermann, 2001.
Dezentrale bestandsorientierte Fertigungsregelung,
Diss. Uni. Hannover.
Als Ms. gedr.
Düsseldorf: VDI-Verl.
Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Fertigungstechnik
587.
ISBN 3183587025
- Lödding 2008** Lödding, Hermann, 2008.
Ein Modell der Fertigungssteuerung — Logistische Ziele systematisch erreichen.
In: Nyhuis, Peter (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*.
Berlin, Heidelberg: Springer, S. 219–233
ISBN 978-3-540-75641-5
DOI: 10.1007/978-3-540-75642-2_10
- Lödding 2010** Lödding, Hermann, 2010.
Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration.
2., erw. Aufl.
Berlin: Springer.
VDI.
ISBN 978-3-540-76859-3

- Luo et al. 2013** Luo, Hao; Du, Bing; Huang, George Q; Chen, Huaping; Li, Xiaolin, 2013. Hybrid flow shop scheduling considering machine electricity consumption cost. *International Journal of Production Economics* **146** (2), S. 423–439
DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.01.028
- Lutz et al. 2015** Lutz, Christian; Großmann, Anett; Flaute, Markus; Grave, Katharina; Blücher, Felix von; Hazrat, Mandana; Breitschopf, Barbara; Friedrichsen, Nele; Arens, Marlene; Aydemir, Ali, 2015. *Wettbewerbsfähigkeit und Energiekosten der Industrie im internationalen Vergleich*. Berlin.
Verfügbar unter: https://www.isi.fraunhofer.de/de/competence-center/energiepolitik-energiemaerkte/projekte/strompreiswirkung_330639.html
Zugriff am: 01.05.2019
- Meissner et al. 2017** Meissner, Hermann; Ilsen, Rebecca; Aurich, Jan C., 2017. Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0. *Procedia CIRP* **62**, S. 165–169
DOI: 10.1016/j.procir.2016.06.113
- Meudt et al. 2017** Meudt, Tobias; Pohl, Malte; Metternich, Joachim, 2017. *Die Automatisierungspyramide - Ein Literaturüberblick*. Darmstadt
Verfügbar unter: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/6298/>
- Mietzner 2009** Mietzner, Dana, 2009. Unterschiedliche Ansätze der Szenarioanalyse. In: Mietzner, Dana (Hrsg.): *Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen*. Wiesbaden: Gabler, S. 117–161
ISBN 978-3-8349-1687-7
DOI: 10.1007/978-3-8349-8382-4_5
- Mitra et al. 2012** Mitra, Sumit; Grossmann, Ignacio E; Pinto, Jose M; Arora, Nikhil, 2012. Optimal production planning under time-sensitive electricity prices for continuous power-intensive processes. *Computers & Chemical Engineering* **38**, S. 171–184
DOI: 10.1016/j.compchemeng.2011.09.019
- Moon et al. 2014** Moon, Joon-Yung; Park, Jinwoo, 2014. Smart production scheduling with time-dependent and machine-dependent electricity cost by considering distributed energy resources and energy storage.

International Journal of Production Research **52** (13),
S. 3922–3939

DOI: 10.1080/00207543.2013.860251

Müller et al. 2009

Müller, Egon; Engelmann, Jörg; Löffler, Thomas;
Strauch, Jörg, 2009.

Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben.

Berlin, Heidelberg: Springer

DOI: 10.1007/978-3-540-89644-9

Nayak et al. 2019

Nayak, Ashutosh; Lee, Seokcheon; Sutherland, John
W., 2019. Dynamic Load Scheduling for Energy Effi-
ciency in a Job Shop with On-site Wind Mill for Energy
Generation.

Procedia CIRP **80**, S. 197–202

DOI: 10.1016/j.procir.2018.12.003

Netzregelverbund 2018

Netzregelverbund, 2018.

Allgemeines zur Regelleistung - Technische Aspekte.

Verfügbar unter: [https://www.regelleis-
tung.net/ext/static/technical](https://www.regelleis-
tung.net/ext/static/technical)

Zugriff am: 01.04.2019

Neugebauer et al. 2012

Neugebauer, Reimund; Putz, Matthias; Schlegel, An-
dreas; Langer, Tino; Franz, Enrico; Lorenz, Sören,
2012.

Energy-Sensitive Production Control in Mixed Model
Manufacturing Processes.

In: Dornfeld, David A; Linke, Barbara S. (Hrsg.): *Lever-
aging Technology for a Sustainable World*: Springer

Berlin Heidelberg, S. 399–404

ISBN 978-3-642-29068-8

DOI: 10.1007/978-3-642-29069-5_68

Niehues 2017

Niehues, Michael Richard, 2017.

*Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattferti-
gungssysteme durch fertigungsbegleitende Reihenfol-
gebildung*, Diss. TU München.

München: Utz, Herbert.

Forschungsberichte IWB 329.

ISBN 978-3-8316-4650-0

Nogowizin 2011

Nogowizin, Boris, 2011.

Theorie und Praxis des Druckgusses.

Berlin: Schiele & Schön.

ISBN 3794907965

Nyhuis 2008

Nyhuis, Peter, 2008.

Beiträge zu einer Theorie der Logistik.

Dordrecht: Springer.

ISBN 978-3-540-75642-2

- Nyhuis et al. 2009** Nyhuis, Peter; Hartmann, Wiebke; Kennemann, Marco; Münzberg, Ben, 2009. Produktionsregelung mit logistischen Kennlinien: Fertigungssteuerung auf Basis einer kaskadierten Regelung.
wt Werkstattstechnik online (4), S. 239–243
- Nyhuis 2012** Nyhuis, Peter, 2012.
Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen.
Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN 978-3-540-92838-6
- OECD 2002** OECD, 2002.
Frascati Manual 2002: Proposed Standard Practice for Surveys on Research and Experimental Development.
6. Auflage.
Paris: OECD.
ISBN 9789264199033
DOI: 10.1787/9789264199040-en
- Ōno 2005** Ōno, Taiichi, 2005.
Das Toyota-Produktionssystem.
Frankfurt, New York: Campus-Verl.
ISBN 3593378019
- Ott et al. 2015** Ott, Leopold; Han, Yunchao; Wunder, Bernd; Kaiser, Julian; Fersterra, Fabian; Schulz, Matthias; Marz, Martin, 2015.
An advanced voltage droop control concept for grid-tied and autonomous DC microgrids.
In: *2015 IEEE International Telecommunications Energy*, S. 1–6
DOI: 10.1109/INTLEC.2015.7572406
- Palensky et al. 2011** Palensky, Peter; Dietrich, Dietmar, 2011. Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads.
IEEE Transactions on Industrial Informatics **7** (3), S. 381–388
DOI: 10.1109/TII.2011.2158841

- Pechmann et al. 2012** Pechmann, Agnes; Schöler, Ilka; Hackmann, Rene, 2012.
Energy Efficient and Intelligent Production Scheduling – Evaluation of a New Production Planning and Scheduling Software.
In: Dornfeld, David A; Linke, Barbara S. (Hrsg.): *Leveraging Technology for a Sustainable World*: Springer Berlin Heidelberg, S. 491–496
ISBN 978-3-642-29068-8
DOI: 10.1007/978-3-642-29069-5_83
- Popp et al. 2014a** Popp, Richard S.H; Zaeh, Michael F., 2014. Determination of the Technical Energy Flexibility of Production Systems.
Advanced Materials Research **1018**, S. 365–372
DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.365
- Popp et al. 2014b** Popp, Richard S.H; Zaeh, Michael F., 2014. Steuerung des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen; Beeinflussung der Leistungsaufnahme spanender Werkzeugmaschinen ohne Prozessauswirkungen.
wt Werkstattstechnik online **104** (6), S. 413–417
- Popp et al. 2016** Popp, Richard S.-H; Liebl, Corinna; Zaeh, Michael F., 2016. Energy Flexible Machine tool Components – An Investigation of Capabilities.
Procedia CIRP **57**, S. 692–697
DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.120
- Putz et al. 2012** Putz, Matthias; Schlegel, Andreas; Franz, Enrico; Langer, Tino; Stoldt, Johannes, 2012.
Energy-sensitive control strategies for discrete parts manufacturing.
In: Seliger, Günther; Kiliç, S. E. (Hrsg.): *Towards implementing sustainable manufacturing*.
Istanbul: CIRP, S. 482–487
ISBN 6056346315
- Qiu et al. 2018** Qiu, Yueming; Kirkeide, Loren; Wang, Yi David, 2018. Effects of Voluntary Time-of-Use Pricing on Summer Electricity Usage of Business Customers.
Environmental and Resource Economics **69** (2), S. 417–440
DOI: 10.1007/s10640-016-0084-5
- Rager 2008** Rager, Markus, 2008.
Energieorientierte Produktionsplanung: Analyse, Konzeption und Umsetzung.
Wiesbaden: Gabler.
Gabler Edition Wissenschaft.
ISBN 9783835009875
DOI: 10.1007/978-3-8350-5569-8

- Reibnitz 1991** Reibnitz, Ute von, 1991.
Szenario-Technik: Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung.
Wiesbaden: Gabler.
ISBN 340913431X
- Reimer et al. 1968** Reimer; von Vinzenz, 1968.
Druckguss: 2., neubearbeitete Aufl.
2., neubearbeitete Auflage.
München: Hanser
- Reinhart et al. 2012** Reinhart, Gunther; Reinhardt, Sasika; Graßl, Markus, 2012. Energieflexible Produktionssysteme: Einführungen zur Bewertung der Energieeffizienz von Produktionssystemen.
wt Werkstattstechnik online **102** (9), S. 622–628
- Reinhart et al. 2014** Reinhart, Gunther; Graßl, Markus; Datzmann, Sarah, 2014. Methode zur Bewertung der Energieflexibilität.
wt Werkstattstechnik online **104** (5), S. 313–319
- Roesch et al. 2019** Roesch, Martin; Lukas, Martin; Schultz, Cedric; Bra unreuther, Stefan; Reinhart, Gunther, 2019. An approach towards a cost-based production control for energy flexibility.
Procedia CIRP **79**, S. 227–232
DOI: 10.1016/j.procir.2019.02.054
- Röhle et al. 2015** Röhle, Hans-Joachim; Wiegmann, Thomas, 2015. Bewertungsmaßstäbe nach HGB und EStG.
In: Röhle, Hans J; Wiegmann, Thomas (Hrsg.): *Rechnungswesen für Steuerfachwirte.*
Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, S. 129–172
ISBN 978-3-658-06148-7
DOI: 10.1007/978-3-658-06149-4_5
- Roon et al. 2010** Roon, Serafin von; Grobmaier, Thomas, 2010.
Demand Response in der Industrie: Status und Potenziale in Deutschland.
München.
Verfügbar unter: <https://www.ffe.de/publikationen/veroeffentlichungen/344-demand-response>
Zugriff am: 01.04.2019
- Roth 2016** Roth, Armin (Hrsg.), 2016.
Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0: Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis.
Berlin, Heidelberg: Springer Gabler.
ISBN 9783662485057
- Rüth 2012** Rüth, Dieter, 2012.
Kostenrechnung.

3., überarb. Aufl.
München: Oldenbourg.
ISBN 9783486702156

Saltelli et al. 2002

Saltelli, Andrea; Tarantola, Stefano; Campolongo, Francesca; Ratto, Marco, 2002.
Sensitivity Analysis in Practice.
Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
ISBN 0470870931
DOI: 10.1002/0470870958

Samad et al. 2012

Samad, Tariq; Kiliccote, Sila, 2012. Smart grid technologies and applications for the industrial sector.
Computers & Chemical Engineering **47**, S. 76–84
DOI: 10.1016/j.compchemeng.2012.07.006

Sauer et al. 2016

Sauer, Alexander; Weckmann, Sebastian; Zimmermann, Fabian, 2016.
Softwarelösungen für das Energiemanagement von morgen: Eine vergleichende Studie.
Stuttgart.
Verfügbar unter: <https://www.eep.uni-stuttgart.de/institut/publikationen>
Zugriff am: 01.08.2019

Sauer et al. 2017

Sauer, Alexander; Weckmann, Sebastian, 2017.
Industrial Smart Grid - Ein Beitrag für ein nachhaltiges Energiesystem.
In: Hildebrandt, Alexandra; Landhäußer, Werner (Hrsg.): *CSR und Digitalisierung*.
Berlin, Heidelberg: Springer, S. 209–226
ISBN 978-3-662-53201-0

Schaab et al. 2018

Schaab, Darian Andreas; Weckmann, Sebastian; Kuhlmann, Timm; Sauer, Alexander, 2018. Simulative Analysis of a Flexible, Robust and Sustainable Energy Supply through Industrial Smart-DC-Grid with Distributed Grid Management.
Procedia CIRP **69**, S. 366–370
DOI: 10.1016/j.procir.2017.11.037

Schlechtendahl et al. 2016

Schlechtendahl, Jan; Eberspächer, Philipp; Schraml, Philipp; Verl, Alexander; Abele, Eberhard, 2016. Multi-level Energy Demand Optimizer System for Machine Tool Controls.
Procedia CIRP **41**, S. 783–788
DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.030

- Schmigalla 1995** Schmigalla, Hans, 1995.
Fabrikplanung: Begriffe und Zusammenhänge : im Auftrag des VDA-AK Arbeitsgruppe "Rechnerunterstützte Fabrikplanung".
München: Carl Hanser.
REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation.
ISBN 3-446-18572-0
- Schneeweiß 1989** Schneeweiß, Christoph, 1989.
Einführung in die Produktionswirtschaft.
Dritte, revidierte Auflage.
Berlin, Heidelberg: Springer.
Heidelberger Taschenbücher 244.
ISBN 978-3-662-06873-1
- Schnell et al. 2011** Schnell, Rainer; Esser, Elke; Hill, Paul B., 2011.
Methoden der empirischen Sozialforschung.
9., unveränd. Aufl.
München: Oldenbourg.
Lehrbuch.
ISBN 978-3486591064
- Scholz-Reiter et al. 2007** Scholz-Reiter, Bernd; Freitag, Michael, 2007. Autonomous Processes in Assembly Systems.
CIRP Annals **56** (2), S. 712–729
DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.002
- Schönsleben 2002** Schönsleben, Paul (Hrsg.), 2002.
Integrales Logistikmanagement.
Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
ISBN 978-3-662-07921-8
DOI: 10.1007/978-3-662-07920-1
- Schraml 2018** Schraml, Philipp, 2018.
Methode zur Reduktion maximaler elektrischer Lasten spanender Werkzeugmaschinen, Diss. TU Darmstadt.
Aachen: Shaker.
Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik".
ISBN 978-3-8440-5833-8
- Schuh et al. 2014** Schuh, Günther; Potente, Till; Wesch-Potente, Cathrin; Weber, Anja Ruth; Prote, Jan-Philipp, 2014.
Collaboration Mechanisms to Increase Productivity in the Context of Industrie 4.0.
Procedia CIRP **19**, S. 51–56
DOI: 10.1016/j.procir.2014.05.016

- Schuh et al. 2015** Schuh, Günther; Brandenburg, Ulrich; Liu, Yuan, 2015. Evaluation of Demand Response Actions in Production Logistics.
Procedia CIRP **29**, S. 173–178
DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.161
- Schukraft et al. 2015** Schukraft, Susanne; Grundstein, Sebastian; Freitag, Michael; Scholz-Reiter, Bernd, 2015. Strategies for the Coupling of Autonomous Control and Central Planning: Evaluation of Strategies Using Logistic Objectives Achievement and Planning Adherence.
In: *IEEE International Conference on Systems Management*, S. 121–126
DOI: 10.1109/SMC.2015.34
- Schulte 2009** Schulte, Christof, 2009.
Logistik: Wege zur Optimierung der Supply Chain.
5., überarb. und erw. Aufl.
München: Vahlen.
ISBN 9783800635160
- Schultz 2018** Schultz, Cedric Martin, 2018.
System zur energieorientierten Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung.
München, TU München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Dissertation, 2018.
urn:nbn:de:bvb:91-diss-20181011-1402922-1-1
- Seitz 1962** Seitz, R., 1962. Ermittlung kürzester Durchlaufzeiten auf Fertigungsstraßen.
Unternehmensforschung Operations Research - Recherche Opérationnelle **6** (4), S. 167–192
DOI: 10.1007/BF01920853
- Shrouf et al. 2014** 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.
Journal of Cleaner Production **67**, S. 197–207
DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.12.024
- Patentschrift Patentschrift: DE102015202412A1 2015** Siemens AG, 2016.
Betriebsverfahren zum Lastmanagement einer Anlage und zugehöriger Betriebsmittelagent.
Patentschrift: DE102015202412A1,
11.08.2016

- Spearman et al. 1989** Spearman, Mark L; Hopp, Wallace J; Woodruff, David L., 1989. A hierarchical control architecture for constant work-in-process (CONWIP) production systems. *Journal of Manufacturing and Operations Management* (2), S. 147–171
- Spearman et al. 1990** Spearman, Mark L; Woodruff, David L; Hopp, Wallace J., 1990. CONWIP: a pull alternative to kanban. *International Journal of Production Research* **28** (5), S. 879–894
DOI: 10.1080/00207549008942761
- Spur et al. 2013** Spur, Günter; Michaeli, Walter; Bührig-Polaczek, Andreas, 2013.
Handbuch Urformen.
2. Auflage.
München: Carl Hanser.
ISBN 978-3-446-42035-9
- Staden et al., 2009** Staden, Adam Jacobusvan; Zhang, Jiangfeng; Xia, Xiaohua, 2009.
A model predictive control strategy for load shifting in a water pumping scheme with maximum demand charges.
In: *2009 IEEE Bucharest Power Tech*,
6/28/2009 - 7/2/2009, Bucharest, Romania, S. 1–7
- Strack 1987** Strack, Marei, 1987.
Organisatorische Gestaltung einer zentralen Werkstattsteuerung: Diss. RWTH Aachen: Springer Berlin Heidelberg.
Forschung für die Praxis Band 10.
ISBN 9783642830372
Verfügbar unter:
<https://books.google.de/books?id=ljzPBgAAQBAJ>
- Sumit Mitra et al. 2012** Sumit Mitra; Ignacio E. Grossmann; Jose M. Pinto; Nikhil Arora, 2012. Optimal production planning under time-sensitive electricity prices for continuous power-intensive processes.
Computers and Chemical Engineering (38), S. 171–184
- Sun et al. 2014** Sun, Zeyi; Li, Lin; Fernandez, Mayela; Wang, Jianhui, 2014. Inventory control for peak electricity demand reduction of manufacturing systems considering the tradeoff between production loss and energy savings.
Journal of Cleaner Production **82**, S. 84–93
DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.06.071
- Suri 1998** Suri, Rajan, 1998. Don't Push or Pull - POLCA.
APICS – The Performance Advantage **8** (11), S. 32–37

- Thürer et al. 2012** Thürer, Matthias; Stevenson, Mark; Silva, Cristavao; Land, Martin J; Fredendall, Lawrence D., 2012. Work-load Control and Order Release: A Lean Solution for Make-to-Order Companies. *Production and Operations Management* **21** (5), S. 939–953
DOI: 10.1111/j.1937-5956.2011.01307.x
- Thürer et al. 2015** Thürer, Matthias; Stevenson, Mark; Protzman, Charles W., 2015. COBACABANA (Control of Balance by Card Based Navigation): An alternative to kanban in the pure flow shop? *International Journal of Production Economics* **166**, S. 143–151
DOI: 10.1016/j.ijpe.2015.05.010
- Tröster 2015** Tröster, Fritz, 2015. *Steuerungstechnik*. 4th ed. Berlin: De Gruyter Oldenbourg. De Gruyter Studium / Fritz Tröster ; 2. ISBN 978-3-11-041730-2
DOI: 10.1515/9783110417302
- Ulrich 1981** Ulrich, Hans, 1981. Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft. In: Sandig, Curt; Geist, Manfred N; Köhler, Richard (Hrsg.): *Die Führung des Betriebes*. Stuttgart: Poeschel, S. 3–24
ISBN 3791003089
- Ulrich 2001** Ulrich, Hans, 2001. *Systemorientiertes Management: Das Werk von Hans Ulrich*. Gekürzte Studienausg. Bern: Haupt. ISBN 978-3-258-06359-1
- AbLaV 2016** AbLaV Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten (Verordnung zu abschaltbaren Lasten AbLaV), Fassung vom Zuletzt geändert durch Art. 9 G v. 22.12.2016 I 3106

- Wang et al. 2013** Wang, Yong; Li, Lin, 2013. Time-of-use based electricity demand response for sustainable manufacturing systems.
Energy **63**, S. 233–244
DOI: 10.1016/j.energy.2013.10.011
- Wang et al. 2016** Wang, Yong; Li, Lin, 2016. Critical peak electricity pricing for sustainable manufacturing: Modeling and case studies.
Applied Energy **175**, S. 40–53
DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.04.100
- Warnecke 1989** Warnecke, Hans-Jürgen, 1989. Die Produktion als Regelkreis, Überlegungen zu seiner Gestaltung.
Automatisierungstechnische Praxis atp **31** (Nr. 3), S. 110–115
- Weckmann et al. 2017** Weckmann, Sebastian; Schaab, Darian Andreas; Kuhlmann, Timm; Sauer, Alexander, 2017. Netzmanagement für ein industrielles DC-Smart Grid: Dezentraler Netzmanagementansatz zur effizienten Sicherung der Energieversorgung.
wt Werkstattstechnik online (9), S. 603–609
- Weidling 1935** Weidling, Otto, 1935.
Der Elektromotor für die Werkzeugmaschine.
Vienna: Springer Vienna.
Werkstattbücher.
ISBN 978-3-7091-5046-7
- Weinert et al. 2011** Weinert, Nils; Chiotellis, Stylianos; Seliger, Günther, 2011. Methodology for planning and operating energy-efficient production systems.
CIRP Annals **60** (1), S. 41–44
DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.015
- Weinert et al. 2016** Weinert, Nils; Mose, Christian, 2016. Electrical Load Management for Production Equipment Applying a Decentralized Optimization Approach.
Procedia CIRP **48**, S. 259–264
DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.151
- Weiß 2018** Weiß, Benno, 2018.
A concept for a DC grid in industrial production.
Verfügbar unter: <https://dc-industrie.zvei.org/>
Zugriff am: 07.02.2019
- Westkämper 2006** Westkämper, Engelbert, 2006.
Einführung in die Organisation der Produktion.
Berlin, Heidelberg: Springer.
Springer-Lehrbuch.
ISBN 978-3-540-26039-4

- Wiendahl et al. 1993a** Wiendahl, Hans-Peter; Pritschow, Günter; Milberg, Joachim, 1993a. Produktionsregelung - interdisziplinäre Zusammenarbeit führt zu neuen Ansätzen: Teil 1.
ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (6), S. 265–268
- Wiendahl et al. 1993b** Wiendahl, Hans-Peter; Pritschow, Günter; Milberg, Joachim, 1993b. Produktionsregelung - interdisziplinäre Zusammenarbeit führt zu neuen Ansätzen: Teil 2.
ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (7-8), S. 352–354
- Wiendahl 1987a** Wiendahl, Hans-Peter, 1987.
Belastungsorientierte Fertigungssteuerung: Grundlagen, Verfahrensaufbau, Realisierung.
München: Hanser.
ISBN 3446145923
- Wiendahl 1987b** Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.), 1987.
Belastungsorientierte Fertigungssteuerung BOS-F: Praxis und Weiterentwicklung.
München: Hanser.
ISBN 392448340X
- Wiendahl 1997** Wiendahl, Hans-Peter, 1997.
Fertigungsregelung: Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells.
München: Hanser.
ISBN 3446190848
- Wiendahl 2014** Wiendahl, Hans-Peter, 2014.
Betriebsorganisation für Ingenieure.
8. überarbeitete Auflage.
München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
ISBN 978-3-446-44053-1
- Willeke et al. 2014** Willeke, Stefan; Wesebaum, Sören; Ullmann, Georg; Nyhuis, Peter, 2014. Energiekosteneffiziente Fertigungssteuerung.
ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb **109** (5), S. 328–331
DOI: 10.3139/104.111150
- Willeke et al. 2015a** Willeke, Stefan; Wesebaum, Sören; Ullmann, Georg; Nyhuis, Peter, 2015. Energiekostenorientierte Reihenfolgebildung.
ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb **110** (9), S. 495–499
DOI: 10.3139/104.111368

- Willeke et al. 2015b** Willeke, Stefan; Wesebaum, Sören; Ullmann, Georg, 2015. Integration zeitvariabler Energiekosten in die Belastungsorientierte Auftragsfreigabe. *logistics journal*, S. 1–9
DOI: 10.2195/lj_NotRev_willeke_de_201507_01
- Willeke et al. 2017** Willeke, Stefan; Kuhrke, Benjamin; Kuschicke, Felix, 2017. Simulativer Vergleich zentraler und dezentraler Steuerungen einer Getriebefertigung: Simulative Comparison of Central and Decentralized Controls of a Transmission Production. In: Wenzel, Sigrid; Peter, Tim (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2017: Simulative Comparison of Central and Decentralized Controls of a Transmission Production*. Kassel: Kassel University Press, S. 249–258
ISBN 9783737601931
- Willeke et al. 2016** Willeke, Stefan; Ullmann, Georg; Nyhuis, Peter, 2016. Method for an Energy-Cost-Oriented Manufacturing Control to Reduce Energy Costs: Energy Cost Reduction by Using a New Sequencing Method. In: *ICIMSA 2016*, 5/23/2016 - 5/26/2016, Jeju, South Korea, S. 1–5
- Yang et al. 2018** Yang, Yingkui; Wang, Mingyue; Liu, Yu; Zhang, Li, 2018. Peak-off-peak load shifting: Are public willing to accept the peak and off-peak time of use electricity price? *Journal of Cleaner Production* **199**, S. 1066–1071
DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.181
- Yu et al. 2015** Yu, Mengmeng; Hong, Seung Ho, 2015. A Real-Time Demand-Response Algorithm for Smart Grids: A Stackelberg Game Approach. *IEEE Transactions on Smart Grid* **7** (2), S. 879–888
DOI: 10.1109/TSG.2015.2413813
- Yusta et al. 2010** Yusta, Jose M; Torres, Fernando; Khodr, Hussein M., 2010. Optimal methodology for a machining process scheduling in spot electricity markets. *Energy Conversion and Management* **51** (12), S. 2647–2654
DOI: 10.1016/j.enconman.2010.05.030

Zhou et al. 2013

Zhou, Zhichao; Li, Lin, 2013.

Real time electricity demand response for sustainable manufacturing systems considering throughput bottleneck detection.

In: *2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2013)*, 8/17/2013 - 8/20/2013, Madison, WI, USA, S. 640–644

Anhang

A	Studienarbeiten	242
B	Thematisch bezogene Veröffentlichungen des Autors	243
C	Datengrundlage Energiepreise.....	245
D	Reglungsarchitektur Druckguss.....	247
	<i>D.1</i> Regelung der Systemzustände	247
	D.2An- und Abschalten der Druckgießmaschine.....	251
	D.3An- und Abschalten des Ofens und der Heizkühlgeräte	258
E	Reglungsarchitektur Spritzguss.....	266

A Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Promotion sind die folgenden studentischen Arbeiten unter wissenschaftlicher Anleitung des Autors entstanden:

Zimmermann, F.	Indikatoren-Analyse und Marktentwicklungsszenarien der Elektromobilität
Licklederer, T.	Statische Modellierung von Industrial Smart Grids hinsichtlich Vernetzung und Datenfluss
Chang, J.	Energieorientierte Produktionssteuerung
Hao, J.	Energieflexibilität durch Produktionsplanung und –steuerung
Orozco Corredor, C.	Analyse und Simulation einer energie-sensitiven Produktionsplanung basierend auf Spannungsabweichungen im Netz
Martin, P.-G.	Energieflexible Regelung von Fertigungsprozessen

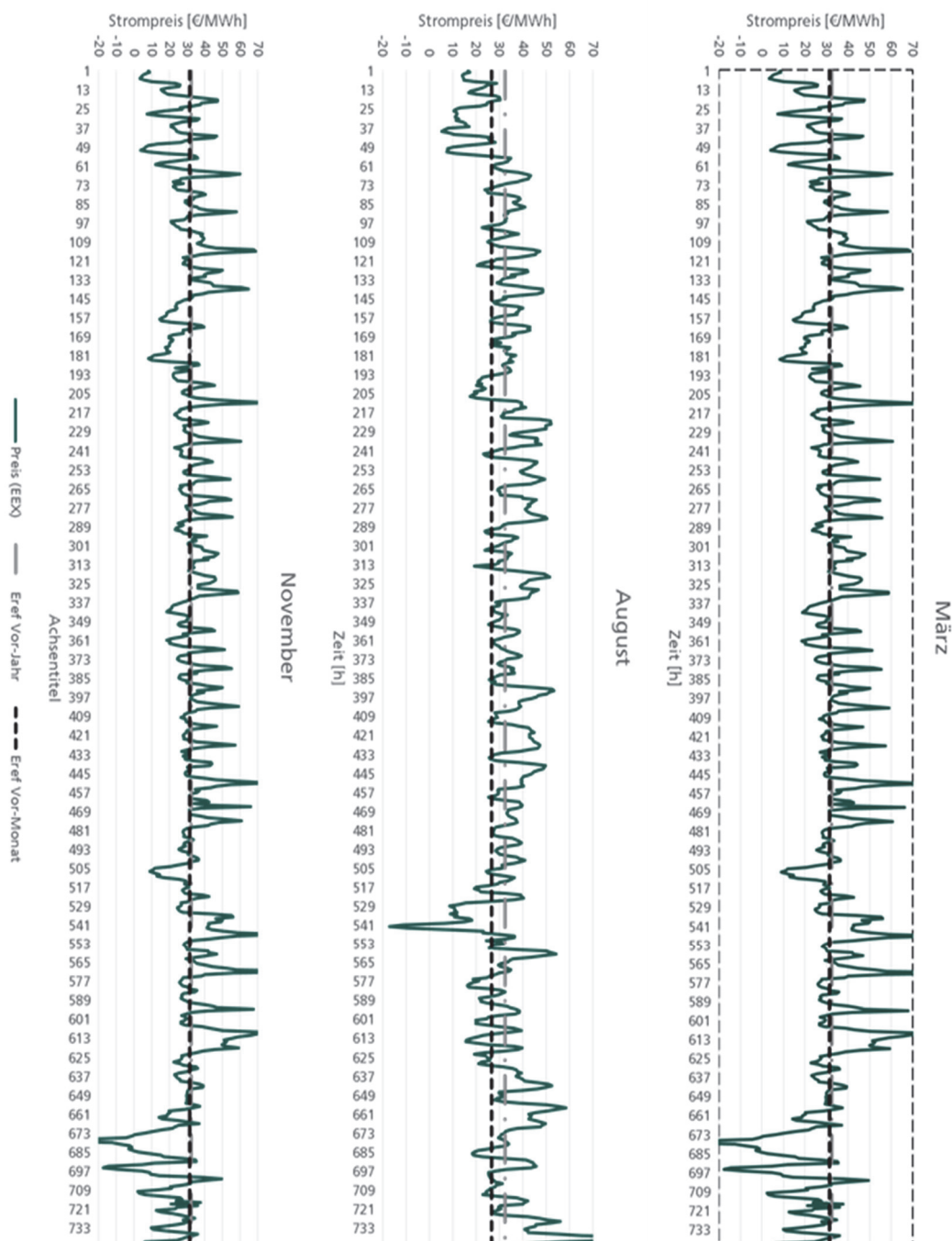
B Thematisch bezogene Veröffentlichungen des Autors

- Demand Side Management - Bewertung von Potenzialen auf Basis des Energiewertstroms
wt Werkstattstechnik online, 2016, Heftnummer 6, S. 462-468
- Softwarelösungen für das Energiemanagement von morgen – eine vergleichende Studie
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP), 2016, Online-verfügbar unter: <https://www.eep.uni-stuttgart.de/institut/publikationen/>
- Industrial Smart Grid - Ein Beitrag für ein nachhaltiges Energiesystem
Hildebrandt, Landhäußer (Hg.) 2017 – CSR und Digitalisierung, S. 209-226, ISBN 978-3-662-53201-0
- Decentral Energy Control in a Flexible Production to Balance Energy Supply and Demand
Procedia CIRP, 2017, S 428-433, DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.212
- Netzmanagement für ein industrielles DC-Smart Grid - Dezentraler Netzmanagementansatz zur effizienten Sicherung der Energieversorgung
wt Werkstattstechnik online, 2017, Heftnummer 9, S. 603-609
- Decentral Energy Control in a Flexible Production
7. WGP-Jahreskongress 2017, Online-verfügbar unter: <https://publications.rwth-aachen.de/record/710071?ln=de>
- Energieflexibilität in der Industrie - Eine Metastudie
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP), 2018, Online-verfügbar unter: <https://www.eep.uni-stuttgart.de/institut/publikationen/>

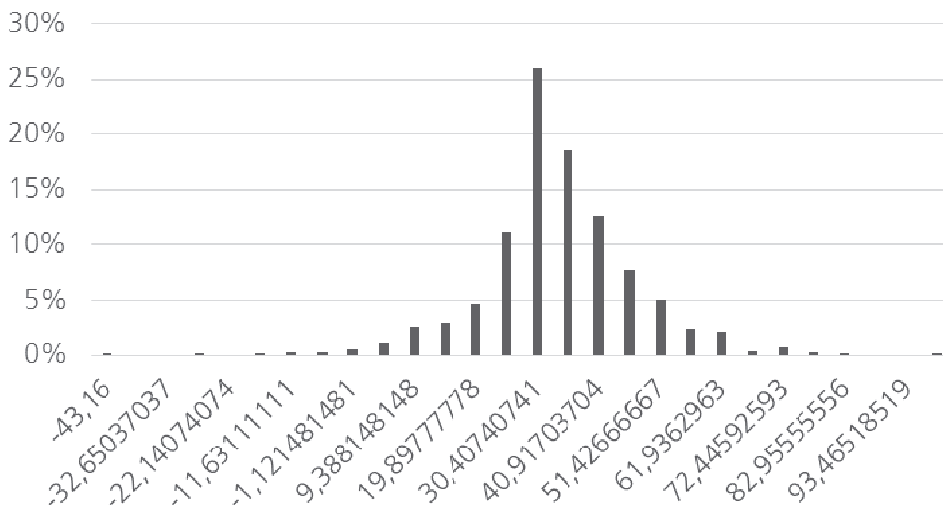
DC Micro Grid for Energy Efficient and Flexible Production Procedia Manufacturing, 2020

C Datengrundlage Energiepreise

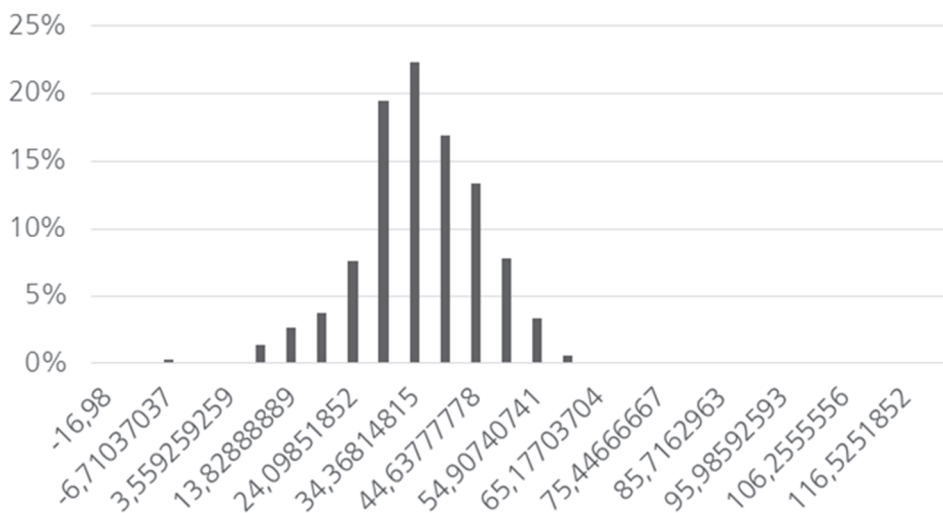
Verlauf des Strompreises für die Monate März, August und November. Zu sehen sind die Strompreise der EEX und die Niveaus für E_{ref} auf Basis der Mittelwerte des Vorjahres („Jahr“), des Vorjahresmonats („Monat“) und die Häufigkeitsverteilung.

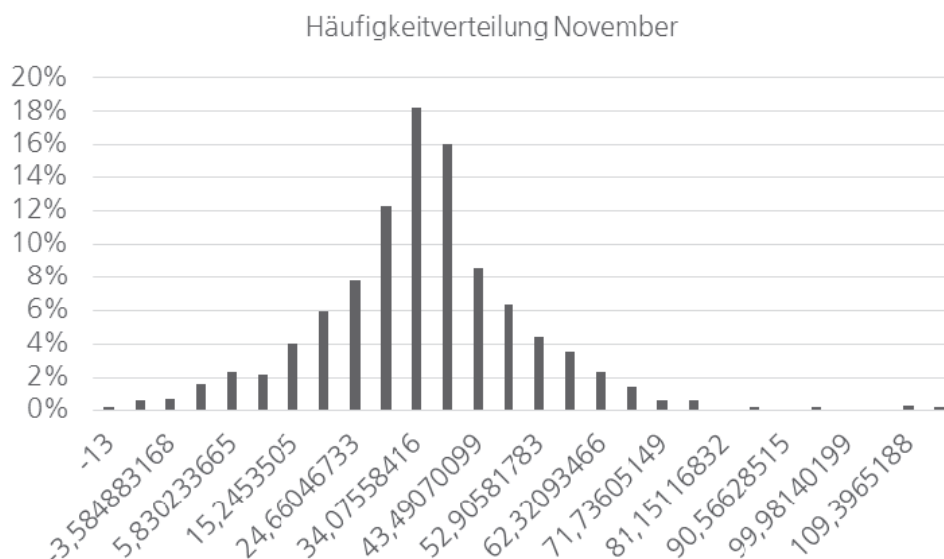


Häufigkeitsverteilung März



Häufigkeitsverteilung August





D Reglungsarchitektur Druckguss

D.1 Regelung der Systemzustände

Für die softwareseitige Umsetzung der Systemregelung in AnyLogic werden zunächst die notwendigen Variablen definiert.

Es kann eine bestimmte Anzahl an Maschinen in das System aufgenommen werden. Die einzelnen Maschinen werden als Typ „Agent“ in der Variable *Maschinen* hinterlegt. Über das Einlesen der hinterlegten Werte identifiziert das SCADA-System die sich im Betrieb befindenden Anlagen und kann mit diesen kommunizieren. Für jede Maschine muss außerdem ein Eintrag in der Variablen *DGM_Freigabe* hinterlegt werden, über den abgefragt werden kann, ob die jeweilige Maschine zur energieflexiblen Fahrweise freigegeben wurde. Ebenso wird in der Variable *Nachtabenkung* hinterlegt, ob die Maschine bei langen Stillstandzeiten auf dem Temperaturniveau „Nachtabenkung“ gehalten wird. Initial werden alle Werte auf *false* gesetzt, d.h. die Maschinen sind weder für die flexible Fahrweise freigegeben noch werden sie auf dem Temperaturniveau „Nachtabenkung“ gehalten. Erst durch die entsprechenden manuellen Eingaben werden die Werte auf *true* gesetzt (Tabelle 38).

Tabelle 38: Variablen der Systeminitialisierung

<i>Bezeichnung</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Wertetyp</i>	<i>Initialisierung</i>
Maschinen	DGM der Fabrik	Agent	{maschine_1, maschine_2, ...}
DGM_Freigabe	Freigabe der DGM für energieflexible Regelung	boolean	{false, false, ...}
Nachtabenkung	Temperaturhaltung der DGM auf Niveau „Nachtabenkung“ (560°C)	boolean	{false, false, ...}

Zusätzlich werden die im SCADA-System hinterlegten Variablen beschrieben (Tabelle 39).

Tabelle 39: Variablen des SCADA

Bezeichnung	Beschreibung	Einheit
<i>Array_Gesperrt</i>	Maschinen, die durch einen Abschaltbefehl stillstehen	-
<i>Leistungsbezug</i>	Aktueller Leistungsbezug der Fabrik	W
<i>Leistungsgrenze</i>	Durch <i>Regelenergie</i> definierte Leistungsgrenze	W
<i>Leistungsgrenze_absolut</i>	Festgelegte Leistungsgrenze	W
<i>Maschinen_Pd_Werte</i>	Aktuelle Pd Werte der Maschinen	-
<i>Maschinenranking</i>	Abschaltungshierarchie der Maschinen nach Pd Werten	-
<i>P_Reduktion_Maschinen</i>	Maschinen, die einen Abschaltbefehl erhalten haben, aber noch das aktuelle Werkstück fertigstellen.	-
<i>Regelenergie</i>	Angefragte positive Regelenergie	W
<i>Strompreis</i>	Mindestens stündlich aktualisierter Strompreis	€/MWh
<i>Zeitpunkt_Regelenergie</i>	Zeitpunkt der Regelenergieanfrage	s

In der Simulationssoftware AnyLogic wurde das SCADA System mithilfe der oben vorgestellten Variablen und Parameter, der Funktion *SCADA* sowie einem Ein- und

Ausgabefenster abgebildet. Eine zentrale Aufgabe ist die Kommunikation von Preis- anreizen, welche grundsätzlich den Spotmarktpreis sowie Regelenergieanfragen darstellen können. Im weiteren Modellausbau werden Preisreize in Form von Re- gelenergieanfragen jedoch nicht ausgewertet.

Die Datenbankabfragen der *SCADA-Funktion* während der Modellierung bilden die Übermittlungen des Energiepreises über das Internet an das SCADA-System ab. Aus der Datenbank werden die Preise von der Funktion *callStrompreis* kontinuierlich ab- gerufen und der Variablen *Strompreis* zugewiesen, welcher weiter an die Maschinen kommuniziert wird. Regelenergieanfragen können in Echtzeit über einen interakti- ven Schieber simuliert werden (Bild 69). Die aktuelle Leistungsgrenze wird vom SCADA-System kontinuierlich auf Einhaltung überprüft. Ist eine Leistungsreduktion notwendig, wird diese über den Produktionsdruck ausgeführt. Dieser wird kontinu- ierlich im Array *Maschinen_Pd_Werte* eingelesen. In aufsteigender Reihenfolge wer- den die Maschinenagenten daraufhin in dem Array *Maschinenranking* hinterlegt.

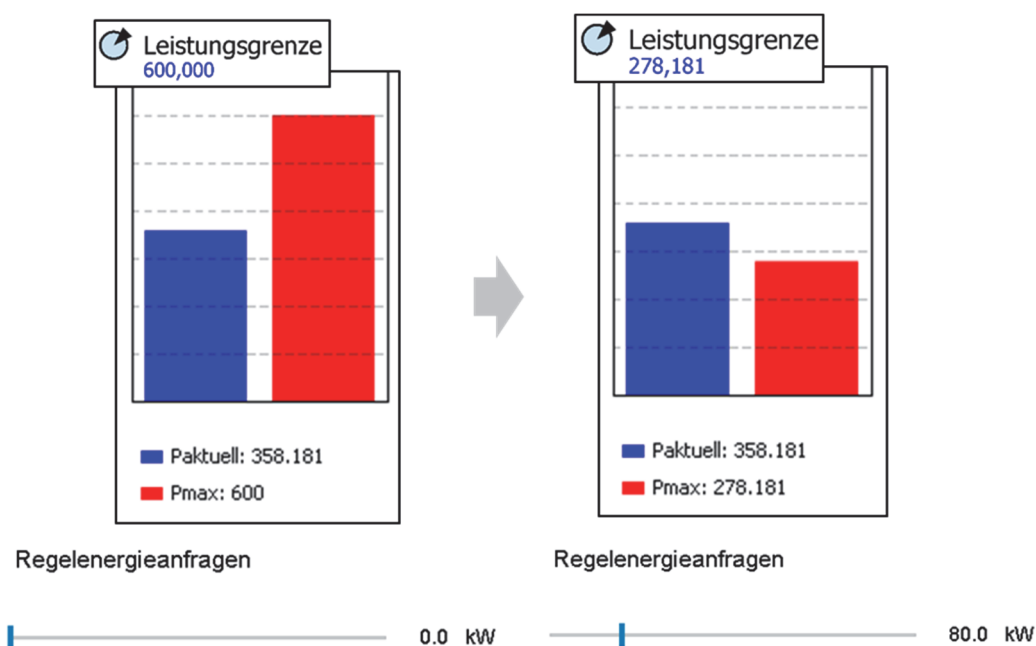


Bild 69 Simulation von Regelenergieanfragen

Maschinen, welche für die Fertigstellung des derzeitig produzierten Artikels noch Leistung beziehen, werden im Array *P_Reduktion_Maschinen* zwischengespeichert.

Array_Gesperrt enthält alle Maschinen, welche zur Leistungsreduktion gesperrt wurden. Die Einträge des Arrays werden im Ausgabefenster des SCADA Systems als „vorübergehend abgeschaltet“ angezeigt.

Das Ende einer Regelenergieanfrage wird durch das Zurücksetzen des Schiebers auf die Ausgangsposition simuliert. In diesem Fall durchläuft die *SCADA-Funktion* das *Maschinenranking* rückwärts und schaltet die Maschinen entsprechend zu. Dieses Vorgehen gewährleistet die priorisierte Zuschaltung derjenigen Maschinen mit höchstem Produktionsdruck Pd.

Die manuelle Freigabe von Maschinen für eine energieflexible Fahrweise kann während der Modellierung über interaktive Schaltfenster durchgeführt werden. Der Steueralgorithmus des SCADA-Systems überprüft die Maschinenfreigabe regelmäßig. Er setzt bei einer Sperrung die logistische und energetische Komponente (*L_Komponente* und *E_Komponente*) auf ihren Maximalwert von 1, sodass der Produktionsbetrieb der Maschine ausschließlich von den produktionstechnischen und -logistischen Randbedingungen abhängig ist.

Zuletzt kann eine interne Leistungsgrenze bei Modellstart über ein Eingabefenster angegeben werden. Diese wird in den Parametern *Leistungsgrenze* und *Leistungsgrenze_absolut* hinterlegt. Ersterer wird bei Regelenergieanfragen angepasst, während Letzterer konstant den anfangs festgesetzten Wert enthält.

Alle produktionsbezogenen Eingangsdaten für die energieflexible Regelung auf den SPS-Controllern der Maschinen werden aus der Datenbank des PPS-Systems abgerufen. Dazu gehören einerseits dynamische Größen wie Lieferzeitpunkt und -menge oder Lagerbestände und andererseits statische Parameter wie die Zykluszeit, der Maschinenname oder die Lagerkapazität. Energiebezogene Daten wie der aktuelle Strompreis, der für die Berechnung der Energiekomponente der Pd Funktion benötigt wird, werden vom SCADA-System übermittelt. Der Energiereferenzpreis, der die energetische Komponente von Pd beeinflusst, wird innerhalb der SPS hinterlegt und kann vom SCADA-System im Betrieb überschrieben werden.

D.2 An- und Abschalten der Druckgießmaschine

Das An- und Abschalten der DGM entspricht dem Übergang von Zustand 2, in dem sich die Maschine noch im Stillstand befindet und Ofen und Heizkühlgeräte auf Betriebstemperatur vorgeheizt wurden, in den Zustand 3, in dem die DGM mit der Produktion beginnt. Als grundsätzliches Entscheidungskriterium wird für den Start der DGM der Produktionsdruck P_d herangezogen.

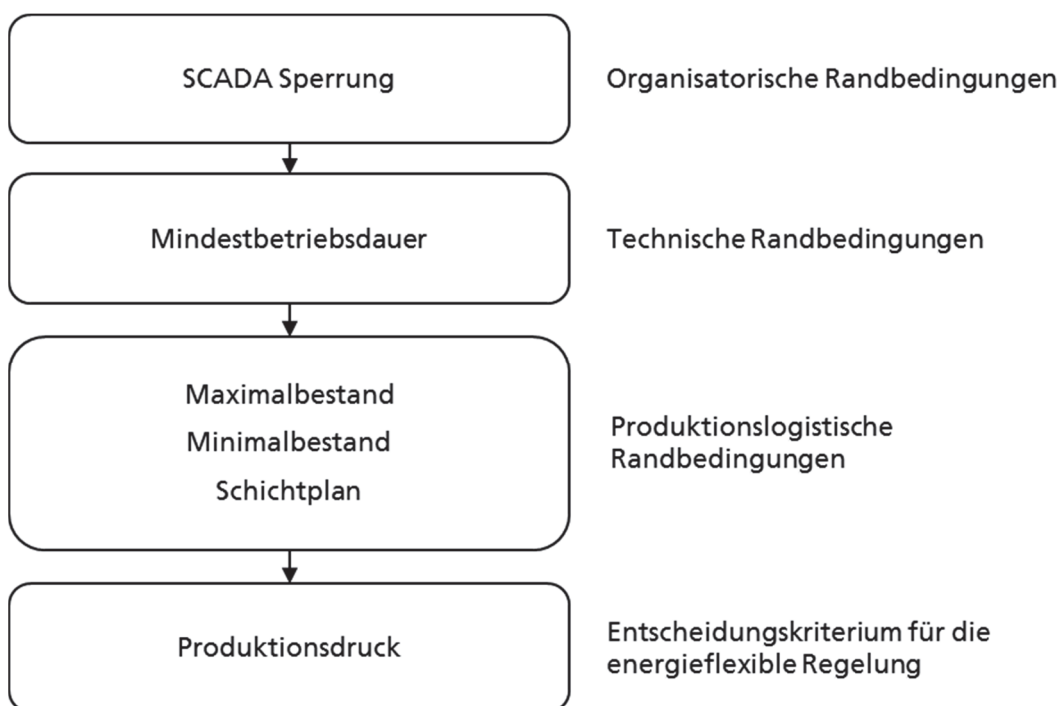


Bild 70 Randbedingungen zur Flexibilisierung der DGM

Die Ansteuerung der Maschinen über dieses Entscheidungskriterium unterliegt allerdings einigen produktionstechnischen und -logistischen Randbedingungen (Bild 70). Zur Begrenzung der maximalen Schaltfrequenz kann eine Mindestlaufzeit der Maschine festgelegt werden, für die unabhängig von weiteren logistischen oder energetischen Rahmenbedingungen kein Zustandswechsel erfolgen darf. Diese Mindestlaufzeit beträgt mindestens die Stückzeit der Maschine, da diese erst nach Ende des Produktionsvorgangs eines Produktes abgeschaltet werden kann. Die Einhaltung der Mindestlaufzeit wird auch hinsichtlich des Schichtplans und der Lagerkapazität über-

prüft: Würde die vorgegebene Mindestdauer bis zum Ende der Schicht nicht eingehalten, oder kann die in der Mindestbetriebsdauer gefertigte Menge nicht im Lager untergebracht werden, geht die Maschine nicht in Betrieb.

Der Mindestbestand ergibt sich durch den Quotienten der Mindestbetriebsdauer und der Stückzeit des Nachbearbeitungsprozesses. Dadurch wird sichergestellt, dass der Bestand für die Versorgung der folgenden Prozessschritte ausreicht, solange die Maschine für die Mindestbetriebsdauer abgeschaltet bleiben muss. Die Schichtpläne beschränken die Maschinenregelung zuletzt auf die Zeiten, in denen Mitarbeiter vor Ort sind.

Tabelle 40 listet sämtliche Annahmen und Randbedingungen des Modells für die Regelung der DGM auf. In der rechten Spalte ist diejenige Quelle vermerkt, in welcher die gleiche Annahme oder Randbedingung getroffen bzw. festgelegt wurde.

Tabelle 40: Annahmen und Randbedingungen der DGM

<i>Annahmen und Randbedingungen</i>	<i>Quelle</i>
Es existiert eine Mindestdauer, für die ein Prozess in einem bestimmten Zustand bleiben muss	(Sumit Mitra et al., 2012)
Die Maschine kann nur in den Zustand „inaktiv“ wechseln, wenn der Produktionsvorgang eines Produktes abgeschlossen ist	(Beier, Thiede und Herrmann, 2017a)
Die Gesamtleistung sämtlicher Maschinen kann begrenzt werden	(Fang et al., 2011)
Eine festgelegte Menge an Aufträgen muss von Maschine M_i bearbeitet werden	(Shrouf 2014, S. 4)
Der Füllstand des Lagers darf maximal dessen Kapazität betragen	(Fernandez, Li und Sun, 2013)
Die untere Grenze des Bestands muss eingehalten werden	(Sumit Mitra et al., 2012)
Jede Maschine M_i hat eine spezifische Bearbeitungsdauer pro Teil	(Li und Hong, 2017)
Jede Maschine kann nur eine Operation auf einmal ausführen	(Moon und Park, 2014)

Für die Abbildung der DGM im Modell sind ausreichend Prozessdaten vorhanden gewesen. Für die Stückzeit ist ein Mittelwert aus Mess- sowie Planwerten des PPS-Systems gebildet und hinterlegt worden. Für die Ermittlung des Leistungsbezugs im Betrieb PDGM wurde zum einen der Energieverbrauch der Hydraulik herangezogen, welcher durch die Messstelle „Maschine“ erhoben wurde. Über den Leistungsbezug je Arbeitsgang wurde ein gemittelttes Lastprofil gebildet. Zum anderen wurde der aggregierte Leistungsbezug des Masselvorwärmegeräts und der Nebenverbraucher (Roboter, Kühlturm, Fließband und Entgratpresse,) herangezogen, der über die Messstelle „Schiene“ gemessen wurde. Die Summe beider ermittelten Werte von 65 kW ergibt den Gesamtleistungsbezug der DGM im Betrieb.

Tabelle 41 beschreibt die Variablen, welche für die Simulation des SPS-Controllers der DGM implementiert wurden. Alle Variablen wurden maschinenspezifisch für Maschine i hinterlegt.

Tabelle 41: Variablen der DGM

<i>Bezeichnung</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Einheit</i>
Bestand_FA_aktuell	Bestand des aktuellen Fertigungsauftrags	-
E_Komponente	Energetische Komponente von Pd	-
EPreis_Ref	Energierferenzpreis	€/MWh
L_Komponente	Logistische Komponente von Pd	-
Lagerbestand_FT	Anzahl der Produkte im Fertigteillager	-
Lagerbestand_ZL	Anzahl der Produkte im Zwischenspeicher	-
Leistungen	Leistungsbedarf für jeden Maschinenstatus	W
Leistungsbegrenzung	Binärer Parameter für Sperrung der Maschine durch SCADA System	-
Liefermenge	Liefermenge des Auftrags j	-
Lieferzeit	Schlupfzeit j	s
Maschinenname	Benennung der Maschine	-
Mindestbetriebsdauer	Mindestbetriebsdauer	s
Pd	Produktionsdruck	-
Schichtplan	Schichtzeiten und -dauer	-
Stromkosten_Gesamt	Kumulierte Energiekosten	€
Strompreis	Mindestens stündlich aktualisierter Strompreis	€/MWh
Stückzeit_DGM	Zykluszeit der DGM	s
Zwischenlager_max	Kapazitäten des Zwischenspeichers	-
Zwischenlager_min	Mindestbestand im Zwischenspeicher	-

Innerhalb der Maschinenagents wurde neben dem dezentralen Regelalgorithmus der Druckgießprozess als eigene Prozesslogik abgebildet. Über den „Hold“-Baustein kann in AnyLogic ein simulierter diskreter Prozess angehalten werden. Für die DGM,

den Ofen und die HKG wurde jeweils ein solcher Baustein für die Ansteuerung verwendet.

Der Hold-Baustein *shutdown* (und damit die simulierte Maschine) wird von der Funktion *Maschinensteuerung* gesperrt („block()“) oder freigegeben („unblock()“). Die Funktion überprüft den aktuellen Systemzustand (z.B. *Lagerbestand*) auf die definierten Randbedingungen, welche in Form von Variablen und Parametern hinterlegt wurden (z.B. *Zwischenlager_min*, *Zwischenlager_max*), in oben erläutelter Hierarchie auf Einhaltung. Befinden sich diese innerhalb der definierten Wertebereiche, wird über die Variable *Pd* entschieden, ob die Maschine gestartet werden soll oder nicht. Die Funktionen *Maschinensteuerung* und *Berechnung_Pd* werden zeitdiskret in einem Takt von einer Sekunde von der Funktion *SCADA* aufgerufen. Diese Auflösung, welche im regelungstechnischen Sinn die Abtastrate darstellt, ist im Verhältnis zu der kleinsten Zeitkonstanten der Regelstrecke (die Zykluszeit des betrachteten Produktes beträgt 84 Sekunden) ausreichend hoch.

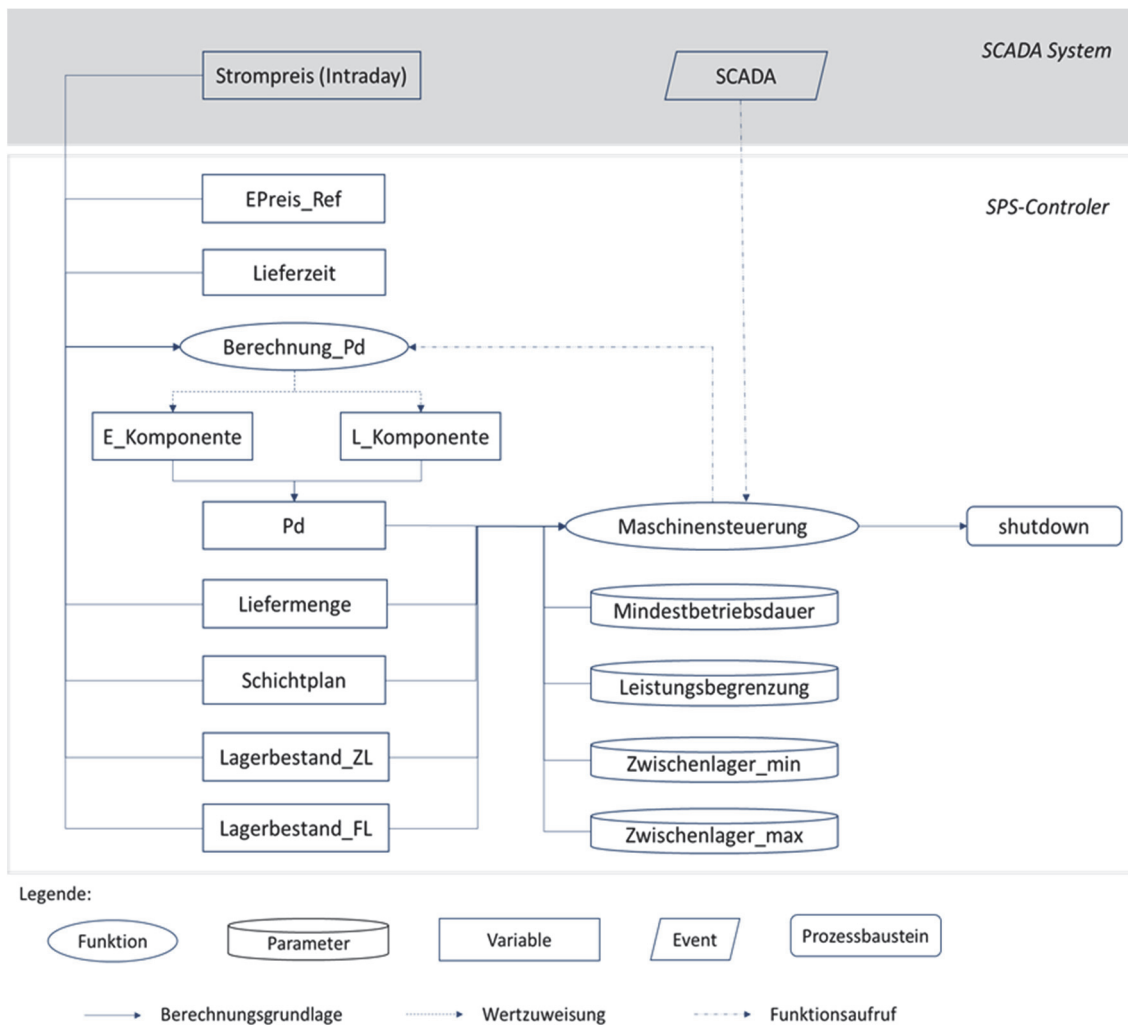


Bild 71 Flussdiagramm der energieflexiblen Regelung auf Anlagenebene

Die Berechnung des Produktionsdrucks Pd wird über Addition der beiden Variablen *L_Komponente* (logistische Komponente L) und *E_Komponente* (energetische Komponente E) durchgeführt (Bild 71). Zur Berechnung werden Variablen aus dem PPS und dem SCADA-System abgerufen. Einige Parameter sind dezentral innerhalb der SPS-Steuerung hinterlegt. Der aktuelle *Strompreis* wird aus dem SCADA System bezogen. Mit diesem sowie dem hinterlegten *EPreis_Ref* sowie *EPreis_Ref_min* wird die *E_Komponente* errechnet. *EPreis_Ref* und *EPreis_Ref_min* werden dezentral innerhalb der Maschinenagents hinterlegt, um eine maschinenspezifische Optimierung des Wertes durch prognostizierte Strompreise zu ermöglichen. Die Kompo-

nente L wird über die *Liefermenge* und den Lagerbestand, der sich aus den Füllständen der beiden Lager *Lagerbestand_ZL* und *Lagerbestand_FT* ergibt, sowie über die verbleibende *Lieferzeit* ermittelt. Wird über das Eingabefenster eine Maschine für die energieflexible Regelung manuell gesperrt, setzt die Funktion *SCADA* die Werte der Komponenten auf ihr Maximum von eins. Damit wird der Einfluss der Entscheidungsvariable P_d ausgeschlossen, die Maschine wird von der *Maschinensteuerung* bereits gestartet, sobald die entsprechenden produktionslogistischen Randbedingungen gegeben sind.

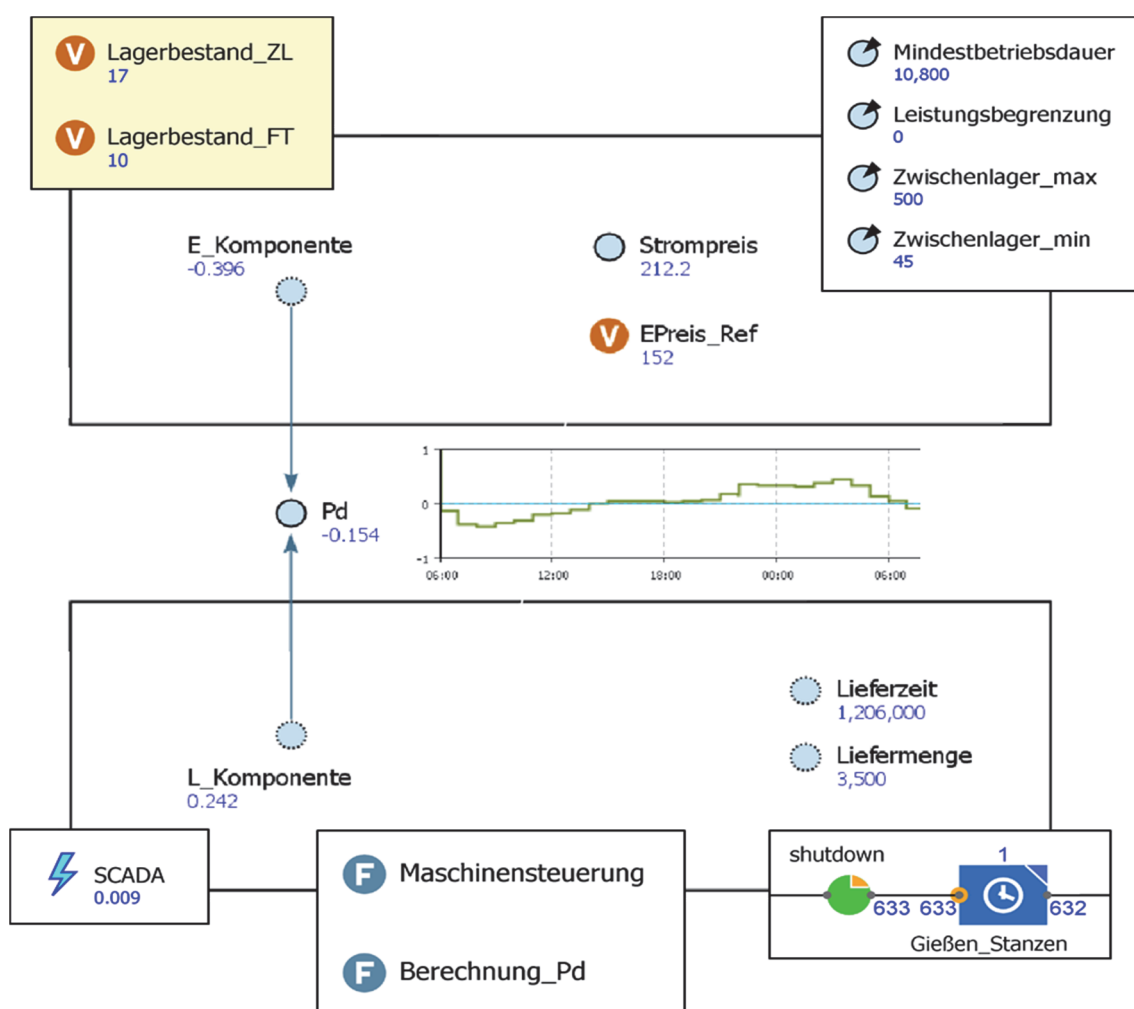


Bild 72 Modellausschnitt des Algorithmus auf Anlagenebene

Die unterschiedlichen AnyLogic Bausteine bestehen wie oben genannt aus Parametern, Variablen, Funktionen und einem Event, in dem wie in einer Funktion Java

Code hinterlegt und Aktionen getriggert werden können. Die Bausteine sind im Simulationsfenster durch unterschiedliche Symbole gekennzeichnet (Bild 72). Unter den Variablen und Parametern wird in blauen Ziffern der aktuelle Wert angegeben.

Der im Parameter *Leistung_DGM* hinterlegte Leistungsbezug der simulierten DGM PDGM wird über die Funktion *call_EVerbrauch_DGM* der Variablen *EVerbrauch_DGM* zugewiesen, sobald ein Teil gegossen wird, was bedeutet, dass sich ein Agent im Prozessblock *Gießen_Stanzen* befindet. Kumuliert mit den Leistungen des Ofens und der HKG wird die Leistung von der Funktion *Energieverbrauch* dem Parameter *parEnergieverbrauch* zugewiesen, welcher im Agent *main* des Modells in den Gesamtleistungsbezug miteinfließt und vom SCADA-System abgerufen werden kann.

D.3 An- und Abschalten des Ofens und der Heizkühlgeräte

Das An- und Abschalten des Ofens und der HKG entspricht dem Schalten zwischen Zustand 0, in dem alle Prozesskomponenten inaktiv sind, und Zustand 2, in dem beide thermischen Geräte gestartet sind. Die thermischen Komponenten müssen so hochgefahren werden, dass sie bis zum geplanten Produktionsstart der DGM die Solltemperatur erreichen. Der Zeitpunkt des Anfahrens soll dabei so gelegt werden, dass die Energiekosten für den gesamten Aufheizprozess minimiert werden.

Mit dem Eintreten eines Produktionsstopps der DGM wird ein Zeitfenster des Stillstands prognostiziert. Innerhalb dieses Zeitfensters muss der Startzeitpunkt der thermischen Komponenten liegen. Die Obergrenze des Zeitraums, für den der kostenoptimale Startzeitpunkt der Aufheizphase berechnet wird, wurde auf acht Stunden festgelegt. Bei Stillstandzeiten, die diesen Zeitraum überschreiten, wie beispielsweise an einem Wochenende, werden die Komponenten in jedem Fall vorerst abgeschaltet. Sobald der Zeitraum bis zum Produktionsbeginn die Obergrenze von acht Stunden unterschreitet, wird der Optimierungsalgorithmus aufgerufen, der den Startzeitpunkt ermittelt und festlegt. Der Ofen und die HKG werden gestartet, sobald dieser eintritt (Bild 73).

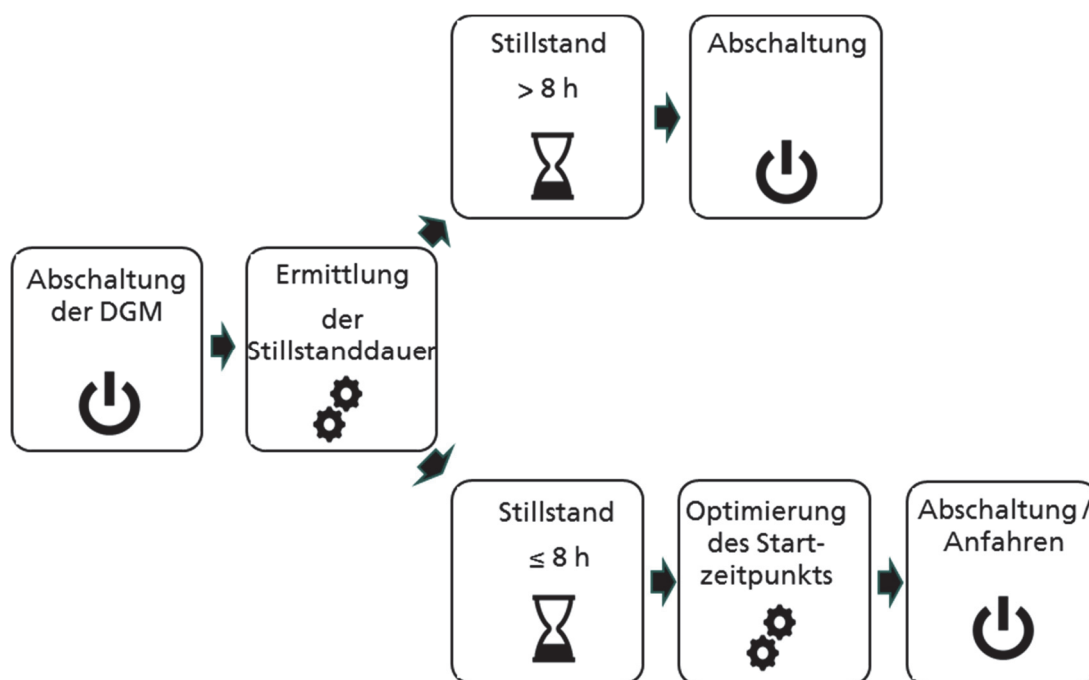


Bild 73 Ablauf der Ansteuerung des Ofens und der HKG

Der Optimierungsalgorithmus vergleicht die gesamten Energiekosten für Aufheiz- und Haltephasen der möglichen Startscenarios mithilfe der prognostizierten Preise des Intradaymarkts und gibt den Startzeitpunkt aus, der zu minimalen Kosten führt. Dabei werden geringere Strompreise für die Aufheizphase des Ofens genutzt, um Mehrkosten, welche durch die längere Haltephase auf Solltemperatur entstehen, zu überkompensieren (Bild 74).

Der spätmöglichste Startzeitpunkt ist derjenige, für den die Aufheizzeit bis Produktionsstart gerade noch vollständig durchgeführt werden kann. Bei sehr kurzer Stillstandzeit werden die Geräte überhaupt nicht abgeschaltet. Damit eine solch kurze Stillstandzeit der DGM überhaupt eintreten kann, muss allerdings die Mindestbetriebsdauer entsprechend kurz definiert sein

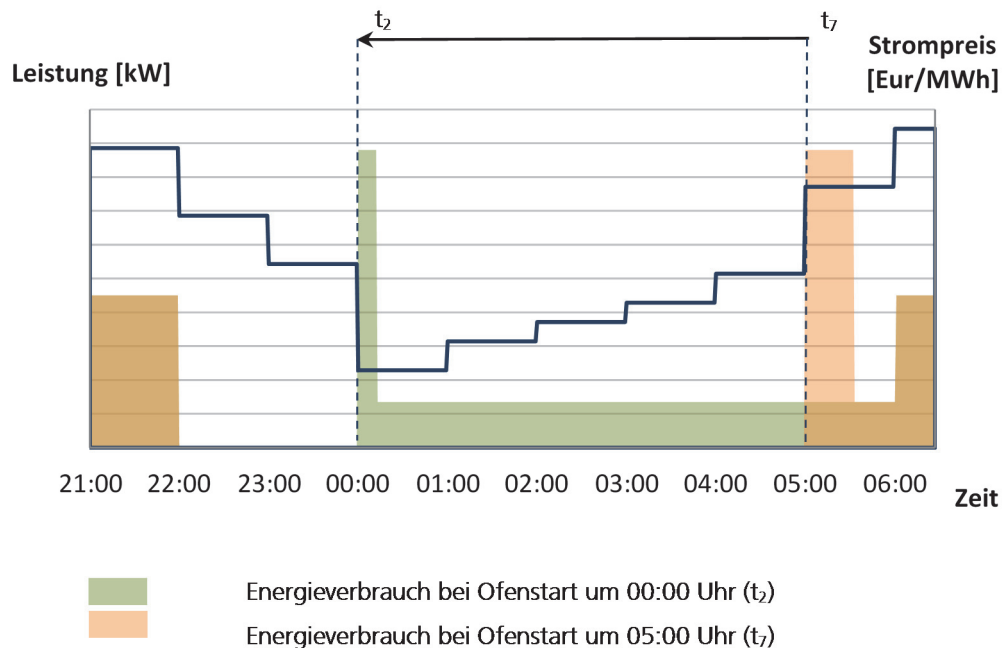


Bild 74 Verschiebung des Startzeitpunktes des Ofen-Aufheizvorgangs

Das Vorgehen bei der Ermittlung des Startzeitpunktes für den Aufheizvorgang der HKG ist abgesehen von unterschiedlichen Prozessparametern mit dem des Ofens identisch. Beide Geräte können theoretisch mit mehreren vordefinierten Leistungsniveaus angesteuert werden. Mit diesen wird grundsätzlich bis auf Solltemperatur geheizt. Optimierungen können für jedes Leistungsniveau einzeln durchgeführt werden, wonach die kostenoptimale Kombination aus Leistung und Startzeitpunkt festgelegt wird.

In Abhängigkeit des Leistungsniveaus wird die Minstdauer für den Aufheizvorgang und damit die minimale Dauer definiert, für die der Prozess in dem entsprechenden Zustand (1.1, 1.2 oder 2) bleiben muss. Eine Maximaldauer ergibt sich aus der Bedingung, dass Startzeitpunkte des Ofens und der HKG, aufgrund der Prognosegüte, nur bis zu acht Stunden im Voraus bestimmt werden. Eine Zusammenfassung der Randbedingungen ist Tabelle 42 zu entnehmen.

Tabelle 42: Annahmen und Randbedingungen für Ofen und HKG

<i>Annahmen und Randbedingungen</i>	<i>Quelle</i>
Minstdauer, für die ein Prozess in einem bestimmten Zustand bleiben muss	(Sumit Mitra et al., 2012)
Maximaldauer, für welche ein Prozess in einem bestimmten Zustand bleiben darf	(Sumit Mitra et al., 2012)
Ofen und HKG müssen bei Modellstart auf Betriebstemperatur sein	
Startzeitpunkte des Ofens und der HKG werden bis zu acht Stunden im voraus berechnet, mit Preisen des Intradaymarkts Ofen und HKG werden nach Start der Aufheizphase immer auf Solltemperatur geheizt	

Grundsätzlich wird der Ofen vor Produktionsbeginn mit einem Heizniveau $P_{\text{Aufheizen}}$ aufgeheizt, bis der Ofeninhalt aus flüssigem Magnesium die Solltemperatur von 685°C erreicht. Im darauffolgenden Zeitraum wird diese Temperatur bis zum Start der DGM mit dem Leistungsniveau $P_{\text{Halten, }685^{\circ}\text{C}}$ gehalten. Befindet sich die Stillstandzeit der Maschine unterhalb einer definierten Maximaldauer von beispielsweise rund 24 Stunden, wird die Minimaltemperatur, im Rahmen der Nachtabsenkung auf 560°C beschränkt. Der Ofen hält ab diesem Punkt automatisch das Temperaturniveau und bezieht die Leistung $P_{\text{Halten, }560^{\circ}\text{C}}$. Steht der Produktionsprozess länger als 24 Stunden, wird der Ofen komplett abgeschaltet und kühlt in Folge dessen bis unterhalb von 560°C aus. Während der Produktion der DGM benötigt der Ofen für die Haltung der Betriebstemperatur das Aufheizniveau $P_{\text{Produktion}}$. Diese Leistung ist produktabhängig und kann produktspezifisch hinterlegt werden.

Somit können vier Leistungsklassen definiert werden (Tabelle 43).

Tabelle 43: Leistungsklassen - Ofen

<i>Niveau</i>	<i>Leistung</i>
PAufheizen	177 kW
PHalten, 685°C	27 kW
PHalten, 560°C	16 kW
PProduktion	90 kW

Die Dauer, für die mit den drei Leistungsniveaus geheizt werden muss, hängt von der Stillstandzeit, der Aktivierung der „Nachtabsenkung“ sowie vom ermittelten Startzeitpunkt des Ofens ab. Abhängig von diesen Gegebenheiten heizt der Ofen unterschiedlich lange, um die Solltemperatur zu erreichen. Der Zusammenhang zwischen Stillstandzeit und Aufheizdauer wird in Form von einer Aufheizkurve im Model hinterlegt.

Wie auch der Ofen werden die fünf aktiven HKG an der Maschine einige Zeit vor Produktionsbeginn aufgeheizt. Dieser Vorgang teilt sich in das Aufheizen des Wärmeträgermediums auf Solltemperatur und das Aufheizen der Gießform auf Solltemperatur. Jeder Vorgang führt zu einem spezifischen Leistungsprofil der Geräte. Grundsätzlich können zwar beide Aufheizperioden separat angesteuert werden, im Folgenden wurden sie jedoch zu einem Heizvorgang zusammengefasst. Es wird angenommen, dass der notwendige Energiebedarf über eine Stunde mit der konstanten Heizleistung $PHKG_{Aufheizen}$ erbracht wird. Nachdem das Wärmeträgermedium und die Gießform die Betriebstemperatur erreicht haben, wird diese mit der Leistung $PHKG_{Halten}$ konstant gehalten (Tabelle 44).

Tabelle 44: Leistungsniveaus - HKG

<i>Niveau</i>	<i>Leistung</i>
$PHKG_{Aufheizen}$	138 kW
$PHKG_{Halten}$	99 kW

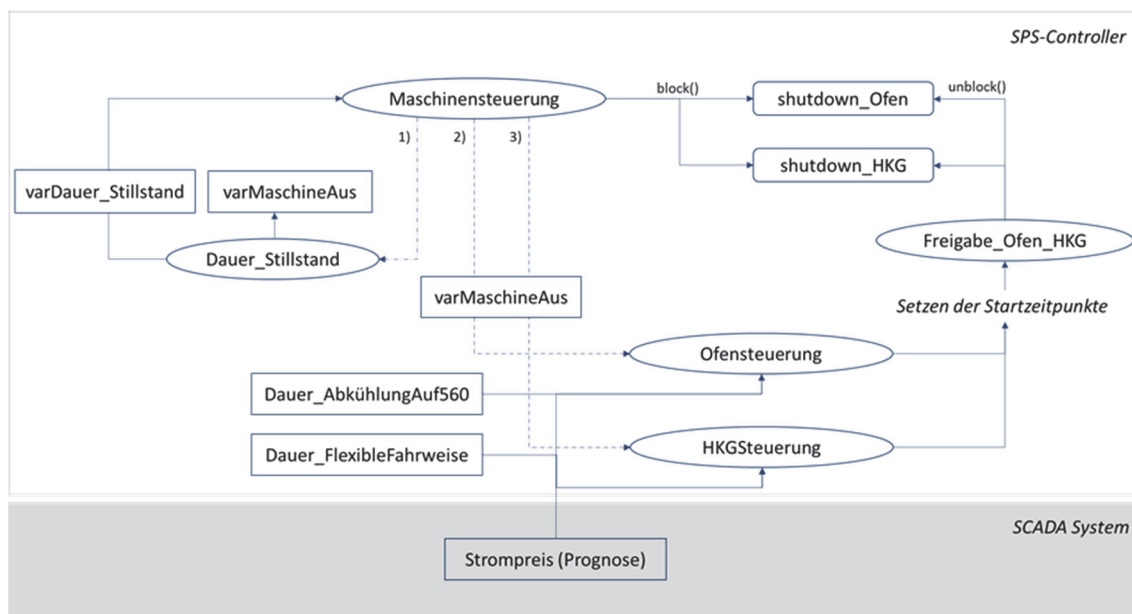
Im Gegensatz zum Ofen ist die Aufheizdauer nur für eine kurze Zeit von der Stillzeit der Geräte abhängig, da sie sehr viel schneller auf Raumtemperatur auskühlen. Aufgrund dieser kurzen Zeitspanne wurde für die HKG keine Abkühlkurve hinterlegt, da bereits bei sehr geringere Verschiebung des Startzeitpunktes durch den Optimierungsalgorithmus die Temperatur der Geräte nahe der Umgebungstemperatur liegt. Es wird daher in jedem Fall die gleiche Zeit für den Aufheizprozess angenommen.

In Tabelle 45 werden die Variablen hinterlegt, welche für die Simulation des Algorithmus zur Ansteuerung thermischer Komponenten auf Maschinenebene implementiert wurden.

Der Algorithmus für die Kostenoptimierung der Aufheizprozesse wurde in den Funktionen *Ofensteuerung* bzw. *HKGSteuerung in der Maschinensteuerung* hinterlegt (Bild 75). Bei einer Abschaltung der DGM wird zunächst die Funktion *Dauer_Stillstand* aufgerufen, welche die Dauer des Produktionsstopps in vollen Stunden prognostiziert und in der Variablen *varMaschineAus* hinterlegt. Darüber hinaus gibt die Funktion mit der Variablen *varDauer_Stillstand* die kontinuierlich aktualisierte, verbleibende Stillstandzeit zurück. Sobald diese das in der Variablen *Dauer_FlexibleFahrweise* hinterlegte Zeitfenster von acht Stunden unterschreitet, werden die Optimierungsalgorithmen *Ofensteuerung* und *HKGSteuerung* einmalig aufgerufen. Sie prognostizieren auf Basis der Intradaypreise der kommenden acht Stunden den kostenoptimalen Startzeitpunkt und hinterlegen ihn. Die Funktion *Freigabe_Ofen_HKG* startet zuletzt die Geräte über die beiden „Hold“-Bausteine in Form der *unblock()*-Funktion, sobald die jeweilige Aufheizphase durchgeführt wurde.

Tabelle 45: Variablen – Ofen und HKG

<i>Bezeichnung</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Einheit</i>
Aufheizdauer	Tabellenfunktion für die Dauer der Aufheizphase	h
Aufheizdauer_ Nach- tabsenkung	Tabellenfunktion für die Dauer der Aufheizphase mit Nach- tabsenkung	h
Dauer_ FlexibleFahrweise	Zeitraum für die Optimierung der Ansteuerung thermischer Geräte	h
varOfensteuerung	Hilfsvariable für den Optimierungsalgorithmus	-
varHKGSteuerung	Hilfsvariable für den Optimierungsalgorithmus	-
Startzeitpunkt_Ofen	Startzeitpunkt des Ofens	h
Startzeitpunkt_HKG	Startzeitpunkt der HKG*	h
varMaschineAus	Prognose für die Dauer des Stillstands der DGM	h
Zeitschritt_ Schichtplan_ein	Prognose für die Dauer, in der während des Stillstands der DGM der Schichtplan aktiv ist	h
Dauer_ AbkühlungAuf560	Zeitraum, in dem der Ofen von 685°C auf 560°C abkühlt	h
Aufheizdauer_ Leistungsreduktion	Dauer, die beide thermischen Geräte mindestens benöti- gen, um auf Solltemperatur zu kommen	h
Stillstand_ Leistungsreduktion	Dauer, für die die Maschine vom SCADA-System gesperrt wurde	h



Legende:



Bild 75 Flussdiagramm der energieflexiblen Regelung des Ofens und der HKG

Für die Bestimmung des voraussichtlichen Stillstands wurde die Hilfsfunktion *Maschinensteuerung_hilf* erstellt. Sie wird von der Funktion *Dauer_Stillstand* aufgerufen und ist größtenteils ein Abbild der Funktion *Maschinensteuerung*. Sie prüft in gleicher Weise alle definierten Randbedingungen und das Pd Kriterium auf Gültigkeit, tut dies aber nicht für den aktuellen Prozesszustand, sondern für einen vorgegebenen, zukünftigen Zeitschritt *Zeitschritt_in_h* und der Pd Wert *Pd_hilf*. Für künftige Strompreise werden die Intradaymarktpreise zugrunde gelegt

Für die HKG ergibt sich der Ablauf nach gleichem Prinzip, allerdings mit einigen Vereinfachungen. Beispielsweise müssen keine prognostizierten Strompreise eingelesen werden, es kann auf die von der Funktion *Ofensteuerung* hinterlegten Werte zurückgegriffen werden.

E Reglungsarchitektur Spritzguss

Analog zum ersten Anwendungsbeispiel erfolgt die softwareseitige Umsetzung der Systemregelung in AnyLogic. Zunächst werden die notwendigen Variablen definiert. Es kann eine bestimmte Anzahl an Maschinen in das System aufgenommen werden. Die einzelnen Maschinen werden als Typ „Agent“ in der Variable *Maschinen* hinterlegt. Über das Einlesen der hinterlegten Werte identifiziert das SCADA System die sich im Betrieb befindenden Anlagen und kann mit diesen kommunizieren. Für jede Maschine muss außerdem ein Eintrag in der Variablen *SGM_Freigabe* hinterlegt werden, über den abgefragt werden kann, ob die jeweilige Maschine zur energieflexiblen Fahrweise freigegeben wurde. Erst durch die entsprechenden manuellen Eingaben werden die Werte auf true gesetzt (Tabelle 46).

Tabelle 46: Variablen – Systeminitialisierung

<i>Bezeichnung</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Wertetyp</i>	<i>Initialisierung</i>
Maschinen	SGM der Fabrik	Agent	{maschine_1, maschine_2, ...}
SGM_Freigabe	Freigabe der SGM für energieflexible Regelung	boolean	{false, false, ...}

Das SCADA-System kann wie im ersten Anwendungsbeispiel beschrieben strukturiert und aufgebaut werden.

An- und Abschalten der Spritzgießmaschine und des Trocknungsprozesses

Das An- und Abschalten der SGM entspricht dem Übergang von Zustand 2, in dem sich die Maschine noch im Standby befindet, in den Zustand 4, in dem die SGM mit der Produktion beginnt. Für den Trockner entspricht dies dem Übergang von Zustand 0 zum Zustand 1.

Als grundsätzliches Entscheidungskriterium wird für den Start der SGM sowie den Start des Trockners der Produktionsdruck P_d herangezogen.



Bild 76 Randbedingungen zur Flexibilisierung der SGM

Um die Schaltfrequenz zu begrenzen wird eine Mindestlaufzeit der Maschine festgelegt, für die unabhängig weiterer logistischer oder energetischer Rahmenbedingungen kein Zustandswechsel erfolgen darf. Die Einhaltung der Mindestlaufzeit wird zusätzlich hinsichtlich des Schichtplans und der Lagerkapazität überprüft: Würde die vorgegebene Mindestdauer bis zum Ende der Schicht nicht eingehalten, oder kann die in der Mindestbetriebsdauer gefertigte Menge nicht im Lager untergebracht werden, geht die Maschine nicht in Betrieb.

Der Mindestbestand ergibt sich durch den Quotienten der Mindestbetriebsdauer und der Stückzeit des Nachbearbeitungsprozesses. Dadurch wird sichergestellt, dass der Bestand für die Versorgung der folgenden Prozessschritte ausreicht, solange die Maschine für die Mindestbetriebsdauer abgeschaltet bleiben muss. Die Schichtpläne beschränken die Maschinenregelung zuletzt auf die Zeiten, in denen Mitarbeiter vor Ort sind.

Tabelle 47 listet sämtliche Annahmen und Randbedingungen des Modells für die Regelung der SGM und des Trockners auf. In der rechten Spalte ist diejenige Quelle vermerkt, in welcher die gleiche Annahme oder Randbedingung getroffen bzw. festgelegt wurde.

Tabelle 47: Annahmen und Randbedingungen - SGM

Annahmen und Randbedingungen	Quelle
Mindestdauer, für die ein Prozess in einem bestimmten Zustand bleiben muss	(Sumit Mitra et al., 2012)
Maschine kann nur in den Zustand „inaktiv“ wechseln, wenn der Produktionsvorgang eines Produktes abgeschlossen ist	(Beier, Thiede und Herrmann, 2017a)
Die Gesamtleistung sämtlicher Maschinen kann begrenzt werden	(Fang et al., 2011)
Eine festgelegte Menge an Aufträgen muss von Maschine M_i bearbeitet werden	(Shrouf 2014, S. 4)
Füllstand des Lagers darf maximal dessen Kapazität betragen	(Fernandez, Li und Sun, 2013)
Untere Grenze des Bestands muss eingehalten werden	(Sumit Mitra et al., 2012)
Jede Maschine M_i hat eine spezifische Bearbeitungsdauer pro Teil	(Li und Hong, 2017)
Jede Maschine kann nur eine Operation auf einmal ausführen	(Moon und Park, 2014)

Für die Abbildung der SGM im Modell lagen ausreichend Prozessdaten vor. Für die Stückzeit wird ein Mittelwert aus Mess- sowie Planwerten des PPS-Systems gebildet und hinterlegt. Tabelle 48 beschreibt die Variablen, welche für die Simulation des SPS-Controllers der SGM implementiert werden. Alle Variablen werden maschinenspezifisch für Maschine i hinterlegt.

Tabelle 48 Variablen – SGM

<i>Bezeichnung</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Einheit</i>
Bestand_FA_aktuell	Bestand des aktuellen Fertigungsauftrags	-
E_Komponente	Energetische Komponente von Pd	-
EPreis_Ref	Energierferenzpreis	€/MWh
L_Komponente	Logistische Komponente von Pd	-
Lagerbestand_FT	Anzahl der Produkte im Fertigteillager	-
Lagerbestand_ZL	Anzahl der Produkte im Zwischenspeicher	-
Leistungen	Leistungsbedarf für jeden Maschinenstatus	W
Liefermenge	Liefermenge des Auftrags j	-
Lieferzeit	Schlupfzeit	s
Maschinenname	Benennung der Maschine	-
Mindestbetriebsdauer	Mindestbetriebsdauer	s
Pd	Produktionsdruck	-
Schichtplan	Schichtzeiten und -dauer	-
Stromkosten_Gesamt	Kumulierte Energiekosten	€
Strompreis	Mindestens Stündlich aktualisierter Strompreis	€/MWh
Stückzeit_SGM	Zykluszeit der SGM	s
Zwischenlager_max	Kapazitäten des Zwischenspeichers	-
Zwischenlager_min	Mindestbestand im Zwischenspeicher	-

Auf Basis von gemessenen Prozessdaten erfolgt die Abbildung des Trockners im Modell. Für die Stückzeit wird ein Mittelwert aus Mess- sowie Planwerten des PPS-Systems gebildet und hinterlegt. Tabelle 49 beschreibt die Variablen, welche für die Simulation des SPS-Controllers des Trockners implementiert werden. Alle Variablen werden maschinenspezifisch für Maschine i hinterlegt.

Tabelle 49 Variablen – Trockner

<i>Bezeichnung</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Einheit</i>
Bestand_FA_aktuell	Bestand des aktuellen Fertigungsauftrags	-
E_Komponente	Energetische Komponente von Pd	-
EPreis_Ref	Energierferenzpreis	€/MWh
L_Komponente	Logistische Komponente von Pd	-
Lagerbestand_FT	Anzahl der Produkte im Fertigteillager	-
Lagerbestand_ZL	Anzahl der Produkte im Zwischenspeicher	-
Leistungen	Leistungsbedarf für jeden Maschinenstatus	W
Liefermenge	Liefermenge des Auftrags j	-
Lieferzeit	Schlupfzeit	s
Maschinenname	Benennung der Maschine	-
Mindestbetriebsdauer	Mindestbetriebsdauer	s
Pd	Produktionsdruck	-
Schichtplan	Schichtzeiten und -dauer	-
Stromkosten_Gesamt	Kumulierte Energiekosten	€
Strompreis	Mindestens Stündlich aktualisierter Strompreis	€/MWh
Stückzeit_Trockner	Zykluszeit des Trockners	s
Zwischenlager_max	Kapazitäten des Zwischenspeichers	-
Zwischenlager_min	Mindestbestand im Zwischenspeicher	-

Der Aufbau der Maschinenagents erfolgt analog zum vorherigen Fallbeispiel und wird an dieser Stelle nicht genauer beschrieben.

In der Industrie gewinnt die Frage nach einer sicheren, kostengünstigen und qualitativ hochwertigen Energieversorgung zunehmend an Bedeutung, insbesondere vor dem Hintergrund steigender und volatiler Energiepreise sowie einer zunehmend schwankenden Bereitstellung von Energie.

Vor diesem Hintergrund greift die vorliegende Arbeit die Frage auf, wie ein Produktionssystem dezentral, autonom und energieflexibel gesteuert werden kann mit dem Ziel, die Energie- und damit auch die Produktionskosten nachhaltig zu senken. Dabei soll die Auslastung des Produktionssystems und die Termintreue der Aufträge nicht (negativ) beeinflusst werden.

Im Fokus der Arbeit stehen die Produktionssteuerung und die damit verbundenen wertschöpfenden Maschinen und Anlagen sowie die bestehende energetische Infrastruktur des Produktionssystems. Die Ergebnisse der Arbeit sind ein neuartiges Steuerungssystem und effiziente Regelalgorithmen, die es erlauben, das Produktionssystem energetisch zu optimieren und damit das Produktionssystem robust, zukunftsorientiert und nachhaltig zu betreiben.

ISBN 978-3-8396-1660-4



FRAUNHOFER VERLAG