

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

**System zur energieorientierten Produktionssteuerung
in der auftragsbezogenen Fertigung**

Cedric Martin Schultz

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Hartmut Spliethoff

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer

Die Dissertation wurde am 20.12.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 24.07.2018 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abkürzungsverzeichnis.....	vii
Verzeichnis der Formelzeichen.....	xi
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Motivation der Arbeit.....	5
1.3 Zielsetzung	7
1.4 Aufbau der Arbeit	9
2 Grundlagen.....	11
2.1 Übersicht	11
2.2 Strombedarf produzierender Unternehmen.....	11
2.2.1 Begriffsdefinition	11
2.2.2 Zusammensetzung des betrieblichen Strombedarfs	13
2.3 Stromversorgung produzierender Unternehmen.....	16
2.3.1 Bedarfsdeckung am deutschen Strommarkt.....	16
2.3.2 Stromeigenerzeugung	18
2.3.3 Demand Side Management (DSM) und Regelleistung	20
2.3.4 Innerbetriebliches Lastmanagement.....	21
2.4 Planung und Steuerung der Produktion	24
2.4.1 Allgemeines	24
2.4.2 Logistisches Zielsystem.....	24

2.4.3	Aufgaben der Produktionsplanung.....	26
2.4.4	Aufgaben der Produktionssteuerung.....	28
2.5	Informationssysteme in der Produktion.....	30
2.5.1	Allgemeines.....	30
2.5.2	Softwareunterstützung der Planung und Steuerung.....	31
2.6	Fazit.....	32
3	Stand der Forschung und Technik.....	33
3.1	Übersicht.....	33
3.2	Energieorientierte Ansätze der Produktionsplanung und -steuerung	33
3.2.1	Ansätze in der Produktionsprogramm- und Produktionsbedarfsplanung.....	35
3.2.2	Ansätze der Eigenfertigungsplanung	36
3.2.3	Ansätze in der Produktionssteuerung.....	40
3.2.4	Rechnergestützte zur Steuerung des Strombedarfs.....	45
3.3	Ansätze des innerbetrieblichen Lastmanagements	46
3.3.1	Allgemeines.....	46
3.3.2	Regelbasiertes Lastmanagement	47
3.3.3	Optimierendes Lastmanagement.....	48
3.4	Ansätze zur Modellierung produktionsbedingter Energiebedarfe.....	49
3.4.1	Allgemeines.....	49
3.4.2	Empirische Modelle	50
3.4.3	Zustandsbasierte Modellierung.....	52
3.4.4	Komponentenbasierte Modellierung.....	56
3.5	Ableitung des Handlungsbedarfs.....	58
3.6	Anforderungen an eine energieorientierte Produktionssteuerung	59

4	System zur energieorientierten Produktionssteuerung	61
4.1	Übersicht	61
4.2	Systemelemente.....	62
5	Energieorientiertes Informationsmanagement.....	65
5.1	Übersicht	65
5.2	Referenzarchitektur für die energieorientierte Produktionssteuerung	65
5.2.1	Allgemeines	65
5.2.2	Energieversorger.....	67
5.2.3	Planungsebene	69
5.2.4	Fertigungsleitebene.....	71
5.2.5	Feldebene.....	72
5.2.6	Produktionsdatenbank	73
5.3	Datenmodelle der energieorientierten Produktionssteuerung.....	73
5.3.1	Allgemeines	73
5.3.2	Fabrikmodell.....	74
5.3.3	Belegungsplanmodell	75
5.3.4	Energiemodell.....	76
5.4	Fazit.....	77
6	Bedarfsüberwachung.....	79
6.1	Übersicht	79
6.2	Klassifizierung lastgangrelevanter Störungen	79
6.3	Entwicklung einer Lastgangprognose.....	84
6.3.1	Allgemeines	84
6.3.2	Beschreibung der Produktionsüberwachung	85

6.3.3	Analyse des betrieblichen Leistungsbedarfs	88
6.3.4	Definition von allgemeinen Betriebszuständen	90
6.3.5	Prognoseverfahren.....	94
6.4	Abweichungsidentifikation.....	96
6.4.1	Abweichungsanalyse.....	96
6.4.2	Abweichungsbewertung.....	97
6.4.3	Kostenmodell	101
6.5	Fazit.....	104
7	Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung.....	105
7.1	Konfiguration der Produktionssteuerung.....	105
7.2	Energieorientierte Reihenfolgebildung.....	108
7.2.1	Allgemeines.....	108
7.2.2	Verfahren zur energieorientierten Reihenfolgebildung	110
7.3	Hybride energieorientierte Auftragsfreigabe.....	115
7.3.1	Allgemeines.....	115
7.3.2	Zentrale Freigabestufe.....	116
7.3.3	Dezentrale energieorientierte Freigabestufe	118
7.4	Situatives Lastmanagement	122
7.4.1	Allgemeines.....	122
7.4.2	Maßnahmengenerierung.....	125
7.4.3	Algorithmus für das situative Lastmanagement.....	135
7.5	Fazit.....	140
8	Prototypische Umsetzung und Validierung	141
8.1	Übersicht.....	141

8.2 Technische Umsetzung	141
8.2.1 Allgemeines	141
8.2.2 Umsetzung am Beispiel von SAP ME	142
8.3 Simulationstechnische Validierung.....	146
8.3.1 Allgemeines	146
8.3.2 Beschreibung des simulierten Produktionssystems.....	146
8.3.3 Anwendung der energieorientierten Steuerungsverfahren	149
8.3.4 Anwendung des situativen Lastmanagements.....	153
8.4 Technisch-Wirtschaftliche Bewertung.....	159
8.4.1 Anforderungsbezogene technische Bewertung	159
8.4.2 Wirtschaftliche Bewertung	160
8.5 Fazit.....	164
9 Zusammenfassung und Ausblick	167
9.1 Zusammenfassung	167
9.2 Ausblick	169
10 Literaturverzeichnis	171
11 Anhang.....	201
11.1 Beispielhafte Anwendung der Maßnahmengenerierung.....	201
11.2 Studienarbeiten.....	206
11.3 Genutzte Softwareprodukte.....	207

Abkürzungsverzeichnis

APS	Advanced Planning and Scheduling
BDE	Betriebsdatenerfassung
BM	Betriebsmittel
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Ct	Cent
DIN	Deutsches Institut für Normung
d. h.	das heißt
DSM	Demand Side Management
EDE	Energiedatenerfassung
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEX	European Energy Exchange
EPEX	European Power Exchange
ERP	Enterprise Resource Planning
EU	Europäische Union
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FIFO	First-in-First-out
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
KMU	Kleinere und mittlere Unternehmen
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MDE	Maschinendatenerfassung
MEM	Methods-Energy-Measurement
MES	Manufacturing Execution System

Abkürzungsverzeichnis

MILP	Mixed-Integer Linear Programming
Min.	Minute
Mrd.	Milliarde
MRP II	Manufacturing Resource Planning
MTM	Methods-Time-Measurement
MTTR	Mean Time To Repair
OPC UA	OPC Unified Architecture
OTC	Over-the-Counter
p.a.	Pro Jahr (per anno)
POD	Production Operator Dashboard
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PV	Photovoltaik
R	Korrelationskoeffizient
RTP	Real-Time-Pricing
SAP ME	SAP Manufacturing Execution
SAP ME WIP	SAP ME Work in Process
SAP MII	SAP Manufacturing Integration & Intelligence
SAP PCo	SAP Plant Connectivity
sog.	sogenannt
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TOU	Time-of-Use
u.a.	Unter Anderem
UML	Unified Modelling Language

ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel

Verzeichnis der Formelzeichen

Symbol	Bedeutung
α	Gewichtungsfaktor
AktAVO	Index des aktuellen Arbeitsvorgangs
AnzAVO	Anzahl der Arbeitsvorgänge des Auftrags
$c_{\text{Ausgleich}}$	Preis für Ausgleich durch Energieversorger
c_{Eigen}	Preis für zusätzliche Eigenversorgung
$c_{\text{Einspeisung}}$	Einspeisevergütung
$c_{\text{Gestehung}}$	Stromgestehungskosten
c_{Handel}	Preis für kurzfristigen Börsenhandel
$c_{\text{Opportunitaet}}$	Opportunitätskosten durch entgangene Einspeisung
c_{Regel}	Preis für Abweichung von Regelleistungsabruf
c_{Spot}	Spotmarktpreis
$c_{\text{Spot, Transaktion}}$	Transaktionsgebühren
$c_{\text{Strafe,Ausgleich}}$	Strafkosten für Lastgangabweichung
$c_{\text{Verguetung, Regel}}$	Vergütung der Regelleistung
c_n	Preis des Strommarktproduktes n
C_b	Kapazität des Puffers b
$\cos \varphi$	Leistungsfaktor im Wechselstromkreis
e_{Handel}	Gehandelte Energiemenge
ε_n	Anteil der Bezugsform n an Bezug
F_B	Aktueller Füllstand des Puffers
$F_{B,0}$	Ausgangsfüllstand

Verzeichnis der Formelzeichen

$F_{B,max}$	Maximaler Füllstand des Puffers
γ	Zeitlicher Anteil des Betriebszustands
I	Intensität
I_{el}	Stromstärke
K_{Δ}	Kosten durch Lastgangabweichung
$K_{\Delta,max}$	Maximale abweichungsbedingte Mehrkosten
K_F	Fixkosten des Strombezugs
$K_{Ma\ssnahmen}$	Kosten für den Einsatz von Lastmanagementmaßnahmen
K_S	Tatsächliche Stromkosten
$K_{Strafe,Regel}$	Strafkosten durch Energieversorger
LG	Lastgang
LGA	Durchschnittliche Lastgangabweichung
LGA_{max}	Maximale Gesamtlastgangabweichung eines Auftrags in der Warteschlange
M_n	Menge durch Bezugsform n
M_{Regel}	Menge der angebotenen Regelleistung
MRR	Materialabtragsrate
$P, P(t)$	Elektrische Wirkleistung
$P_{Abweichung}$	Lastgangabweichung
$P_{ERZ,IST}$	Ist-Erzeugungsleistung
$P_{ERZ,PLAN}$	Plan-Erzeugungsleistung
P_{IST}	Ist-Leistungsaufnahme
P_{PLAN}	Plan-Leistungsaufnahme
ΔP	Leistungsveränderung durch Wechsel des Betriebs-

	zustands
$\emptyset P_0$	Leistungsaufnahme eines Zustands
PZ	Prioritätskennwert
PZ_{Last}	Prioritätskennwert gemäß der zu erwartenden Lastgangabweichung
$PZ_{Last,1}$	Prioritätskennwert gemäß der absoluten Lastgangabweichungen
$PZ_{Last,2}$	Prioritätskennwert gemäß der abweichungsbedingten Mehrkosten
$PZ_{Schlupf}$	Prioritätskennwert gemäß der verbleibenden Schlupfzeit
SEC	Spezifischer Energiebedarf
SLG	Soll-Lastgang
ST	Plan-Starttermin des Auftrags
ST_{akt}	Aktualisierter Starttermin des Auftrags
ST_{IST}	Ist-Starttermin
ST_{PLAN}	Plan-Starttermin
SSZ	Sicherheitsschlupfzeit
SZ	Schlupfzeit
SZ_{max}	Maximale Schlupfzeit eines Auftrags innerhalb der Warteschlange
t	Zeit
$t_{Amortisation}$	Amortisationszeit
$t_{B,0}$	Dauer bis zur Leerung des Puffers
$t_{B,max}$	Dauer bis zur Füllung des Puffers
$t_{B,aus,0}$	Dauer bis zur Leerung des Ausgangspuffers

Verzeichnis der Formelzeichen

$t_{B,aus,max}$	Dauer bis zur Füllung des Eingangspuffers
$t_{B,ein,0}$	Dauer bis zur Leerung des Eingangspuffers
$t_{B,ein,max}$	Dauer bis zur Füllung des Eingangspuffers
t_{basis}	Dauer eines Intervall
$t_{Einsatz}$	Einsatzdauer einer Maßnahme
t_{max}	Maximale Einsatzdauer
t_{min}	Technisch minimale Einsatzdauer
t_r	Reaktionszeit
t_{takt}	Freigabetakt
t_w	Zeitdauer für Zustandswechsel
Δt	Dauer eines Intervall
$T_{0,i}$	Startzeitpunkt des Intervalls i
$T_{0,i+1}$	Endzeitpunkt des Intervalls i
TAE_{Plan}	Plan-Bearbeitungsende des Auftrags
TP_0	Planungszeitpunkt
U_{el}	Elektrische Spannung
ZDF	Durchführungszeit
ZDF_{ges}	Gesamtdurchführungszeit
ZDF_{IST}	Ist-Durchführungszeit
ZDF_{PLAN}	Plan-Durchführungszeit
ZUE_{min}	Mindestübergangszeit
ZZ	Umwandlungsrate des Betriebsmittels
ZZ_{ab}	Rate des Pufferabgangs
ZZ_{aus}	Abgangsrate

ZZ_{ein}

Zugangsrate

ZZ_{zu}

Rate des Pufferzugangs

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Der fortschreitend wachsenden Weltbevölkerung¹ und dem allgemeinen Anstieg des Lebensstandards in vielen Regionen der Welt steht die begrenzte Reichweite natürlicher Ressourcen gegenüber, um die Güternachfrage der globalen Konsumentenklasse zu erfüllen (TRAINER 2007, ABELE & REINHART 2011, UNITED NATIONS 2012, REINHARDT 2013, UNITED NATIONS 2015a). Vor allem die Bewältigung des anthropogenen Klimawandels, ausgelöst durch Treibhausgasemissionen, gilt als eine der größten Herausforderungen unserer Zeit (UNITED NATIONS 2015b). Da die weltweiten CO₂-Emissionen in den vergangenen Jahrzehnten im Vergleich zum Bevölkerungszuwachs überproportional zugenommen haben², hat die internationale Politik inzwischen anspruchsvolle Klimaschutzziele festgelegt, die jüngst im Rahmen des Pariser Klimagipfels bekräftigt wurden. Aktuelle Vereinbarungen sehen eine Einschränkung des Treibhauseffektes und die Begrenzung der Klimaerwärmung auf unter 2 ° C gegenüber der vorindustrialisierten Zeit vor. Da etwa zwei Drittel der weltweiten Treibhausgase durch den Energiesektor verursacht werden, kommen diese Ziele einer Umstrukturierung der globalen Energieerzeugung gleich (IEA 2016). Das vorrangige Entwicklungsziel ist dabei vielfach der Ausbau erneuerbarer Energien (EE), deren Anteil an der Stromerzeugung beispielsweise innerhalb der EU bis zum Jahr 2030 auf 27 % erhöht werden soll. Auf diese Weise soll eine Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Treibhausgasemissionen vorangetrieben werden (UNITED NATIONS 2015b, EUROPÄISCHE KOMMISSION 2016).

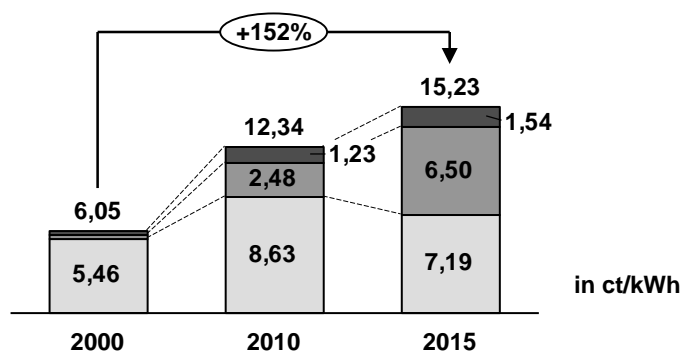
Angesichts des Klimawandels hat die deutsche Bundesregierung im Jahr 2010 ein Energiekonzept vorgelegt, das die Substitution konventioneller Energieträger durch erneuerbare Energien – vorrangig durch Wind- und Solarenergie – vorsieht. So soll der Bruttostromverbrauch im Jahr 2020 bereits zu 35 % aus erneuerbaren Energien gedeckt werden und dieser Anteil bis zum Jahr 2050 auf 80 % ansteigen. Die damit einhergehende Volatilität der Stromerzeugung erfordert verstärkte Bemühungen, das Stromnetz im Gleichgewicht zwischen

¹ Bis zum Jahr 2030 wird ein Zuwachs der Weltbevölkerung auf über 8,5 Milliarden Menschen erwartet (UNITED NATIONS 2015a).

² Zwischen 1990 und 2007 ist die Bevölkerung im Schnitt um 1,4 % p.a. angewachsen, wohingegen die weltweiten CO₂-Emissionen im selben Zeitraum um 2 % p.a. zugenommen haben (UNITED NATIONS 2012).

1 Einleitung

Erzeugung und Verbrauch auszubalancieren. Als Indikatoren hierfür gelten unter anderem die Zunahme von Netzsicherheitsmaßnahmen³ durch die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB), der ansteigende Bedarf neuer Netztrassen und Reservekraftwerke für den Spitzenlastausgleich sowie ausgeprägte Schwankungen der kurzfristigen Strompreise. Die volkswirtschaftlichen Kosten, die diese Investitionen und der zusätzliche Regelbedarf⁴ mit sich bringen, werden letztlich auf die privaten und industriellen Endkunden umgelegt und führen infolgedessen zu einem generellen Anstieg der Strompreise⁵ (vgl. Abbildung 1). (TRAINER 2007, BMWI & BMU 2010, DENA 2010, KONSTANTIN 2013, BMWI 2014, BDEW 2015, BNETZA & BKARTA 2015, WIRTH 2017)



Legende: ■ : Steuern ■ : Umlagen □ : Beschaffung, Netzentgelte & Vertrieb

Abbildung 1: Entwicklung der Industriestrompreise zwischen 2000 und 2015⁶

Der industrielle Sektor gilt mit einem Anteil von derzeit annähernd 47 % am Nettostromverbrauch als größter Stromverbraucher in Deutschland (ZIESING 2017). ROHDE (2016) gibt an, dass der elektrische Strom als Energieträger neben Gas, Fernwärme und Weiteren einen Anteil von 34 % am Endenergieverbrauch im produzierenden Gewerbe aufweist. Auf Basis der durchschnittlichen Preise der Energieträger im selben Zeitraum lassen sich somit die jeweiligen Anteile an den Gesamtenergiekosten abschätzen (THIEDE 2012, GRABL 2015). Die Auswertung statistischer Daten für das Jahr 2015 zeigt, dass der elektrische Strom mit 64 % einen überproportionalen Anteil an den Energie-

³ Zu diesen Maßnahmen zählen Eingriffe in Kraftwerksfahrpläne (Redispatch) sowie das Einspeisemanagement zur Abregelung erneuerbarer Energieerzeuger (BNETZA & BKARTA 2015).

⁴ Die Kosten für die Vermeidung von Netzengpässen lagen im Jahr 2015 bei über 1 Mrd. € (WIRTH 2017).

⁵ Seit dem Jahr 2000 ist der Strompreis für industrielle Endkunden um über 150 % angestiegen. Ein Großteil des Anstiegs ist auf die Umlagen, z. B. zum Ausbau erneuerbarer Energien (EEG-Umlage), zurückzuführen (BMJV 2014, BDEW 2015, WIRTH 2017).

⁶ Daten gemäß BDEW (2015)

kosten ausmacht (vgl. Abbildung 2). Insbesondere vor dem Hintergrund des zuletzt deutlichen Preisanstiegs für industrielle Endkunden kommt den Stromkosten daher eine hohe wirtschaftliche Bedeutung zu (THIEDE 2012). Infolge der Energiewende stehen produzierende Unternehmen in Zukunft vor der Herausforderung, bewusst mit der elektrischen Energie umzugehen und diese als knappes Gut zu begreifen (REINHART et al. 2011). Nur somit können sie dem Anspruch gerecht werden, einen nachhaltigen ökonomischen, ökologischen und sozialen Beitrag in der Entwicklung der Gesellschaft zu leisten.

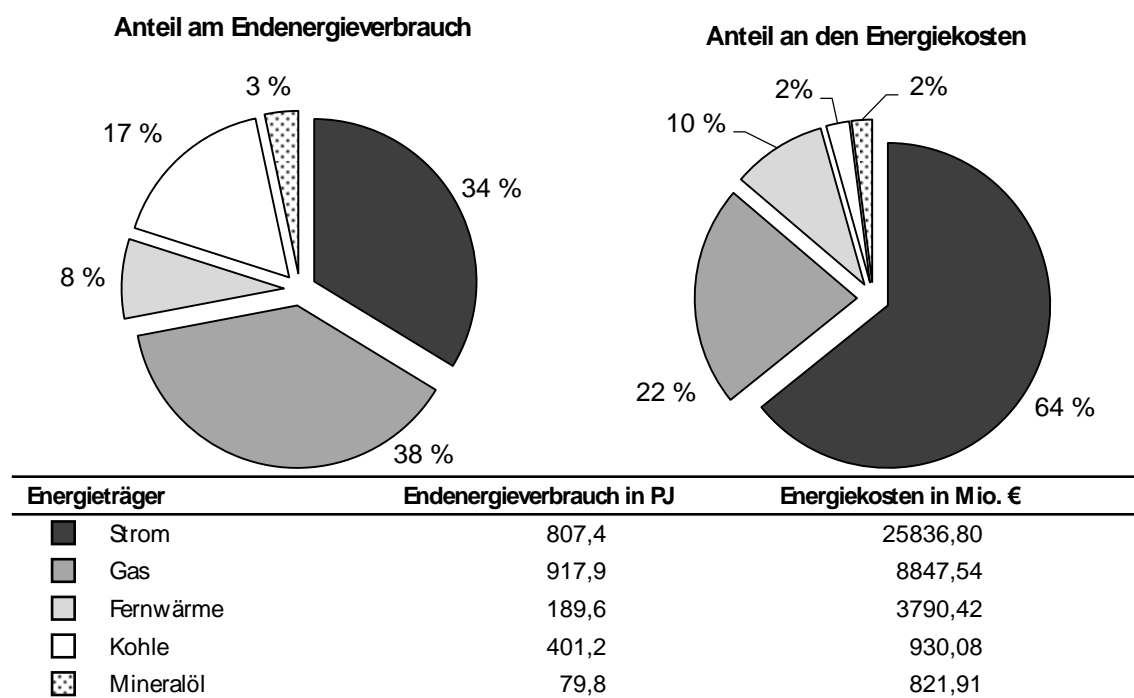


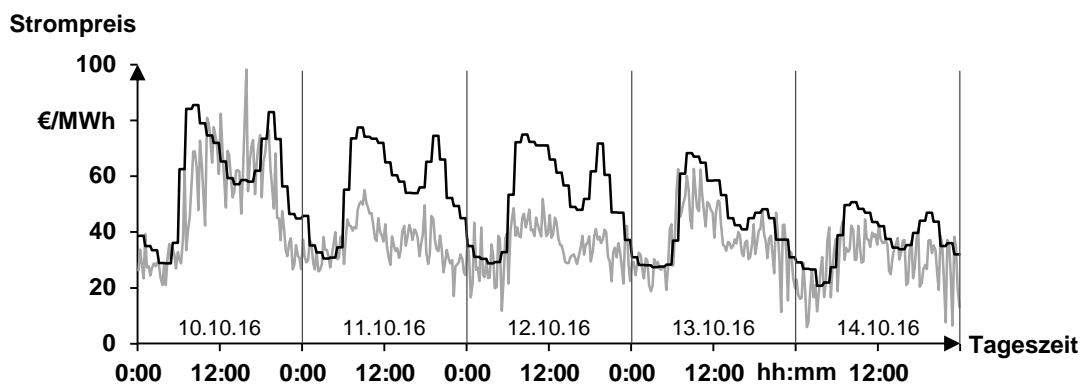
Abbildung 2: Energiekosten im verarbeitenden Gewerbe nach Energieträgern⁷

Eine aktive Integration der Nachfrageseite in das Energiesystem in Form von Demand Side Management (DSM) oder in Form intelligenter Stromnetze (Smart Grids) stellt eine kosteneffiziente Alternative dar, Reserveleistung für den Netzausgleich bereitzustellen und den Bedarf an Spitzenlastkraftwerken zu reduzieren (PAULUS & BORGGREFE 2011, DENA 2012). Dabei werden in der Regel zeitvariable Vergütungs- oder Tarifmodelle geschaffen, um den Kunden einen wirtschaftlichen Anreiz für eine zeitliche Verlagerung oder einen zeitweisen Verzicht ihres Strombedarfs zu bieten (DEPARTMENT OF ENERGY 2006). So zeigt ein Blick auf den Verlauf der kurzfristigen Strompreise des europäischen Spotmarktes (engl.: European Power Exchange – (EPEX)) die ausgeprägten Preis-

⁷ Die verwendeten Daten finden sich bei ROHDE (2016), DESTATIS (2017), BAFA (2017) und STATISTA (2017).

1 Einleitung

schwankungen innerhalb eines einzelnen Tages sowie einer gesamten Woche (vgl. Abbildung 3). Variable Tarifmodelle sind insbesondere für Produktionsunternehmen attraktiv, da Produktionsprozesse gegenüber Haushalten ein höheres Lastverschiebungspotenzial aufweisen und deren informationstechnische Erschließung mit geringen Investitionen möglich ist. GRABL (2015) definiert diese „(...) Fähigkeit (eines Unternehmens), sich schnell und mit sehr geringem finanziellen Aufwand an Änderungen des Energiemarktes anzupassen“ als Energieflexibilität. Die Ausnutzung zeitvariabler Strompreismodelle bietet Unternehmen somit die Möglichkeit, Energiekosten einzusparen und einen aktiven Beitrag zur Netzstabilität zu leisten. (DEPARTMENT OF ENERGY 2006, KLOBASA 2009, DENA 2010, VON ROON & GOBMAIER 2010, APPELRATH et al. 2011, PAULUS & BORGGREFE 2011, EMEC et al. 2013, ACATECH 2015)



Legende: — : EPEX Spotmarkt, Day-Ahead Auktion (European Electricity Index – ELIX)
— : EPEX Kontinuierlicher Intraday-Handel

Abbildung 3: Verlauf der Spotmarktpreise der European Power Exchange vom 10.10. bis zum 14.10.2016⁸

Darüber hinaus besteht im Zuge der Integration erneuerbarer Energie sowohl in Deutschland als auch international der Trend zu einer anteiligen Dezentralisierung der Stromerzeugung. Durch die Eigenerzeugung lässt sich der Bedarf an Transportkapazitäten senken und die Gesamtkosten können somit reduziert werden (HESSELBACH 2012, BRUCKNER et al. 2014, WIRTH 2017). Das Potenzial, durch eine dezentrale Stromerzeugung die Stromkosten und auch den betrieblichen CO₂-Fußabdruck⁹ zu minimieren, haben deutsche Unternehmen für sich erkannt. Insgesamt zeichnet sich eine Zunahme

⁸ Daten gemäß EPEX (2016)

⁹ Der Vermeidungsfaktor von Stromerzeugung aus Photovoltaik lag 2013 netto bei 705,69 g / kWh (MEMMLER et al. 2014).

der industriellen Stromeigenerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und Photovoltaik ab¹⁰ (DIHK 2014). Begünstigt durch die fallenden Investitionskosten¹¹ dieser Technologien und das aktuell niedrige Zinsniveau, wird in den kommenden Jahren ein weiterer Zuwachs erwartet (WIRTH 2017).

Während selbsterzeugter Strom in der Vergangenheit vorrangig in das öffentliche Netz eingespeist wurde, rückt infolge fallender Einspeisevergütungen¹² dessen Direktverbrauch vor Ort in Zukunft stärker in den Fokus. Da der eigenerzeugte Strom unter Berücksichtigung aller Umlagen nach Amortisation der Investition günstiger als der Netzstrom ist, bietet der Direktverbrauch den Unternehmen langfristige Kostenersparnisse (WIRTH 2017). Um die Wirtschaftlichkeit des Eigenverbrauchs zu gewährleisten, ist jedoch eine hohe Gleichzeitigkeit zwischen Stromerzeugung und -bedarf erforderlich, die entweder über Energiespeicherung oder aber durch eine Flexibilisierung der elektrischen Lasten eingestellt werden muss (NEUGEBAUER 2014).

1.2 Motivation der Arbeit

Die dargelegte Ausgangssituation zeigt, dass sich produzierende Unternehmen in Zukunft vermehrt mit unterschiedlichen Beschaffungsmodellen für elektrische Energie auseinandersetzen müssen. Unabhängig davon, ob das jeweilige Unternehmen als Bezugsstrategie die Ausnutzung zeitvariabler Strommarktpreise wählt oder den Ausbau einer dezentralen Eigenversorgung vorantreibt, kommt dies einer zunehmenden Nachfrageflexibilität und einer Abkehr von der traditionellen Flatrate-Versorgung gleich. Die elektrische Energie wird somit zu einer begrenzten Ressource, deren wirtschaftlicher Einsatz geplant und prädisponiert werden muss (HESSEL 2008).

Die Flexibilisierung des Strombezugs produzierender Unternehmen steht dabei immer in Konkurrenz zu deren logistischen Zielgrößen, wie z. B. der Termintreue. Eine Gefährdung der Produktionsprozesse infolge limitierter Verfügbarkeit des Stroms ist in der Regel mit hohen Opportunitätskosten verbunden und wird

¹⁰ Das Energiewende-Barometer der Industrie- und Handelskammer zeigt, dass mehr als 15 % der befragten Unternehmen Umsetzungen zur dezentralen Stromerzeugung auf Basis von EE betreiben oder in Planung haben (DIHK 2014).

¹¹ Die Investitionskosten für PV-Anlagen sind in den vergangenen Jahren durch technologische Fortschritte und Skaleneffekte um durchschnittlich 13 % p.a. gefallen (WIRTH 2017).

¹² Beispielsweise liegt bereits seit dem Jahr 2012 die Einspeisevergütung für PV-Strom niedriger als der Preis für Netzstrom. Ab 2020 werden die ersten geförderten PV-Anlagen vollständig aus der Einspeisevergütung ausscheiden (WIRTH 2017).

1 Einleitung

von Unternehmen folglich nicht akzeptiert (PAULUS & BORGGREFE 2011, BEIER et al. 2016b). Die logistische Zielerreichung eines Unternehmens obliegt maßgeblich deren Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Folglich ist es notwendig, den Energiebezug ebenfalls in der PPS abzubilden und eine gesamtheitliche Lösung des resultierenden betriebswirtschaftlichen Problems anzustreben (REINHART et al. 2011, GRISMAJER & SELIGER 2012, PUTZ et al. 2015).

Rund die Hälfte des Stromverbrauchs produzierender Unternehmen fällt direkt durch die Produktionsprozesse an (ENGELMANN 2009, ALBAT et al. 2012, FLEITER et al. 2013). Infolgedessen nimmt die PPS über die Auswahl von Betriebsmitteln und die Terminierung von Durchführungszeiten einzelner Prozessschritte, beispielsweise in Form optimierter Belegungspläne, bedeutenden Einfluss auf den resultierenden Energiebedarf¹³ (HESSEL 2008, REINHART et al. 2011, GRISMAJER & SELIGER 2012, EMEC et al. 2013, LANGROCK 2015). Bestehende Ansätze der Energieorientierung in der PPS fokussieren dabei insbesondere auf die Feinplanung der Produktion. Da Produktionspläne infolge unausweichlicher Störungen und Abweichungen im realen Betriebsablauf jedoch schnell veralten, gilt die geringe Übereinstimmung zwischen dem Plan- und dem Ist-Ablauf als eine der zentralen Schwachstellen von Planungssystemen. Zur Absicherung der logistischen Zielerreichung sind steuernde Eingriffe in das Produktionsgeschehen daher unerlässlich (KURBEL 2005, LÖDDING 2008, VAN BRACKEL 2009, WIENDAHL 2010). Findet demnach im Rahmen der Produktionsplanung eine Vorfestlegung des Energiebedarfs statt, so ist ebenso wie für die klassischen Zielgrößen zu deren Einhaltung eine zielgerichtete Produktionssteuerung erforderlich (SCHULTZ et al. 2015A).

Das Potenzial für Eingriffe in den Energiebedarf ist dabei maßgeblich von der Transparenz hinsichtlich des aktuellen Stromangebots und -bedarfs sowie der Reaktionszeit des Unternehmens abhängig. Folglich stellt die Integration der Ressource Strom in die Informationssysteme der PPS und die Verarbeitung der entsprechenden Daten in Echtzeit einen Schlüsselbaustein für die Flexibilisierung des industriellen Strombedarfs dar (GRISMAJER & SELIGER 2012). Insbesondere in der Produktionssteuerung bedarf es einer hohen Qualität der Rückmeldedaten für eine effektive Entscheidungsunterstützung (SCHUH et al. 2007). Steigende Rechenleistungen und günstig verfügbare Hardware ermöglichen dabei zunehmend komplexere Entscheidungslogiken in der PPS (SCHUH et al. 2014).

¹³ Im Folgenden wird der Begriff „Energie“ synonym zu „elektrischer Energie“ verwendet.

Kommunikationsstandards und Frameworks für die Verarbeitung von Energiedaten sind sowohl in der Forschung als auch in der Praxis bereits seit einigen Jahren etabliert (VIJAYARAGHAVAN & DORNFELD 2010, VIKHOREV et al. 2012, SAUER et al. 2016). Jedoch werden Systeme für das Energie- und Lastmanagement in der Regel isoliert von der Produktion betrieben und müssen folglich stärker mit der Produktionssteuerung verbunden werden (MÜLLER et al. 2013, NEUGEBAUER 2014). Ebenso findet in bestehenden Ansätzen zur Berücksichtigung der elektrischen Energie in der PPS nur eine unzureichende Betrachtung des Energiebezugs sowie der produktionsfernen Verbraucher statt (PUTZ et al. 2015). Infolgedessen besteht im Bereich der Produktionssteuerung nach wie vor der Bedarf nach einem Informationssystem, das den flexiblen Strombezug abbildet und den Produktionsverantwortlichen bei der Bewältigung dieser komplexen Steuerungsaufgabe unterstützt.

1.3 Zielsetzung

Der dargelegten Motivation entsprechend liegt das übergeordnete Ziel dieser Arbeit in der Entwicklung eines Systems zur Produktionssteuerung, das die Verfügbarkeit der elektrischen Energie als begrenzte Ressource berücksichtigt. Das System soll auf diese Weise einen Beitrag zur Reduzierung der Gesamtenergiekosten eines Unternehmens leisten und Energieziele mit den übrigen logistischen Zielgrößen in Einklang bringen.

Zu diesem Zweck sollen neben der elektrischen Energie als Ressource auch deren unterschiedliche Beschaffungsformen in der Produktionssteuerung abgebildet und diesbezüglich eine Anknüpfung an die übergeordnete Produktionsplanung geschaffen werden. Weiterhin gilt es, Steuerungsverfahren zu entwickeln, mit denen einerseits der von einer Produktionsplanung vorgegebene Strombezug trotz unvermeidlicher Störungen im Produktionsbetrieb umgesetzt werden kann und andererseits eine kompensierende Reaktion auf resultierende Abweichungen möglich ist. Um die weitreichende Übertragbarkeit der Steuerung zu gewährleisten, sollen die zu entwickelnden Verfahren auch auf komplexe Materialflüsse, wie sie beispielsweise in der Werkstattfertigung vorliegen, anwendbar sein. Dabei sollen neben den Produktionsanlagen auch die produktionsfernen Verbraucher einer Fabrik adressiert werden, da diese einen nennenswerten Anteil am gesamten Energiebedarf der Fabrik ausmachen. Weiterhin ist es infolge dieser komplexen Zielsetzung von Bedeutung, dass die Produktionssteuerung in ein Informationssystem integriert wird. Zu diesem

1 Einleitung

Zweck müssen die erforderlichen Schnittstellen und Datenstrukturen für eine Implementierung geschaffen werden. Um diese Gesamtzielsetzung zu erreichen, wird in der vorliegenden Arbeit ein System entwickelt, das die in Abbildung 4 dargestellten Module *Energieorientiertes Informationsmanagement*, *Bedarfsüberwachung* und *Energieorientierte Steuerungsverfahren* umfasst.

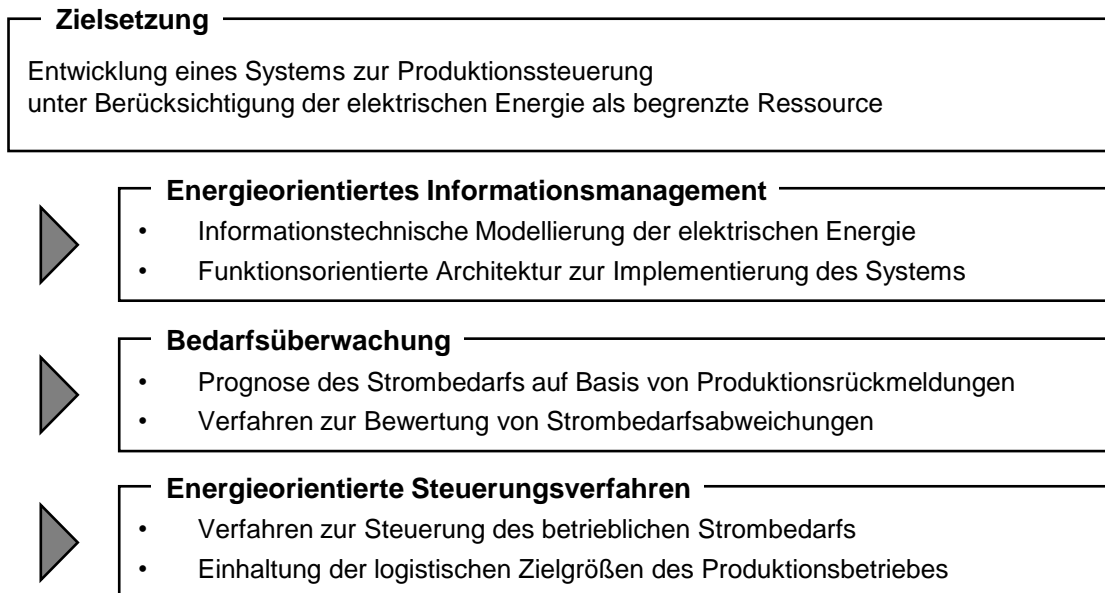


Abbildung 4: Zielsetzung und Module der vorliegenden Arbeit

Das *energieorientierte Informationsmanagement* soll vorrangig die funktionale Einordnung der Produktionssteuerung in das Zusammenspiel aus der PPS, den Energieversorgern und dem laufenden Produktionsprozess vor dem Hintergrund eines flexiblen Strombezugs beschreiben. Aus dieser Einordnung soll zunächst eine Systemarchitektur resultieren. Aufbauend auf der Architektur sollen anschließend die erforderlichen Datenstrukturen und Schnittstellen beschrieben werden, die zur Implementierung des Systems in einer betrieblichen Softwarelandschaft erforderlich sind.

Im Rahmen der *Bedarfsüberwachung* soll ein Vorgehen entwickelt werden, anhand dessen sich der real einstellende Strombedarf eines Unternehmens auf Grundlage des aktuellen Produktionszustands ableiten lässt und Abweichungen gegenüber der vorhergehenden Planung identifiziert werden können. Weiterhin sollen die mit den Abweichungen assoziierten Stromkosten modelliert werden, damit im Gesamtzielsystem der PPS eine Bewertung der Abweichungen vorgenommen werden kann.

Um angemessene Reaktionen auf die identifizierten Abweichungen zu ermöglichen, sollen schließlich sich ergänzende *energieorientierte Steuerungsverfahren* erarbeitet werden. Hierzu sollen zunächst die in der Literatur beschriebenen klassischen Aufgaben der Produktionssteuerung – insbesondere die Auftragsfreigabe und die Reihenfolgebildung – im Hinblick auf die überordnete Zielsetzung analysiert und an die zusätzliche Zielgröße angepasst werden. Diese Aufgaben sollen weiterhin um ein situationsbasiertes Lastmanagement ergänzt werden, mit dem auch produktionsferne Verbraucher in die Steuerung integriert werden können. Das Ziel ist es, die Steuerungsverfahren eigenständig oder in Kombination mit einer konventionellen Produktionssteuerung einsetzen zu können, um die Energiekosten eines Unternehmens zu reduzieren. Dabei soll gewährleistet werden, dass die Erreichung der übrigen logistischen Zielgrößen nicht gefährdet wird. Die Betrachtung wird dabei auf die diskrete Fertigung beschränkt, da zur Steuerung verfahrenstechnischer Prozesse grundlegend unterschiedliche Methoden erforderlich sind.

1.4 Aufbau der Arbeit

Zur Erreichung der im vorhergehenden Abschnitt definierten Zielsetzung wurde für diese Arbeit die in Abbildung 5 dargestellte Struktur aus neun inhaltlichen Kapiteln gewählt. So werden im Anschluss an die in *Kapitel 1* vorgenommene einführende Darstellung der Ausgangssituation, der Motivation und der daraus abgeleiteten Zielsetzung in *Kapitel 2* die erforderlichen Grundlagen zur betrieblichen Energieversorgung sowie zur Aufbau- und Ablauforganisation der Produktion mit besonderem Betrachtungsfokus auf die Produktionssteuerung eingeführt. In *Kapitel 3* erfolgt die Diskussion des für die vorliegende Arbeit relevanten Standes der Forschung und der Technik, aus dem der Handlungsbedarf und die allgemeinen Anforderungen an die energieorientierte Produktionssteuerung abgeleitet werden. Auf dieser Grundlage wird in *Kapitel 4* ein Überblick über das zu entwickelnde System, dessen Komponenten und deren Zusammenwirken zur Adressierung des Forschungsbedarfs gegeben.

Als erste Teilkomponente wird in *Kapitel 5* das Informationsmanagement als informationstechnische Grundlage des Systems dargelegt. Darauf aufbauend erfolgt in *Kapitel 6* eine Beschreibung der Bedarfsüberwachung zur Ermittlung des situationsabhängigen Strombedarfs auf Basis des aktuellen Produktionszustands sowie der sich daraus ergebende Abweichungsidentifikation.

1 Einleitung

Anschließend werden in *Kapitel 7* die energieorientierten Steuerungsverfahren entwickelt, mit denen Unternehmen ihren Strombedarf kurzfristig anpassen können. Die technischen Umsetzungen des entwickelten Steuerungssystems sowie dessen Validierung erfolgt im Rahmen von *Kapitel 8*, bevor in *Kapitel 9* die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst werden und ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf zur Berücksichtigung der elektrischen Energie in der Produktionssteuerung gegeben wird.

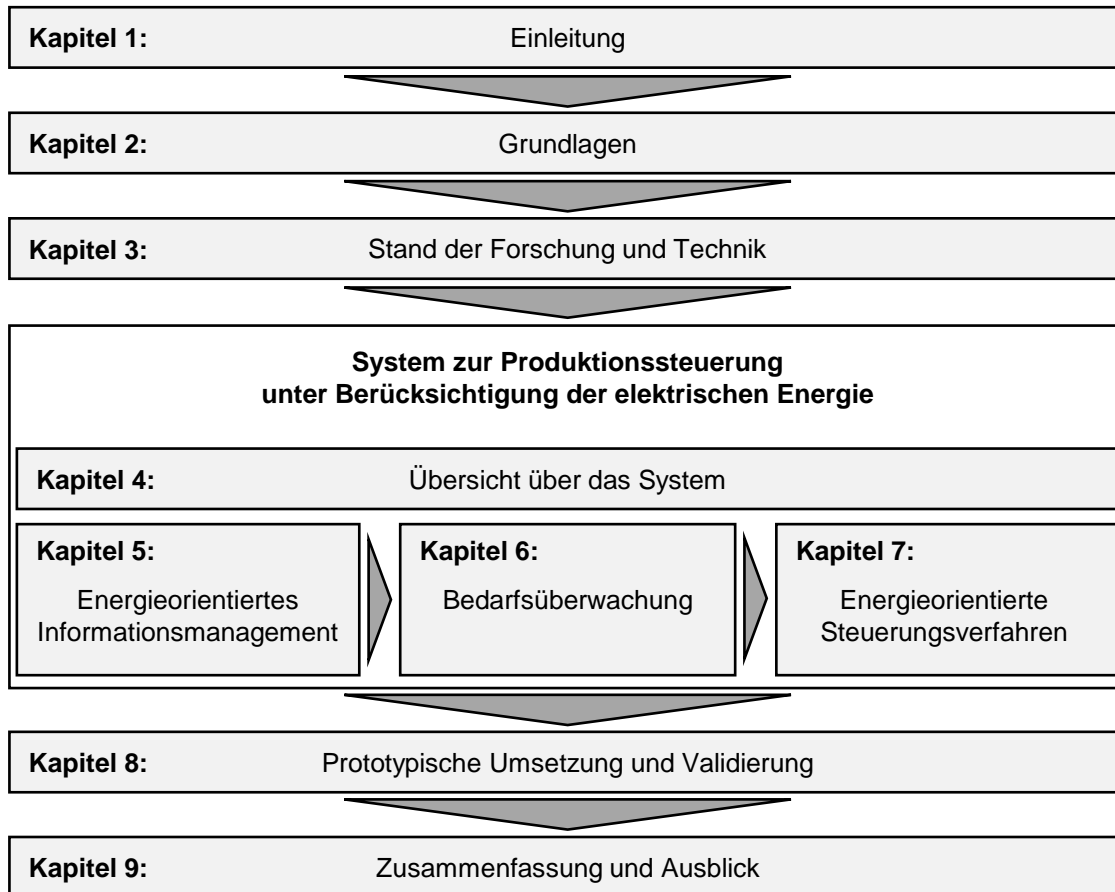


Abbildung 5: Aufbau der vorliegenden Arbeit

2 Grundlagen

2.1 Übersicht

Aufbauend auf der Darlegung der Ausgangssituation und der daraus abgeleiteten Zielsetzung der vorliegenden Arbeit erfolgt in diesem Kapitel eine Erörterung der relevanten Grundlagen. Das Kapitel dient somit als Ausgangspunkt für die wissenschaftliche Bearbeitung des flexiblen Energiebezugs in der Produktionssteuerung und soll ein einheitliches Verständnis der begrifflichen Zusammenhänge vermitteln. Aufgrund der spezifischen Zielsetzung der Arbeit erfolgt in Abschnitt 2.2 zunächst eine Betrachtung energietechnischer Grundlagen sowie des industriellen Strombedarfs, bevor in Abschnitt 2.3 die Energieversorgung produzierender Unternehmen beschrieben wird. In Abschnitt 2.4 werden anschließend die theoretischen Grundlagen der PPS mit dem Fokus auf den Zielen und Aufgaben erörtert und schließlich in Abschnitt 2.5 deren Umsetzung in betrieblichen Informationssystemen vorgestellt.

2.2 Strombedarf produzierender Unternehmen

2.2.1 Begriffsdefinition

Energie

Der Begriff *Energie* beschreibt die Fähigkeit eines Systems, Arbeit zu verrichten, und stellt somit einen Zustand des Systems dar, der durch die Zufuhr bzw. die Abgabe von Arbeit verändert werden kann (MÜLLER et al. 2013). Die Energie wird allgemein in der SI-Einheit Joule (J) gemessen. Technisch betrachtet ist die Energie in primären oder sekundären *Energieträgern* gespeichert. Die *Primärenergie* fasst dabei natürliche Energieträger wie fossile Brennstoffe, solare Einstrahlung, Wind etc. zusammen, aus denen durch Umwandlungen technisch verwertbare *sekundäre Energieträger* erzeugt werden (z. B. Benzin, Heizöl und Strom). Als *Endenergie* wird der Anteil der Sekundärenergie bezeichnet, der an den Nutzer übergeben wird. Die Energie, die der Nutzer davon schließlich für die gewünschte Leistung einsetzt, gilt als *Nutzenergie*. (ZAHORANSKY 2009, SCHWAB 2012, KONSTANTIN 2013, MÜLLER et al. 2013)

2 Grundlagen

Darüber hinaus hat sich im allgemeinen Sprachgebrauch der Begriff des *Energieverbrauchs* etabliert. Dieser Begriff ist im thermodynamischen Sinn nicht korrekt, da Energie nicht verbraucht werden kann, bezeichnet in der Praxis jedoch „(...) die Menge der eingesetzten Energie (...)“ (DIN 16001). Ein *Energieverbraucher* stellt folglich eine Einheit dar, die im Zuge ihrer Funktionsausführung Energie nutzt. Als Sprachkonvention wird im Folgenden ein bereits realisierter Einsatz einer elektrischen Energiemenge (ex post) als Energieverbrauch und ein voraussichtlicher bzw. bevorstehender Einsatz als Energiebedarf (ex ante) bezeichnet werden.

Elektrische Energie

In der Physik sind verschiedene Energieformen, wie z. B. die mechanische, die thermische oder die magnetische Energie, beschrieben. Da diese im Kontext der vorliegenden Arbeit nicht eingehend betrachtet werden, wird im Folgenden der Begriff Energie mit der *elektrischen Energie* gleich gesetzt. Elektrische Energie wird im Allgemeinen in Vielfachen der Wattsekunde, z. B. in Kilowattstunden ($\text{kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{Ws}$) oder Megawattstunden ($\text{MWh} = 3,6 \cdot 10^9 \text{Ws}$), angegeben (KONSTANTIN 2013, MÜLLER et al. 2013).

Der Transport elektrischer Energie wird technisch und umgangssprachlich in der Regel als *Strom* bezeichnet. Dabei wird zwischen *Gleichstrom*, bei dem der Betrag der Spannung zeitlich konstant bleibt, und *Wechselstrom*, bei dem sich Betrag und Polarität des Stroms zyklisch mit einer bestimmten Frequenz ändert, unterschieden. Von technischer Bedeutung sind in Deutschland der einphasige und der – als Drehstrom – bezeichnete dreiphasige Wechselstrom mit 230 bzw. 400 V Netzspannung. Die Netzfrequenz beträgt dabei jeweils 50 Hz (SCHWAB 2012, MÜLLER et al. 2013). Die elektrische Wirkarbeit E errechnet sich für alle Formen des Stroms gemäß Formel (1) und (2) aus:

$$E = P \cdot t \tag{1}$$

$$\text{mit } P = U_{el} \cdot I_{el} \cdot \cos \varphi \tag{2}$$

P	Elektrische Wirkleistung
U_{el}	Elektrische Spannung
I_{el}	Stromstärke
$\cos \varphi$	Leistungsfaktor im Wechselstromkreis
t	Zeit

Lastgang

Der zeitliche Verlauf des elektrischen Leistungsbedarfs eines Verbrauchers wird in der Elektrizitätswirtschaft im Allgemeinen als *Lastgang*¹⁴ bezeichnet. Lastgänge können je nach Verwendungszweck über unterschiedliche Zeiträume, wie beispielsweise einen Tag, einen Monat oder ein Jahr erstellt werden. Tageslastgänge sind im deutschen Stromnetz oftmals in 15 Minuten-Intervalle aufgeteilt und stellen für jedes Intervall den Mittelwert des Leistungsbedarfs dar (vgl. Abbildung 6). Aus dem Integral des Lastgangs errechnet sich die Wirkarbeit für den betrachteten Zeitraum.

Fahrplan

Ein prognostizierter Lastgang, den der Verbraucher dem Energielieferanten zu Planungszwecken übermittelt, wird als *Fahrplan* bezeichnet. Somit handelt es sich um eine Vorabfestlegung des Energiebedarfs in Form eines Soll-Lastgangs. Im Allgemeinen wird von Verbrauchern die Einhaltung des Fahrplans im zeitlichen Verlauf angestrebt. (HESSEL 2008, WEIB 2010, PÜSCHEL et al. 2011)

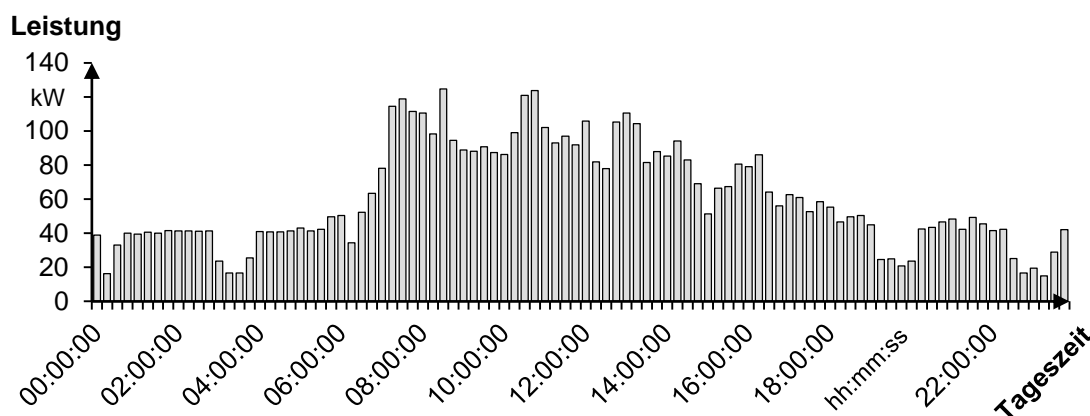


Abbildung 6: Beispielhafter Lastgang eines produzierenden Unternehmens

2.2.2 Zusammensetzung des betrieblichen Strombedarfs

Elektrische Energie kommt in produzierenden Unternehmen für zahlreiche Anwendungen zum Einsatz, wie z. B. Maschinen, Pumpen und Beleuchtung. Rund die Hälfte des Strombedarfs wird dabei direkt für den Produktionsprozess aufgewandt. So gibt ENGELMANN (2009) für ein Beispiel im Karosseriebau einen

¹⁴ Alternativ werden in Literatur und Praxis auch die Begriffe Lastprofil oder Ganglinie verwendet.

2 Grundlagen

Anteil von etwa 51,3 % an, SCHILLIG et al. (2014) nennen 46 % in der Metallbearbeitung und aus den Angaben von FEDER et al. (2015) lassen sich für eine Elektronikherstellung ungefähr 51 % abschätzen. Nach ROHDE (2016) entfallen rund 38 % des Strombedarfs auf die elektrischen Antriebe in der Produktion. Zu den weiteren elektrischen Verbrauchern zählen insbesondere die Druckluftzeugung, die Gebäudetechnik und die Informations- und Kommunikationstechnik (IKT). Eine Zusammenfassung typischer Energieflüsse innerhalb eines Unternehmens ist in Abbildung 7 dargestellt. Die weiteren Energieformen in der Produktion – Raum- und Prozesswärme – werden in dieser Arbeit nicht betrachtet.

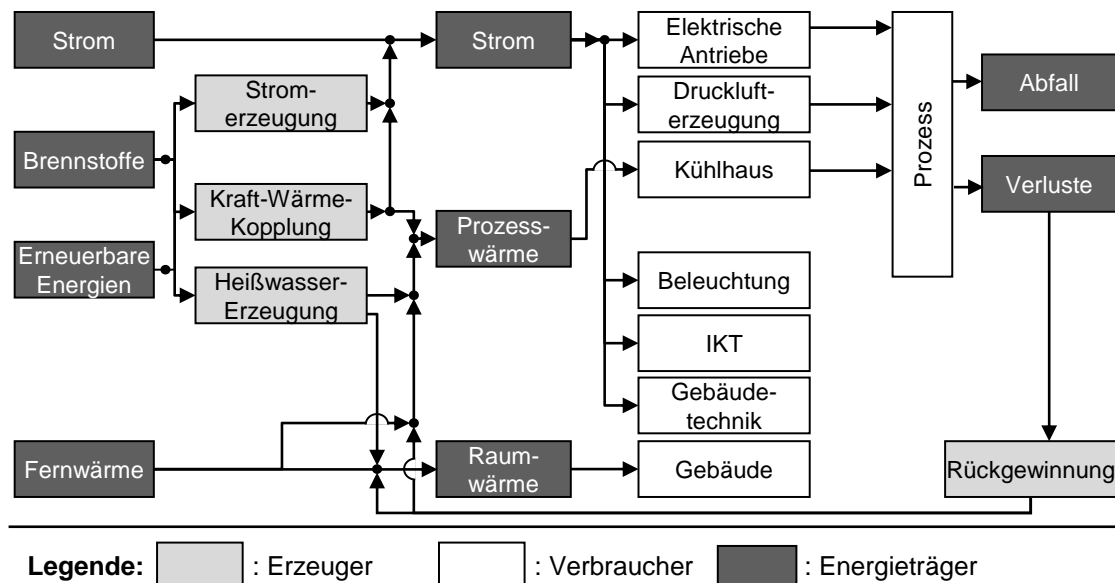


Abbildung 7: *Beispielhafte Darstellung innerbetrieblicher Energieflüsse in Anlehnung an SCHMID (2008) und THIEDE (2012)*

Ein großer Anteil des betrieblichen Strombedarfs fällt folglich außerhalb des eigentlichen Hauptprozesses an. Aus diesem Grund ist eine weitere Strukturierung der produktionsfernen Verbraucher empfehlenswert, die beispielsweise anhand der peripheren Ordnung nach SCHENK et al. (2014) vorgenommen werden kann. Die periphere Ordnung, die von WIRTH (1990) im Zuge seiner Flusstheorie beschrieben und von verschiedenen Autoren, wie z. B. ENGELMANN (2009), HAAG (2013) und MÜLLER et al. (2014), aufgegriffen und angepasst wurde, bietet die Möglichkeit, Energieverbraucher in der Produktion in Abhängigkeit ihrer Beziehung zum Hauptprozess in drei periphere Bereiche zu klassifizieren. (vgl. Abbildung 8). Im Vordergrund steht dabei allein die Analyse der Wirkung eines Verbrauchers auf den Produktionsprozess. Ein festes Regelwerk zur eindeutigen Einteilung einer Anlage in eine bestimmte Ordnung besteht hingegen nicht (MÜLLER et al. 2013).

2.2 Strombedarf produzierender Unternehmen

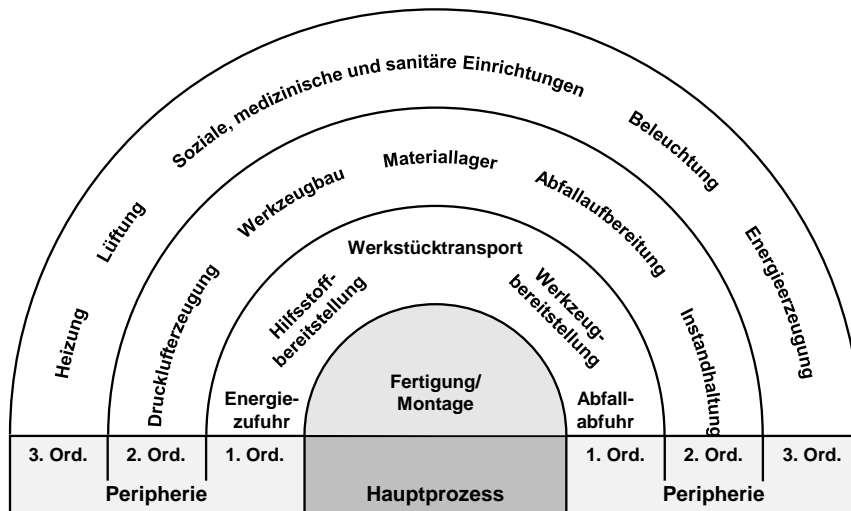


Abbildung 8: Periphere Ordnung nach Schenk und Wirth (HAAG 2013)

Die *Peripherie 1. Ordnung* umfasst Anlagen, die direkt vom Produktionsprogramm abhängig sind, jedoch keinen unmittelbaren Anteil am Wertschöpfungsprozess haben, z. B. der Werkstücktransport. Anlagen der *Peripherie 2. Ordnung* sind nicht vom Produktionsprogramm an sich, sondern von den Arbeitsmitteln des Hauptprozesses abhängig. Hierzu zählt unter anderem die Druckluftherzeugung. Die Anlagen in der *Peripherie 3. Ordnung* sind hingegen gänzlich unabhängig vom Hauptprozess und umfassen stattdessen übergeordnete Einrichtung wie die Heizung und Beleuchtung. Eine exemplarische Anwendung zur Erfassung aller Energieverbraucher im Karosseriebau zeigt Abbildung 9. (WIRTH 1990, HAAG 2013, SCHENK et al. 2014)

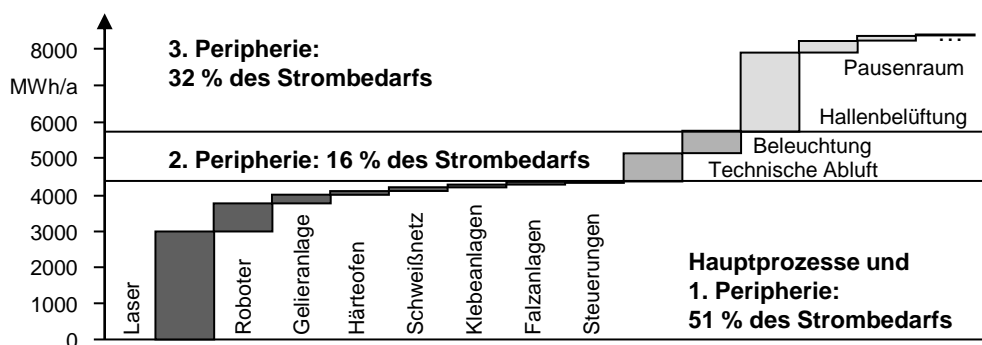


Abbildung 9: Aufteilung des Strombedarfs im Karosseriebau (ENGELMANN 2009)

2.3 Stromversorgung produzierender Unternehmen

2.3.1 Bedarfsdeckung am deutschen Strommarkt

Den Industrieunternehmen in Deutschland stehen mit der *Vollstromversorgung*, der *Tranchenbeschaffung* und dem *Portfoliomanagement* alternative Möglichkeiten zur Verfügung, ihren Bedarf an elektrischer Arbeit durch Handel zu decken. Diese Alternativen sind dabei mit jeweils unterschiedlichen Einsparpotenzialen und Risiken verbunden (GÖTZE & ROTHER 2013). Im einfachsten Fall erfolgt die komplette Bedarfsdeckung als *Vollstromversorgung* über einen Großhändler, wie beispielsweise den regionalen Energieversorger (BERG & BORCHERT 2014). Dabei wird die für das ganze Jahr zu liefernde Energiemenge zu einem vertraglich vereinbarten Festpreis abgerechnet. Innerhalb eines Mengenkorridders von in der Regel $\pm 20\%$ dieser Energiemenge trägt der Händler das Risiko des Mengenausgleichs, welches über Risikoaufschläge im Festpreis enthalten ist. Der Kunde trägt somit kaum Risiko hinsichtlich der Liefermenge, kann jedoch dafür lediglich geringe preisliche Einsparpotenziale erschließen (GÖTZE & ROTHER 2013, BERG & BORCHERT 2014). Höhere preisliche Flexibilität lässt sich anhand der *Tranchenbeschaffung* oder *flexiblen Vollstromversorgung* erreichen. Die bezogene Energiemenge wird dazu in mehrere Teilmengen bzw. Tranchen aufgeteilt. Der Preis der Teillieferung wird jeweils zu frei wählbaren Zeitpunkten fixiert (GÖTZE & ROTHER 2013, BERG & BORCHERT 2014).

Das höchste Maß an Transparenz und Flexibilität lässt sich über die strukturierte Strombeschaffung mittels *Portfoliomanagement* erreichen. Das Portfoliomanagement ist dadurch gekennzeichnet, dass der Summenlastgang des Unternehmens, wie in Abbildung 10 beispielhaft gezeigt, in standardisierte Börsenprodukte zerlegt wird und diese wiederum einzeln gehandelt werden (BERG & BORCHERT 2014). Dabei kann das Unternehmen entweder direkt an der Europäischen Strombörse (EEX) handeln oder die Transaktionen über einen Großhändler abwickeln. Der Käufer ist dabei verpflichtet, die gehandelte Energiemenge abzunehmen und trägt somit das wirtschaftliche Risiko für Fehlmengen, die über Zusatzlieferungen bereitgestellt werden müssen (NABE 2006). Diese Fehlmengen können insbesondere durch Fehlprognosen des Energiebedarfs verursacht werden. Die genaue Kenntnis des Lastgangs, d. h. des Stromverbrauchs in allen 15-Min.-Intervallen eines Tages, gilt somit als zentrale Voraussetzung für das Portfoliomanagement (BERG & BORCHERT 2014).

2.3 Stromversorgung produzierender Unternehmen

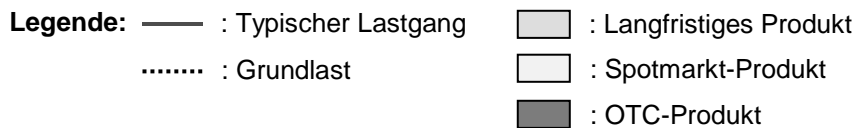
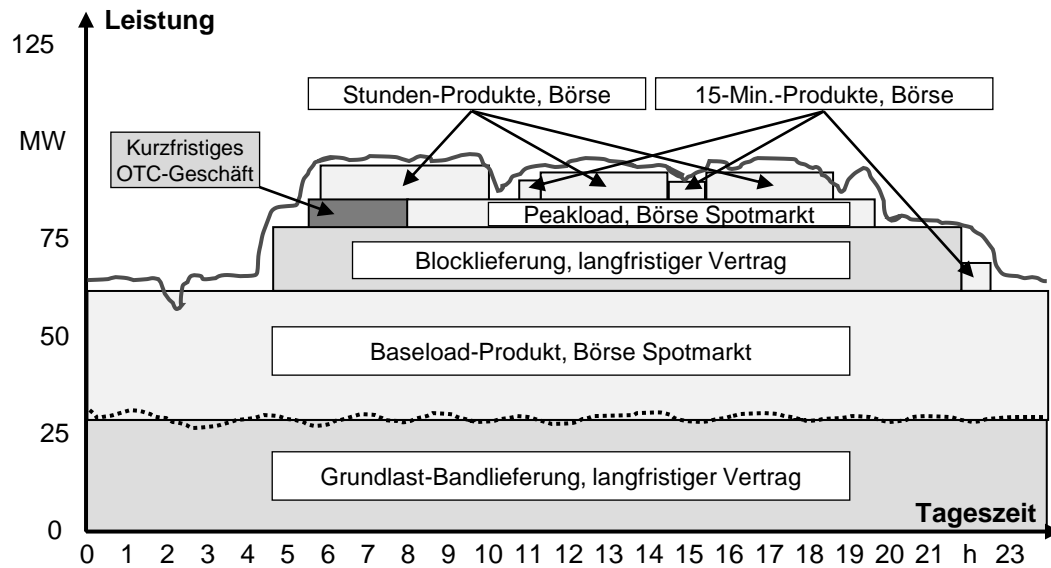


Abbildung 10: Beispiel einer flexiblen Strombedarfsdeckung (KONSTANTIN 2013)

Der langfristige Börsenhandel findet auf dem *Terminmarkt* der EEX statt und umfasst standardisierte Produkte¹⁵, die mit einem Vorlauf von bis zu sieben Jahren gehandelt werden. Die Terminmarktpreise weisen nur geringe tageszeitliche Schwankungen auf. Der kurzfristige *Spotmarkt* der Pariser EPEX Spot SE umfasst dagegen mehrere Produkte mit unterschiedlichen Fristigkeiten. Bei den sog. *Day-Ahead-Auktionen* um 12.00 Uhr und *Intraday-Auktionen* um 15.00 Uhr eines Tages werden Kontrakte über Energiemengenerlieferungen gehandelt, die jeweils Viertelstundenintervalle, Einzelstunden oder Stundenblöcke des Folgetages umfassen können. Mit dem *kontinuierlichen Intraday-Handel* besteht darüber hinaus die Möglichkeit, derartige Lieferkontrakte bis zu 30 Minuten vor der physikalischen Erfüllung zu handeln (EPEX 2016).

Anhand dieser unterschiedlichen Beschaffungsinstrumente können Unternehmen den Arbeitspreis für den bezogenen Strom beeinflussen. Zusätzlich entfällt in der Regel ein Leistungspreis, der sich nach dem höchsten Leistungsmittelwert eines

¹⁵ Ein weiterer Anteil des Handels wird außerhalb der Strombörsen bilateral zwischen Verkäufer und Käufer (OTC: Over-the-Counter) abgewickelt (KONSTANTIN 2013). Die Vertragsdetails dieser Geschäfte sind frei verhandelbar und nicht standardisiert, orientieren sich jedoch an der Strombörse. Für die weitere Arbeit wird der OTC-Handel vernachlässigt.

2 Grundlagen

einzelnen 15-Min.-Intervalls¹⁶ innerhalb eines festgelegten Zeitraums, beispielsweise eines Monats oder eines Jahres, richtet. Infolge dieser Preisbildung können aus einzelnen Lastspitzen sehr hohe Gesamtstromkosten resultieren. Bei großen Liefermengen wird bei der Strompreisbildung neben der absoluten Energiemenge auch der zeitliche Verlauf des Strombezugs miteinbezogen. Zu diesem Zweck wird dem Energieversorger ein Fahrplan übermittelt, der in der Regel mit einer Toleranz von $\pm 5\%$ bis $\pm 10\%$ einzuhalten ist. Werden diese Toleranzen im Zeitverlauf durch eine zu hohe oder zu geringe Stromabnahme verletzt, resultieren daraus Mehrkosten in Form von Strafzahlungen (Pönalen). Für Unternehmen mit einem Verbrauch von über 100 MWh pro Jahr ist die Messung des Lastgangs (registrierte Leistungsmessung) obligatorisch, wohingegen Unternehmen mit einem geringeren Verbrauch anhand von branchenabhängigen Standardlastprofilen abgerechnet werden können. Tabelle 1 gibt einen Überblick darüber, wie eine Anpassung der Leistungsaufnahme im Zeitverlauf die Stromkosten beeinflusst¹⁷. (HESSEL 2008, WEIß 2010, GÖTZE & ROTHER 2013, KONSTANTIN 2013, MÜLLER et al. 2013, BERG & BORCHERT 2014)

Tabelle 1: Beeinflussung der betrieblichen Stromkosten (MÜLLER et al. 2013)

Bestandteil der Stromkosten		Leistungsbezogener Einfluss	Zeitlich bezogener Einfluss
Arbeitspreis	in Ct/kWh	Momentanleistung	Betriebszeit
Leistungspreis	in €/kW	Maximalleistung	-
Blindarbeit	in Ct/kVA	Blindleistung	Betriebszeit
Netznutzung, Gebühren, Umlagen		-	-

2.3.2 Stromeigenerzeugung

Zahlreiche Unternehmen betreiben eigene Erzeugungsanlagen für elektrischen Strom. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes haben deutsche Unternehmen im Jahr 2015 insgesamt 50.215 GWh dezentral erzeugt (DESTATIS 2016). Dabei kommen als Technologien vorrangig Photovoltaikanlagen (PV) oder die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zum Einsatz (vgl. Abbildung 11). Bei KWK

¹⁶ Je nach Stromliefervertrag werden auch Mittelwerte aus mehreren 15-Min.-Intervallen innerhalb eines Jahres ermittelt (MÜLLER et al. 2013).

¹⁷ Weitere Preisbestandteile, wie z. B. Netznutzungsentgelte, Steuern oder Umlagen, werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Im Zuge der zunehmenden Einspeisung durch erneuerbare Energien wird Blindleistung inzwischen vielfach nicht mehr in Rechnung gestellt.

2.3 Stromversorgung produzierender Unternehmen

werden in der Regel Verbrennungsmotoren oder Gasturbinen in Kombination mit Generatoren betrieben (z. B. in Form von Blockheizkraftwerken). Durch die Verwertung der elektrischen Energie sowie der erzeugten Wärme werden dabei hohe Gesamtwirkungsgrade von bis zu 90 % erzielt (KONSTANTIN 2013, NEUGEBAUER 2014).

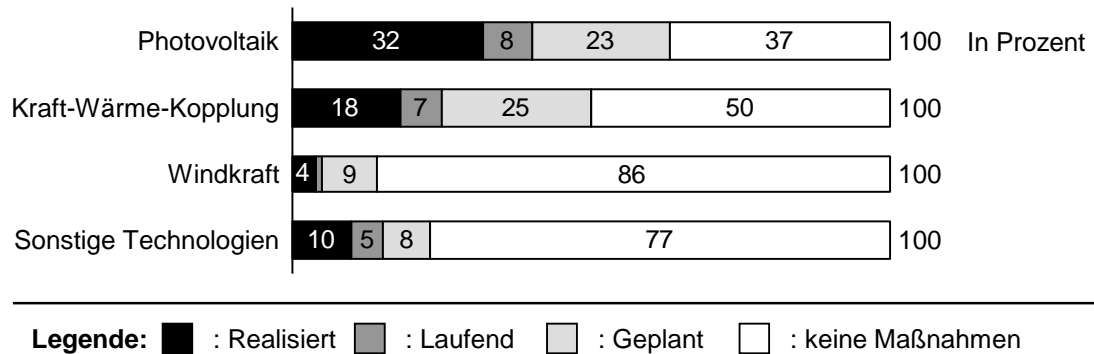


Abbildung 11: Prozentuale Verteilung der Stromeigenerzeugung in Unternehmen (DIHK 2014)

Unternehmen speisen den größten Anteil des eigenerzeugten Stroms direkt in das öffentliche Netz ein und erhalten hierfür eine Einspeisevergütung. Die Höhe der Einspeisevergütung wird zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Erzeugungsanlage festgelegt und für einen gewissen Zeitraum, beispielsweise 20 Jahre bei PV-Anlagen, fixiert. Da einerseits die Einspeisevergütungen von PV-Neuanlagen in den letzten Jahren von 0,50 €/kWh auf 0,08 €/kWh reduziert wurden und andererseits die Einspeisevergütung ab 2020 für die ersten PV-Anlagen vollständig entfällt, wird erwartet, dass der Anteil des Eigenverbrauchs zunehmen wird (DIHK 2014, WIRTH 2017). Seit 01.01.2017 wird der Strom aus Eigenerzeugungsanlagen mit einem Anteil von 40 % der Umlage nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz belastet (BMJV 2014, BMJV 2016). Dies gilt jedoch nicht für Bestandsanlagen, deren Strom vollständig vom Betreiber der Anlage verbraucht und folglich nicht durch ein öffentliches Netz geleitet wird. Ein hoher Eigenverbrauchsanteil und somit eine kosteneffiziente Verwertung des eigenerzeugten Stroms erfordert dabei eine hohe Gleichzeitigkeit zwischen der Erzeugung und dem Bedarf, d. h. dass zu jedem Zeitpunkt der Betrag der Erzeugungsleistung möglichst dem Betrag der Verbraucherlast entsprechen sollte. Da erneuerbare Energien eine im Tagesverlauf variable Erzeugungsleistung aufweisen, ist hierzu ein flexibler Einsatz der elektrischen Lasten oder eine Energiespeicherung erforderlich (NEUGEBAUER 2014, WEIBHAAR 2014, WIRTH 2017).

2.3.3 Demand Side Management (DSM) und Regelleistung

Da auch im Stromnetz als Gesamtheit die Erzeugung und der Bedarf jederzeit im Gleichgewicht stehen müssen, wird seitens des Energieversorgers das DSM¹⁸ eingesetzt, um das Verbrauchsverhalten der Endkunden über finanzielle Anreize zu lenken (KÖPP et al. 2013). Die Instrumente des DSM werden grundsätzlich entweder dazu verwendet, einen Lastverzicht beim Endverbraucher auszulösen oder eine zeitliche Verschiebung der Leistungsaufnahme vorzunehmen (PAULUS & BORGGREFE 2011). Zum DSM zählen auch zeitvariable Stromtarife, bei denen der Strompreis nach Spitzenlast- und Schwachlastzeiten unterschieden (TOU: Time-of-Use) oder auf Basis der aktuellen Verfügbarkeit berechnet wird (RTP: Real-Time-Pricing). Wie in Abbildung 12 dargestellt, stehen zu unterschiedlichen Zeiten im Hinblick auf den Betrieb des Energiesystems verschiedene DSM-Instrumente zur Verfügung.

Industrieunternehmen wird im Zuge des DSM die Möglichkeit geboten, Systemdienstleistungen für Netzdienstleister in Form von *Regelleistung* gegen entsprechende Vergütung bereitzustellen. Regelleistung beschreibt diejenige Leistung, die in Versorgungsnetzen eingesetzt werden muss, um kurzzeitige Ungleichgewichte zwischen Energieeinspeisung und -entnahme auszugleichen (MÜLLER et al. 2013). Diese wird hinsichtlich der geforderten Aktivierungszeit der Bereitstellung in die Primärregelung (30 Sekunden), die Sekundärregelung (fünf Minuten) und die Tertiärregelung bzw. Minutenreserve (15 Minuten) unterschieden (50HERTZ et al. 2016). Während die ersten beiden Varianten insbesondere regelfähige Kraftwerke betreffen und vollautomatisch vom jeweiligen Übertragungsnetzbetreiber abgerufen werden, ist die Minutenreserve auch für Industriebetriebe relevant. Den Anbietern werden sowohl die Vorhaltung der Reserveleistung als auch die tatsächlich abgerufene Leistung separat vergütet. Der Regelleistungsmarkt fordert als Mindestangebot eine Lastveränderung von mindestens 5 MW innerhalb von 15 Minuten, die über vier Stunden aufrecht gehalten wird. Systemdienstleister können jedoch mehrere Angebote kombinieren (Pooling), um die Mindestangebotsgröße zu erreichen, und somit weiteren Verbrauchern den Zugang zum Regelleistungsmarkt öffnen. Diese Art der Bündelung mehrerer Unternehmen wird auch als *überbetriebliches Lastmanagement* bezeichnet. (DENA 2012, 50HERTZ et al. 2016)

¹⁸ Oftmals wird synonym der Begriff Demand Response verwendet, auf den im Folgenden jedoch verzichtet wird.

2.3 Stromversorgung produzierender Unternehmen

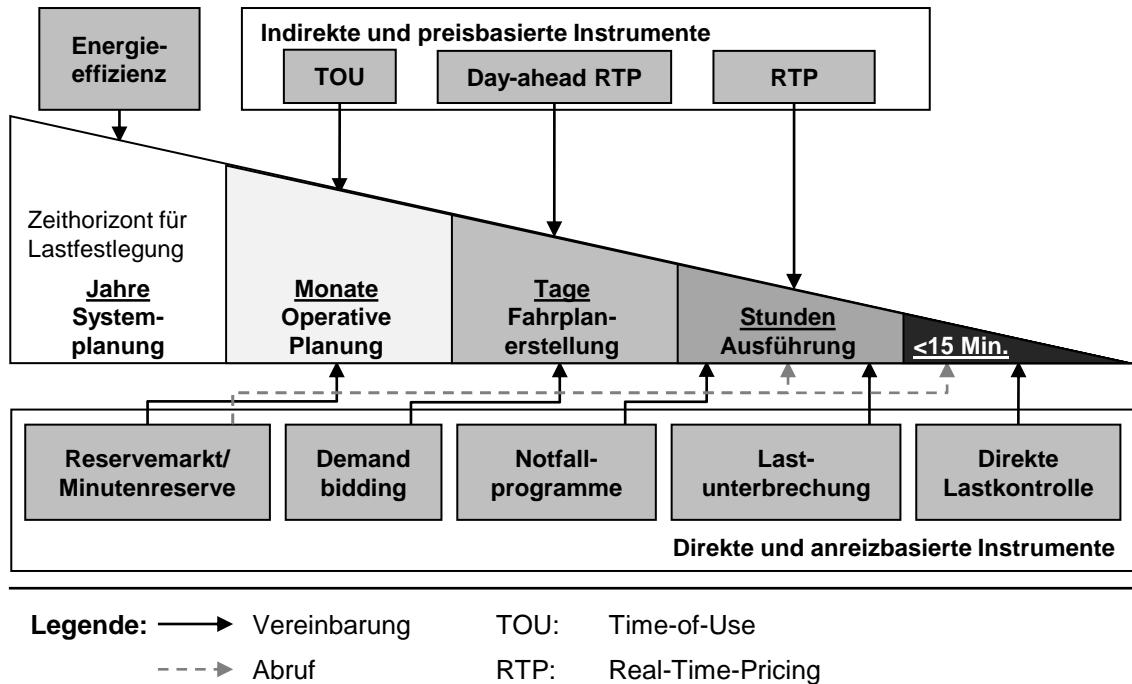


Abbildung 12: Übersicht über Instrumente des Demand Side Management in Anlehnung an DEPARTMENT OF ENERGY (2006)

2.3.4 Innerbetriebliches Lastmanagement

Das DSM steht darüber hinaus in enger Verbindung mit dem innerbetrieblichen Lastmanagement, das all diejenigen Maßnahmen zusammenfasst, die innerhalb eines Unternehmens ergriffen werden können, um dessen elektrische Lasten zu steuern (BENETTI et al. 2015). Die Motivation eines Unternehmens zur Umsetzung von Lastmanagement kann dabei unterschiedlich sein. So können die Maßnahmen beispielsweise ergriffen werden, um kostenintensive Lastspitzen zu vermeiden (Spitzenlastmanagement), Regelleistung bereitzustellen oder Strompreisschwankungen auszunutzen (DEPARTMENT OF ENERGY 2006, DENA 2012). Je nach Zielsetzung des Lastmanagements und des Betrachtungsgegenstands werden daher variierende Begriffsdefinitionen verwendet. In Tabelle 2 sind einige prägnante Definitionen aufgeführt.

2 Grundlagen

Tabelle 2: Definitionen des Lastmanagements

Quelle	Definition
DITTMER 1989	Lastmanagement bedeutet die zielgerichtete Steuerung der Nachfrage elektrischer Energie bzw. Beeinflussung der Lastganglinie.
DEPARTMENT OF ENERGY 2006	Lastmanagement beschreibt eine freiwillige Änderung der Stromnachfrage einzelner Endkunden von ihrem gewöhnlichen Verbrauchsmuster in Folge von veränderten Strompreisen im Tagesverlauf oder in Folge von Bonuszahlungen, die darauf ausgerichtet sind, den Ausgleich zwischen Nachfrage und Erzeugung sicherzustellen.
KLOBASA 2009	Unter Lastmanagement sind alle Aktivitäten zu verstehen, die einer Anpassung der Stromnachfrage an die Erzeugungs- und Nutzbedingungen entsprechen.
DENA 2012	Die gezielte Steuerung von Lasten wird als Lastmanagement bezeichnet.
KRAUTER 2014	Lastmanagement beschreibt die gezielte Anpassung der Lastkurve an die vorhandene bzw. gewünschte Erzeugungsstruktur mit deren charakteristischen Erzeugungsprofilen.
GÜNTHER 2015	Lastmanagement berücksichtigt die Nachfrage- und Angebotsseite und versucht, die Differenz von Primärstromangebot und Nachfrage gering zu halten, indem die Nachfrage beeinflusst wird.

Die Definitionen nehmen teilweise eine übergeordnete Perspektive mit Blick auf das ganze Stromnetz oder einen Bilanzkreis ein und stellen deren Anpassung an das Verhalten der Energieerzeuger in den Mittelpunkt (KLOBASA 2009, KRAUTER 2014, GÜNTHER 2015). Als Betrachtungsgegenstand wird in der vorliegenden Arbeit jedoch ein engerer Fokus auf ein einzelnes Unternehmen als Endkunde gewählt. Eine Einschränkung der Definition auf Bonuszahlungen und Strompreisschwankungen, wie sie in DEPARTMENT OF ENERGY (2006) vorgenommen wird, erscheint dabei nicht zweckmäßig, da hierdurch das Spitzenlastmanagement oder die Vermeidung von Lastgangabweichungen als Zielsetzung ausgeschlossen werden.

Auf Basis von DITTMER (1989) und DENA (2012) wird das Lastmanagement für die vorliegende Arbeit daher definiert als *die zielgerichtete Steuerung einzelner Lasten zur Beeinflussung des Lastgangs*. Diese Definition beinhaltet als entscheidende Einschränkung die Limitierung des Lastmanagements auf das Schalten einzelner Lasten. Komplexere ablauforganisatorische Maßnahmen, wie die Festlegung von Bearbeitungsreihenfolgen oder die Verschiebung von Aufträgen, die ebenfalls eine Beeinflussung der Lastganglinie bewirken können,

2.3 Stromversorgung produzierender Unternehmen

werden in dieser Arbeit explizit nicht dem Lastmanagement zugeordnet. Diese definitorische Trennung wird in Kapitel 7 aufgegriffen zu dem Zweck, das Lastmanagement, dessen Ziel primär die Einstellung des Lastgangs ist, von anderen Steuerungsverfahren zu unterscheiden, die vorrangig der Erreichung logistischer Ziele unter zusätzlicher Berücksichtigung des Energiebedarfs dienen.

Im Allgemeinen lassen sich die drei in Abbildung 13 dargestellten Lastmanagementstrategien unterscheiden (SONNENSCHNEIN et al. 2012, DIETRICH et al. 2013, KOSTKOVÁ et al. 2013):

- Bei der Spitzenlastreduktion (engl.: Peak Clipping oder Peak Shaving) wird die Höhe von Lastspitzen begrenzt, indem kurzfristig einzelne Verbraucher heruntergefahren werden.
- Demgegenüber steht die Bedarfserhöhung in Schwachlastzeit (engl.: Valley Lifting), bei der zusätzliche Lasten mit dem Ziel hochgefahren werden, einen höheren Nutzungsgrad für das vorhandene Energieangebot zu erreichen.
- Bei der Lastverschiebung (engl.: Load Shifting) werden diese beiden Strategien kombiniert und Lasten von Spitzen- in Schwachlastzeiten verlagert. Der Gesamtenergiebedarf bleibt hierbei näherungsweise unverändert.

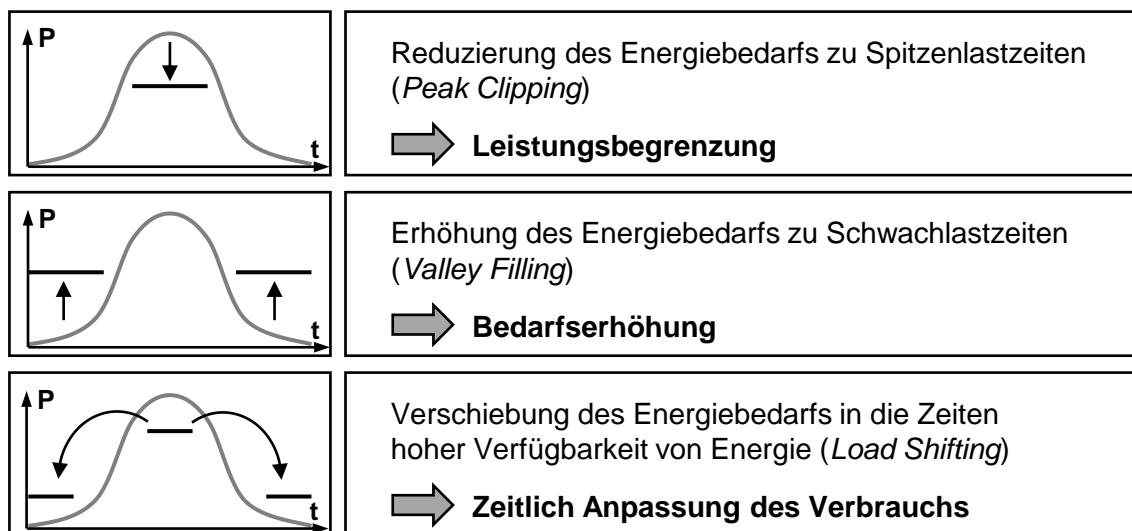


Abbildung 13: Grundsätzliche Lastmanagementstrategien
in Anlehnung an SONNENSCHNEIN et al. (2012)

2.4 Planung und Steuerung der Produktion

2.4.1 Allgemeines

Die Produktion kann als Transformationsprozess aufgefasst werden, bei dem aus unterschiedlichen Produktionsfaktoren Produkte und Güter erzeugt werden, die sich wiederum am Markt absetzen lassen (GUTENBERG 1983, DANGELMEIER 2009). Dabei verfolgen Produktionsunternehmen das Ziel, die Aufträge für bestimmte Produkte, die diese vom Absatzmarkt erhalten, in der jeweils vereinbarten Qualität, Menge und Zeit auszuliefern (WIENDAHL 2010). Die PPS, die auch als operative Produktionsplanung bezeichnet wird, dient der Beherrschung der sich hieraus ergebenden logistischen Abläufe, indem die zur Verfügung stehenden Produktionsfaktoren bestmöglich zur Erfüllung der Absatzmöglichkeiten eingesetzt werden (ZÄPFEL 1996, WIENDAHL 2010). Als zentrale Ordnungsinstanz gleicht die PPS die logistische Leistung mit bestehenden Marktanforderungen ab und bildet folglich den Kern eines Industrieunternehmens (WIENDAHL et al. 2005, SCHUH & STICH 2012).

Eine grundlegende Abgrenzung der Begriffe Produktionsplanung und Produktionssteuerung lässt sich anhand der Definitionen des VDI vornehmen (VDI 1992), die für die vorliegende Arbeit übernommen werden. Darin wird die Produktionsplanung als „(...) *systematisches Suchen und Festlegen von Zielen für die Fertigung [und das] Vorbereiten von Fertigungsaufgaben, deren Durchführung zum Erreichen der Ziele erforderlich ist.*“ (VDI 1992) beschrieben und demgegenüber die Produktionssteuerung als das „*Veranlassen, Überwachen und Sichern der Durchführung von Fertigungsaufgaben hinsichtlich Bedarf (Menge, Termin), Qualität, Kosten und Arbeitsbedingungen*“ (VDI 1992) festgelegt.

2.4.2 Logistisches Zielsystem

Die übergeordnete Aufgabe der PPS ist es, die logistische und wirtschaftliche Zielerreichung in der Produktion unter Berücksichtigung bestehender Wechselwirkungen zu sichern. Zur Beschreibung dient das in Abbildung 14 dargestellte Zielsystem der PPS aus Logistikleistung und Logistikkosten (WIENDAHL 2010, NYHUIS & WIENDAHL 2012). Die Logistikleistung umfasst die vom Markt wahrgenommenen Zielgrößen Lieferzeit und Liefertreue, die von der Produktion jeweils kurze Durchlaufzeiten und eine hohe Termintreue erfordern. Die Logistikkosten setzen sich zusammen aus den Kapitalbindungskosten, die

maßgeblich von den Beständen an Rohmaterial, Halbzeugen und Fertigprodukten abhängen, und aus den Prozesskosten, die vorrangig durch eine hohe Auslastung der Betriebsmittel reduziert werden können (WIENDAHL 2010, SCHUH & STICH 2012). Im Allgemeinen verfolgt die PPS somit das Ziel einer hohen Lieferfähigkeit sowie einer hohen Liefertreue bei geringstmöglichen Kosten für Logistik und Produktion (NYHUIS & WIENDAHL 2012).

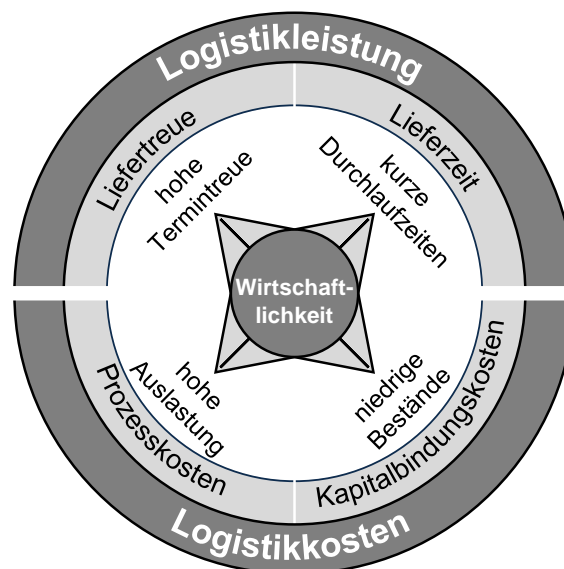


Abbildung 14: Zielsystem der Produktionslogistik (WIENDAHL 2010)

Dieses Zielsystem unterliegt jedoch einem inhärenten Zielkonflikt, ausgelöst durch die gegenläufigen Interessen der Kunden auf der einen Seite und des Unternehmens auf der anderen Seite. Während Kunden primär eine kurze Lieferzeit und hohe Liefertreue fordern, strebt ein Unternehmen meist eine hohe Auslastung sowie niedrige Bestände an. Die Gewährleistung einer hohen, gleichmäßigen Auslastung wird in erster Linie durch ausreichend hohes Bestandsniveau gesichert. Eine Zunahme der Umlaufbestände hat jedoch steigende Durchlaufzeiten der einzelnen Aufträge zur Folge und gefährdet somit auch die Termintreue (WESTKÄMPER 2006, WIENDAHL 2010).

Aus der Verbesserung einer Zielgröße resultiert somit die Verschlechterung einer anderen. Dieser Zusammenhang wird in der Literatur als Dilemma der Ablaufplanung bezeichnet (GUTENBERG 1983). Eine allgemeingültige Optimierung dieser Ziele, die nicht von den unternehmensspezifischen Anforderungen und Randbedingungen abhängig wäre, ist folglich nicht möglich. So zeigt sich in Abbildung 15 anhand von Betriebskennlinien, bei denen die logistische Zielerreichung dem Arbeitsbestand der Produktion gegenübergestellt wird, dass eine

2 Grundlagen

Minimierung bzw. Maximierung der verschiedenen Zielgrößen in jeweils unterschiedlichen Betriebspunkten erreicht wird (NYHUIS & WIENDAHL 2012, SCHUH & SCHMIDT 2014). Die PPS dient folglich dazu, ein Unternehmen innerhalb dieses komplexen Zielsystems zu positionieren (WIENDAHL 2011).

Die Termintreue ist dabei für viele Unternehmen die bestimmende Zielgröße der Produktion und nimmt folglich in der PPS gegenüber den anderen Größen einen deutlich höheren Stellenwert ein (SCHUH & STICH 2013). Dies bestätigt sich beispielsweise in einer Studie, die im Jahr 2016 von produktionstechnischen Instituten in deutschen Unternehmen durchgeführt wurde. Als Herausforderungen der PPS werden dabei in der Studie insbesondere die Komplexität der Abläufe und die mangelnde Umsetzung von Plan-Vorgaben genannt (MAYER et al. 2016).

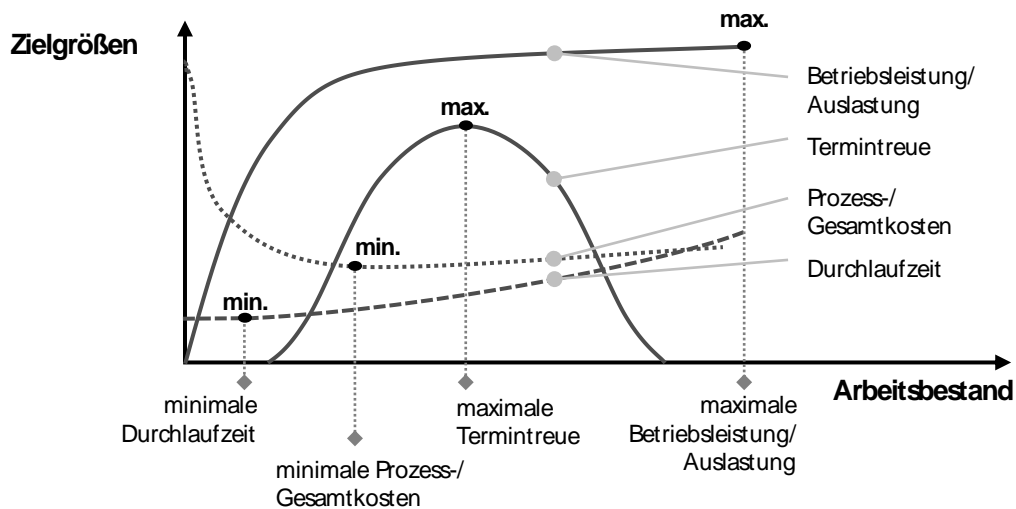


Abbildung 15: Zielpositionierung innerhalb der logistischen Kennlinie
(SCHUH & SCHMIDT 2014)

2.4.3 Aufgaben der Produktionsplanung

Entsprechend der in Abschnitt 2.4.1 vorgestellten Definition legt die Produktionsplanung die Zielwerte für den Auftragsdurchlauf in der Produktion fest. Dazu wird zyklisch das Produktionsprogramm für mehrere Planungsperioden nach Art und Menge der herzustellenden Produkte aufgestellt (WIENDAHL 2010). Die einzelnen Aufgaben, die zu diesem Zweck im Rahmen der Produktionsplanung durchgeführt werden, sind beispielsweise in der Aufgabensicht des Aachener PPS-Modells dargestellt (vgl. Abbildung 16), welches im Folgenden beschrieben wird.

2.4 Planung und Steuerung der Produktion

Strukturell teilt dieses Aufgabenmodells die PPS in die innerbetrieblichen Kern- und Querschnittsaufgaben sowie die überbetrieblichen Netzwerkaufgaben ein (SCHUH & STICH 2012). Den Ausgangspunkt der Kernaufgaben bildet die *Produktionsprogrammplanung*, die in einem periodisch rollierenden Prozess den Primärbedarf, d. h. Art, Menge und Termin der zu produzierenden Erzeugnisse bestimmt. Als Ergebnis wird dabei ein zu realisierender Produktionsplan ermittelt, der als Basis für die sich anschließende *Produktionsbedarfsplanung* dient, um daraus den erforderlichen Material- und Ressourcenbedarf abzuleiten. Dazu wird aus dem absatzfähigen Primärbedarf zuerst der Bedarf an erforderlichen Komponenten und Teilen (Sekundärbedarf) ermittelt, bevor dieser mit den Lagerbeständen abgeglichen und nach den Beschaffungsarten Fremdbezug und Eigenfertigung aufgeteilt wird. Aufträge, die der Eigenfertigung zugeordnet sind, werden terminiert und daraus die Kapazitätsbelastung der Produktion geplant (LÖDDING 2008, SCHUH & STICH 2012). Gegenstand der *Eigenfertigungsplanung und -steuerung* sind insbesondere die Losgrößenrechnung, die Feinplanung bzw. Belegungsplanung der Produktion und die Verfügbarkeitsprüfung mit anschließender Auftragsfreigabe (SCHUH & STICH 2012). Diese Aufgaben werden im Kontext dieser Arbeit teilweise der Produktionssteuerung zugeordnet und im Abschnitt 2.4.4 aufgegriffen.

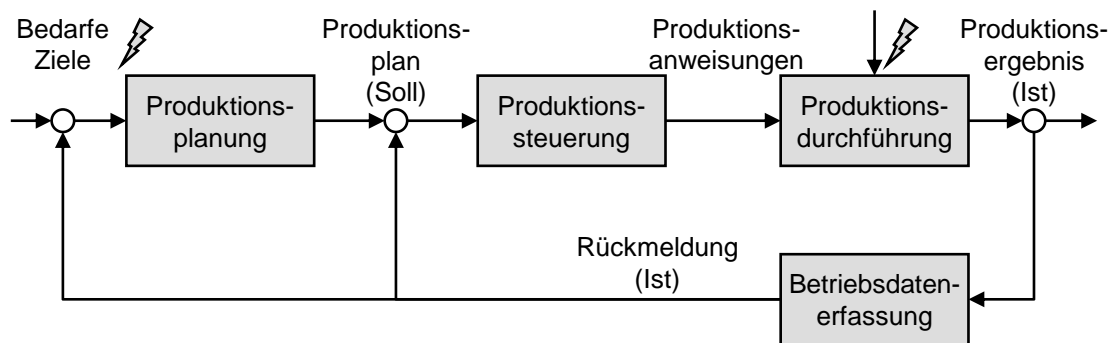
Netzwerkaufgaben	Kernaufgaben		Querschnittsaufgaben		
Netzwerk-konfiguration	Produktionsprogrammplanung		Auftragsmanagement	Bestandsmanagement	Controlling
Netzwerk-absatzplanung	Produktionsbedarfsplanung				
Netzwerk-bedarfsplanung	Fremdbezugsplanung und -steuerung	Eigenfertigungsplanung und -steuerung			
Datenverwaltung					

Abbildung 16: Aufgabensicht des Aachener PPS-Modells (SCHUH & STICH 2012)

Die *Datenverwaltung* dient der Speicherung und Pflege der für die PPS erforderlichen Stamm- und Bewegungsdaten. Diese Inhalte sind dem Informationsmanagement zuzuordnen und werden daher in Abschnitt 2.5 detailliert betrachtet. Aufgrund der inhaltlichen Fokussierung der vorliegenden Arbeit auf ein energieorientiertes Produktionssteuerungsverfahren für ein einzelnes Unternehmen sind die im Modell enthaltenen *Netzwerk- und Querschnittsaufgaben* von zweitrangiger Bedeutung und werden folglich an dieser Stelle nicht vorgestellt. (HACKSTEIN 1989, LÖDDING 2008, WIENDAHL 2010, SCHUH & STICH 2012).

2.4.4 Aufgaben der Produktionssteuerung

Die Produktionssteuerung schließt den Informationskreis zwischen der Planung und dem ausführenden Produktionssystem, um trotz unvermeidlicher Störungen (z. B. Personalausfall oder Ausschuss) eine möglichst gute Erfüllung des übergeordneten Plans zu gewährleisten (vgl. Abbildung 17). Der Steuerung kommt somit eine hohe Bedeutung für die Erreichung der logistischen Ziele eines Unternehmens zu. (ZÄPFEL 1996, LÖDDING 2008, DANGELMEIER 2009)



Legende: ⚡ : Störeinflüsse

Abbildung 17: Regelkreis der PPS in Anlehnung an HACKSTEIN (1989) und WIENDAHL (2010)

LÖDDING (2008) fasst die zentralen Aufgaben und Wirkzusammenhänge der Produktionssteuerung in dem in Abbildung 18 gezeigten Modell zusammen. Dieses Modell beinhaltet die bereits in Abschnitt 2.4.2 beschriebenen logistischen Zielgrößen, deren Ausprägungen durch die Regelgrößen beeinflusst werden. Die Regelgrößen ergeben sich dabei jeweils aus der Differenz zweier Stellgrößen, welche wiederum direkt durch die vier beschriebenen Aufgaben der Produktionssteuerung *Auftragserzeugung*, *Auftragsfreigabe*, *Reihenfolgebildung* und *Kapazitätssteuerung* festgelegt werden.

Während der *Auftragserzeugung* werden die Vorgabewerte für den Zugang, den Abgang und auch die Reihenfolge der Fertigungsaufträge festgelegt. Im Allgemeinen wird die Auftragserzeugung somit der Produktionsplanung zugeordnet. Ausnahmen bilden hier insbesondere Fälle, in denen die Auftragserzeugung über sehr einfache Regeln umgesetzt wird, z. B. das Kanban-Prinzip. (LÖDDING 2008)

Die *Auftragsfreigabe* bestimmt den Ist-Zugang zur Produktion, indem sie den genauen Zeitpunkt vorgibt, ab dem mit der Bearbeitung eines Auftrags begonnen werden kann. Mit der Freigabe gehen die Aufträge somit von der Planungsphase

in die Ausführungsphase über. Auf diese Weise nimmt die Auftragsfreigabe maßgeblichen Einfluss auf die Umlaufbestände in der Produktion. Vielfach ist dieser Schritt mit einer Verfügbarkeitsprüfung, beispielsweise des erforderlichen Materials, verbunden. Insbesondere im Zusammenhang der Bestandsregelung wird dabei der Begriff der hybriden Auftragsfreigabe verwendet, wenn mehrere Freigabestufen miteinander kombiniert werden. So ist es beispielsweise möglich, den Ist-Zugang zunächst zentral für einen gesamten Produktionsbereich und anschließend zusätzlich dezentral für einzelne Arbeitsplätze zu regeln. (KURBEL 2005, LÖDDING 2008, WIENDAHL 2010)

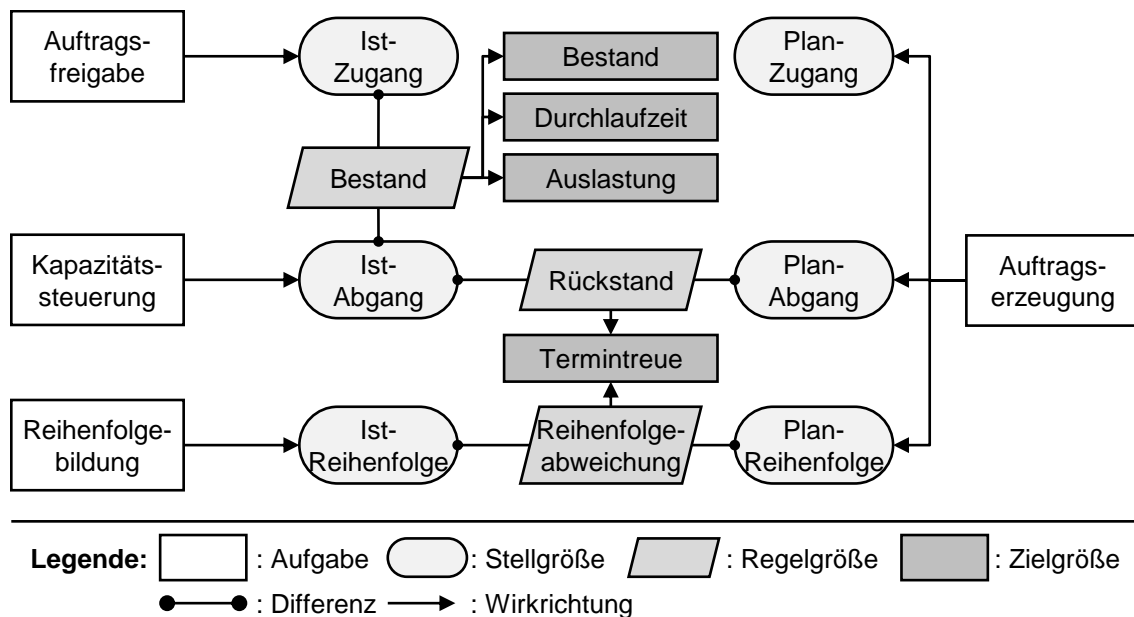


Abbildung 18: Modell der Fertigungssteuerung (LÖDDING 2008)

Die *Reihenfolgebildung* dient der Festlegung der Sequenz, in der wartende Aufträge an einem Fertigungsmittel abgearbeitet werden. Anhand festgelegter Kriterien, wie beispielsweise der verbleibenden Schlupfzeit oder der Bearbeitungszeit, werden den Aufträgen Prioritäten zugewiesen und somit die Ist-Reihenfolge der Produktion bestimmt. Die Reihenfolgebildung wirkt über die Reihenfolgeabweichung auf die Termintreue einzelner Aufträge. In der Praxis erfolgt die Sortierung oftmals anhand von Prioritätsregeln, deren Wirksamkeit umso höher ist, je höher die Bestände in den Warteschlangen sind. (LÖDDING 2008, WIENDAHL 2010, NYHUIS & WIENDAHL 2012)

Die *Kapazitätssteuerung* legt im kurzfristigen Bereich die Höhe der eingesetzten Kapazitäten der Fertigungsmittel fest. Insbesondere wird im Zuge der Kapazitätssteuerung über Anpassungsmaßnahmen im Rahmen der verfügbaren Kapazitätsflexibilität (z. B. Überstunden oder Fremdvergabe) entschieden, um

Störungen oder drohende Rückstände der Produktion zu kompensieren. Durch derartige Anpassungen kann somit der Ist-Abgang der Produktion beeinflusst werden, der seinerseits eine Auswirkung auf die Höhe der Umlaufbestände und auf den Rückstand hat. (GOTTSCHALK 2005, LÖDDING 2008, NYHUIS et al. 2010, ENGELHARDT 2015)

2.5 Informationssysteme in der Produktion

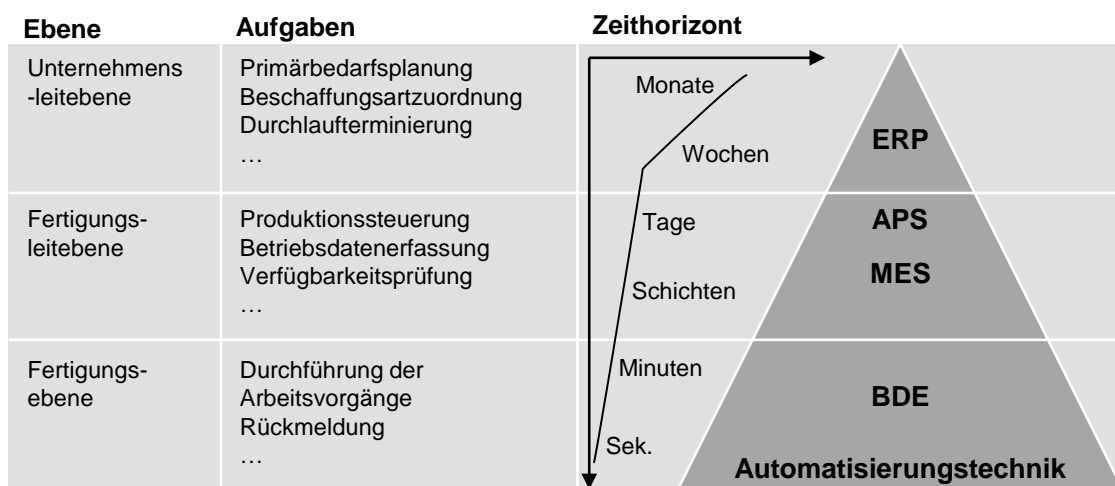
2.5.1 Allgemeines

Die Bewältigung der operativen Aufgaben der PPS (vgl. Abschnitt 2.4) erfordert den Umgang mit einer Vielzahl von Informationen und der damit verbundenen Datenbasis (WIENDAHL et al. 2005, OSTGATHE 2012, SCHUH et al. 2014). Im Rahmen aktueller Forschungs- und Entwicklungsbestrebungen unter dem Begriff „Industrie 4.0“ wird dieser Aspekt der PPS verstärkt in den Fokus gerückt (SPATH et al. 2013, SCHUH et al. 2014, ANDERL et al. 2015). Der Begriff *Daten* bezeichnet dabei Zeichen, die über eine Syntax in einen strukturierten und definierten Zusammenhang gebracht und somit einer weiteren Verarbeitung zugänglich gemacht werden (KRCMAR 2011). Wird diesen Daten ein Kontext zugewiesen, erhalten sie Bedeutung und werden somit als *Information* bezeichnet (DIN 44300, LEHNER et al. 2008, KRCMAR 2011).

Informationen sind ein zentrales Element zur Überführung von Produktionsfaktoren in Produkte und können daher als immaterielle, jedoch nicht kostenfreie Produktionsressourcen betrachtet werden (PILLER 2006, KRCMAR 2011). Die PPS ist folglich eng mit dem Informationsmanagement verbunden, d. h. der zeitgerechten Bereitstellung der richtigen Information am richtigen Ort (JÜNEMANN & BEYER 1998, HILDEBRAND et al. 2011). In der Praxis wird das Informationsmanagement in der Regel von software-basierten Informationssystemen unterstützt, deren Aufgabe es ist, dem menschlichen Entscheidungsträger alle erforderlichen Informationen bereitzustellen und aufzubereiten (JÜNEMANN & BEYER 1998, HILDEBRAND et al. 2011). Den Daten kommt in den produktionswirtschaftlichen Informationssystemen eine bedeutende Rolle zu, da der erfolgreiche Einsatz von Aktivitäten der PPS eine vollständige, konsistente und aktuelle Datengrundlage erfordert (KURBEL 2005, WIENDAHL et al. 2005). Folglich ist die Datenverwaltung als eine der Kernaufgaben der PPS definiert (KURBEL 2005, SCHUH & STICH 2012, GEIGER 2015).

2.5.2 Softwareunterstützung der Planung und Steuerung

Aus Sicht der Informationssysteme können die Aufgaben der PPS nach VDI (5600) in die drei Hierarchieebenen *Unternehmensleitebene*, *Fertigungsleitebene* und *Fertigungsebene* mit jeweils unterschiedlichem Zeithorizont und Informationsbedarf aufgeteilt werden. Wie in Abbildung 19 dargestellt ist, kann jede dieser Ebenen dabei von unterschiedlichen Informationssystemen unterstützt werden. Auf der Unternehmensleitebene kommen vorrangig Systeme des Enterprise Resource Planning (ERP) zum Einsatz, die im Wesentlichen die in Abschnitt 2.4.3 vorgestellten Aufgaben der Produktionsplanung abdecken (KURBEL 2005, VDI 5600, MARCZINSKI 2008, DIN 62264). Zur Unterstützung der kurzfristigen Feinplanung werden ERP-Systeme teilweise mit Advanced Planning and Scheduling-Lösungen (APS) gekoppelt (HOPP & SPEARMAN 2008, MARCZINSKI 2008).



Legende: ERP : Enterprise Resource Planning MES : Manufacturing Execution System
 APS : Advanced Planning and Scheduling BDE : Betriebsdatenerfassung

Abbildung 19: Softwareunterstützung der PPS-Systeme

in Anlehnung an KLETTI (2006), VDI (5600) und GEIGER (2015)

Ergänzend werden in der Fertigungsleitebene Manufacturing Execution Systeme (MES) verwendet, zu deren Aufgabenbereich unter anderem die zeitnahe Steuerung der Produktion, das Betriebsmittelmanagement und die zentrale Erfassung der Daten aus der Fertigungsebene gehören (KLETTI 2006, VDI 5600, MARCZINSKI 2008, LOUIS 2009, SCHUH & SCHMIDT 2014). Systeme der Betriebsdatenerfassung (BDE) bilden das informationstechnische Bindeglied zwischen der Feld- und der Leitebene und finden in der Praxis inzwischen weit-

reichende Anwendung (MAYER et al. 2016). So sind BDE-Systeme bereits vielfach direkt in MES integriert (BERLAK 2003, MARCZINSKI 2008). Auf unterster Ebene erfolgt hingegen die Umsetzung der Produktion anhand der Vorgaben der Leitebenen auf Maschinen, Anlagen und Arbeitsplätzen. Zu dieser Ebene zählt insbesondere die verwendete Automatisierungstechnik, wie beispielsweise speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) oder Sensoren (VDI 5600).

Der Umfang, in welchem eine Softwareunterstützung unternommen wird sowie die Trennschärfe zwischen den einzelnen Ebenen sind dabei vom jeweiligen Unternehmen abhängig (BERLAK 2003, LOUIS 2009).

2.6 Fazit

In diesem Kapitel sind die für diese Arbeit relevanten Grundlagen der Energiewirtschaft und der Betriebsorganisation betrachtet worden. Dabei wurden zunächst in Abschnitt 2.2 die Begriffe zur Beschreibung des Energiebedarfs und des Lastgangs eines Unternehmens eingeführt. Anschließend wurde diskutiert, wie sich der betriebliche Strombedarf zusammensetzt und wie die Verbraucher innerhalb eines Unternehmens klassifiziert werden können. Des Weiteren wurden in Abschnitt 2.3 die unterschiedlichen Formen des Stromhandels und der Stromeigenversorgung dargelegt, anhand derer Unternehmen ihren Bedarf decken können. Dabei wurden insbesondere auch die Maßnahmen des DSM (vgl. Abschnitt 2.3.3) und die Grundlagen des innerbetrieblichen Lastmanagements betrachtet (vgl. Abschnitt 2.3.4).

Ergänzend zu diesen energiewirtschaftlichen Grundlagen sind zudem die Definitionen und das Zielsystem der PPS dargestellt worden (vgl. Abschnitt 2.4). Zur Erreichung der logistischen Ziele eines Unternehmens wird im Rahmen der PPS eine Folge von Aufgaben durchgeführt, die anhand des Aachener PPS-Modells und des Modells der Produktionssteuerung diskutiert wurden. In der Praxis wird die Durchführung dieser Aufgaben vielfach von Softwaresystemen unterstützt. Aus diesem Grund wurde Abschnitt 2.5 ein Überblick über die Informationssysteme der PPS gegeben. Aufbauend auf diesen Grundlagen werden in Kapitel 3 bestehende Ansätze aus der Forschung und Technik in den Kontext der Arbeit eingeordnet. Weiterhin werden die Grundbegriffe bei der folgenden wissenschaftlichen Bearbeitung aufgegriffen.

3 Stand der Forschung und Technik

3.1 Übersicht

Im folgenden Kapitel wird der für den Kontext der vorliegenden Arbeit relevante Stand der Forschung und Technik dargelegt und anhand der in Abschnitt 1.3 formulierten Zielsetzung diskutiert. Zu diesem Zweck werden in Abschnitt 3.2 zunächst bestehende Verfahren der PPS unter Berücksichtigung des Angebots elektrischer Energie analysiert. Der Schwerpunkt liegt dabei insbesondere auf der Betrachtung der Stromkosten in der PPS. Ergänzend werden in Abschnitt 3.3 Ansätze zur expliziten Steuerung des Lastgangs im Rahmen des betrieblichen Lastmanagements untersucht. Da der Abbildung des betrieblichen Strombedarfs innerhalb der PPS in dieser Arbeit eine hohe Bedeutung zukommt, werden in Abschnitt 3.4 zudem Ansätze zur Modellierung produktionsbedingter Strombedarfe behandelt. Die untersuchten Themenbereiche werden jeweils im Hinblick auf die Gesamtzielsetzung bewertet und darauf aufbauend in Abschnitt 3.5 der Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit abgeleitet. Dieser Bedarf für weitere Untersuchungen wird abschließend in Anforderungen an eine energieorientierte Produktionssteuerung konkretisiert und als Maßgabe für die folgenden Kapitel genutzt.

3.2 Energieorientierte Ansätze der Produktionsplanung und -steuerung

Wie in Abschnitt 2.4 dargelegt wurde, lassen sich die Prozesse der PPS in eine Anzahl von Kernaufgaben und diese wiederum weiter in einzelne Funktionen zerlegen (SCHUH & STICH 2012). Diese Struktur wird im Folgenden aufgegriffen, um bestehende Forschungsansätze zur Berücksichtigung der elektrischen Energie in der PPS einzuordnen. Die Betrachtung beschränkt sich dabei auf die diskrete Fertigung. Tabelle 3 fasst die betrachteten Ansätze gemäß dieser Einordnung zusammen. Diese Ansätze werden in den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben und bewertet.

3 Stand der Forschung und Technik

Tabelle 3: Übersicht und Einordnung energieorientierter Ansätze der PPS

Kernaufgabe	Funktion	Quellen
Produktionsprogramm- und Produktionsbedarfsplanung		BONNESCHKY 2002; GOLDHAHN et al. 2012; HERMANN et al. 2013; GRAßL 2015; PUTZ et al. 2015
Eigenfertigungsplanung	Belegungsplanung	JUNGE 2007; RAGER 2008; FANG et al. 2011; WEINERT et al. 2011; GOLDHAHN et al. 2012; BRUZZONE et al. 2012; PECHMANN et al. 2012; ARTIGUES et al. 2013; BÖNING et al. 2013; EMEC et al. 2013; KÜSTER et al. 2013; LE & PANG 2013; LIU et al. 2014; LUO et al. 2013; WANG et al. 2013; EBERSPÄRCHER 2014, 2015; GROBE BÖCKMANN 2014; SHROUF et al. 2014; EBERSPÄRCHER 2015; GONG et al. 2015; KELLER et al. 2015; SCHLECHTENDAHL et al. 2016
	Losgrößenrechnung	KELLER et al. 2016b
Produktionssteuerung	Auftragsfreigabe	PUTZ et al. 2012; LANGER et al. 2014; WILLEKE et al. 2014, 2015a
	Reihenfolgebildung	SCHUH et al. 2015; WILLEKE et al. 2015b, 2016
	Kapazitätssteuerung	NEUGEBAUER et al. 2012; FERNANDEZ et al. 2013; HAAG 2013; SUN et al. 2013, 2014; ZHOU et al. 2013; FRIGERIO & MATTÀ 2015; WILLEKE et al. 2015c; BEIER et al. 2016a, 2016b; BEIER 2017

3.2.1 Ansätze in der Produktionsprogramm- und Produktionsbedarfsplanung

Zu Beginn der Produktionsplanung wird in der Produktionsprogrammplanung auf Basis des Verkaufsprogramms, das sich aus bereits vorliegenden Kundenaufträgen sowie aus Absatzprognosen zusammensetzt, der Bedarf an verkaufsfertigen Erzeugnissen errechnet und in Abstimmung mit den verfügbaren Ressourcen für einen langfristigen Planungshorizont festgelegt (WIENDAHL 2010, SCHUH & STICH 2012). Während der Produktionsbedarfsplanung wird auf der Grundlage des zuvor aufgestellten Produktionsprogramms der mittelfristige Ressourcenbedarf ermittelt. Dabei werden die Schritte der Sekundärbedarfsermittlung, der Durchlaufterminierung und der Kapazitätsplanung durchlaufen (WIENDAHL 2010, SCHUH & STICH 2012).

BONNESCHKY (2002) entwickelt ein Energiekennzahlensystem auf der Grundlage des UPN-Modells, das alle industriellen Energieverbraucher in Umwandlungs- (U), Produktions- (P) und Nebenanlagen (N) klassifiziert (SCHIEFERDECKER et al. 2006). Durch die Entwicklung von Kennzahlen lassen sich die produktionsbedingten Energiebedarfe einzelnen Erzeugnissen zuordnen, daraus energierelevante Stamm- und Bewegungsdaten definieren und somit beliebige Energieformen in den Planungsablauf eines ERP integrieren. Die definierten Energiestammdaten erlauben es, ausgehend von den Erzeugnisbedarfen bereits während der Produktionsbedarfsplanung die erforderlichen Energiemengen zu ermitteln und die Energiedisposition zu planen.

Mit dem Ziel, Aufgaben des Energiemanagements in ERP-Systeme zu integrieren und somit den Gesamtwirkungsgrad der Stückgüterproduktion zu verbessern, beschreiben GOLDHAHN et al. (2012) unterschiedliche energetische Planungsalgorithmen. Im Mittelpunkt der Algorithmen zur Grobterminierung, Kapazitätsabstimmung und Feinterminierung steht die Auslastungsoptimierung energieintensiver Maschinen durch Minimierung oder Rückführung der Verlustenergie in andere Prozesse.

Im Zuge des durch das BMBF geförderten Projektes „Energie- und Hilfsstoffoptimierte Produktion“ (EnHiPro) werden Strukturen zur Abbildung und Auswertung von Energiedaten innerhalb eines proprietären ERP-Systems geschaffen. Auf diese Weise können Energieverbräuche einzelnen Kostenstellen zugewiesen und die Informationen für zukünftige Planungsläufe genutzt werden. (HERMANN et al. 2013)

GRABL (2015) entwickelt eine Methode zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion. Die Energieflexibilität basiert dabei auf gezielten Anpassungen des Betriebszustands einzelner Verbraucher, die als Energieflexibilitätsmaßnahmen beschrieben werden. Zur Bewertung der Maßnahmen wird ein Kennzahlensystem entwickelt, das neben technischen Parametern (z. B. der Anzahl und Verteilung der Betriebszustände eines Verbrauchers) insbesondere die betrieblichen Kosten abbildet, die aus der Durchführung einer Lastanpassung resultieren. Die entwickelte Bewertungsmethode beschreibt ein schrittweises Vorgehen zur Identifikation von Betriebsmitteln, die sich unter gegebenen Strompreismodellen grundsätzlich für eine flexible Lastanpassung eignen. Eine unmittelbare Anknüpfung an die Verfahren der PPS findet jedoch nicht statt.

PUTZ et al. (2015) unterteilen ein gesamtes Produktionssystem in funktionale Module, die als Ressourcennetzwerke bezeichnet werden. Diese Ressourcennetzwerke setzen sich aus der Produktion, der Infrastruktur sowie der Energiebereitstellung zusammen und werden von der PPS jeweils separat nach eigenen Nachhaltigkeitszielen behandelt. Die Zielvorgaben der einzelnen Netzwerke, wie z. B. termingerechte Auftragsabwicklung oder maximale Eigenversorgung, können sich dabei unterscheiden und so zu einer besseren Gesamtzielerfüllung beitragen. Da sich der Ansatz derzeit in Entwicklung befindet, sind keine konkreten Verfahren zur Lösung der PPS-Aufgaben beschrieben.

Bestehende Ansätze der Energieorientierung in der Produktionsprogramm- und Produktionsbedarfsplanung fokussieren vorrangig auf die Erweiterung von ERP-Systemen um Energiekennzahlen. Durch die Erweiterung der Datenstrukturen und Algorithmen innerhalb der Planungssysteme wird es ermöglicht, den Energiebedarf bereits in langfristigen Planungsperioden abzuschätzen. Somit stehen die erforderlichen energiebezogenen Stammdaten auch für die folgenden Planungs- und Steuerungsaufgaben zur Verfügung.

3.2.2 Ansätze der Eigenfertigungsplanung

Im Zuge der Eigenfertigungsplanung werden die Zielvorgaben der Produktionsbedarfsplanung für den jeweiligen Dispositionszeitraum detailliert und zur Umsetzung vorbereitet. Dabei werden insbesondere die Losgrößenrechnung, die Feinterminierung von Aufträgen und die Ressourcenfeinplanung durchgeführt, um zu gewährleisten, dass die erforderlichen Kapazitäten verfügbar sind (SCHUH & STICH 2012). Im Hinblick auf die Energieziele eines Unternehmens kann beispielsweise die Auswahl energieproduktiverer Ressourcen oder die

3.2 Energieorientierte Ansätze der Produktionsplanung und -steuerung

Ermittlung einer energieoptimalen Losgröße erfolgen (REINHART et al. 2011, HERING et al. 2013). Die Feinplanung wird in der Literatur vielfach auch als Belegungsplanung¹⁹ bezeichnet, deren Ergebnis eine zeitliche Einplanung von Arbeitsvorgängen auf einzelnen Arbeitsplätzen ist (HOPP & SPEARMAN 2008, WIENDAHL 2010). Wie Tabelle 3 zeigt, fokussiert eine Vielzahl der vorgestellten Ansätze eine Anpassung der Belegungsplanung zur Erreichung von energieorientierten Zielen. Durch eine Veränderung der Randbedingungen für das Maschinenbelegungsproblem und die Adaption eines Lösungsalgorithmus verfolgen diese Ansätze meist eine Minimierung des Gesamtenergieverbrauchs (JUNGE 2007), eine Glättung des Lastverlaufs (RAGER 2008, BRUZZONE et al. 2012, BÖNING et al. 2013) oder eine Reduktion der Energiekosten infolge variabler Strompreise (EMEC et al. 2013, GROBE BÖCKMANN 2014, SHROUF et al. 2014, GONG et al. 2015, KELLER et al. 2015).

JUNGE (2007) erweitert das klassische Zielsystem der PPS um Energiekosten und stellt darauf aufbauend einen simulationsgestützten Ansatz für eine energieeffiziente Produktionssteuerung paralleler Maschinen vor. Durch eine Kopplung von Materialfluss-, Stofffluss- sowie Gebäudesimulation wird eine Optimierung der Maschinenbelegung zur Reduzierung des Heizbedarfs vorgenommen. Trotz realisierter Energieeinsparungen wird mit diesem Ansatz jedoch keine Minderung der Gesamtkosten erreicht.

RAGER (2008) entwickelt eine energieorientierte Maschinenbelegungsplanung für die Werkstattfertigung, deren Zielsystem um die Minimierung der Kosten für eingesetzte Endenergieträger erweitert wird. Am Beispiel identischer paralleler Maschinen wird ein hybrider evolutionärer Belegungsalgorithmus formuliert, anhand dessen eine Minimierung der Energiekosten durch die Reduzierung der belegten Maschinen und die Glättung des Energiebedarfs erreicht werden. Ein ähnliches Vorgehen findet sich bei BRUZZONE et al. (2012). Im Zuge des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Projektes „Energiekostenorientierte Belegungsplanung“ (EnKoBel) wird ein Verfahren zur Nivellierung der Energiebedarfe in der Maschinenbelegung entwickelt. Anhand eines linearen Optimierungsproblems werden durch Neuordnung von Fertigungsaufträgen kostenintensive Lastspitzen vermieden und eine Lastglättung erreicht (IPH 2012, BÖNING 2013, BÖNING et al. 2013). Eine Betrachtung zeitvariabler Energiepreise wird bei diesen Ansätzen nicht vorgenommen.

¹⁹ Je nach Einschätzung des jeweiligen Autors werden diese Funktionen teilweise der Produktionsplanung und teilweise der Produktionssteuerung zugerechnet. Im Kontext der vorliegenden Arbeit beschreibt die Belegungsplanung den letzten Arbeitsschritt der Produktionsplanung.

3 Stand der Forschung und Technik

PECHMANN & SCHÖLER (2011) entwickeln eine Erweiterung einer speziell für kleinere und mittlere Unternehmen (KMU) ausgelegten PPS-Software, die in der Lage ist, Energiebedarfsdaten und Strommarktdaten zu verarbeiten. Das resultierende Softwaremodul ermöglicht eine Belegungsplanung unter Berücksichtigung der Energiekosten und leitet daraus einen Fahrplan zur Übermittlung an den Energieversorger für den kommenden Tag ab (PECHMANN et al. 2012). Eine Anknüpfung an die Produktionssteuerung erscheint möglich, wird von den Autoren jedoch nicht thematisiert.

EMEC et al. (2013) formulieren einen Belegungsalgorithmus für eine einzelne Maschine unter Berücksichtigung zeitvariabler Strompreise. Die Maschine wird dabei über die Zustände „Produzierend“, „Wartend“ sowie „Stillstehend“ beschrieben und bei der Belegung die voraussichtlichen Spotmarktpreise des folgenden Tages betrachtet. Der Planungshorizont endet am Vortag der Produktion. Das resultierende Optimierungsproblem lösen die Autoren für acht Maschinen heuristisch anhand von Mixed-Integer Programming und erreichen dabei Energiekosteneinsparungen von bis zu 78 % gegenüber einer konventionellen Belegungsplanung. In der Literatur sind zahlreiche weitere Belegungsprobleme beschrieben, bei denen die gewählten Lösungsalgorithmen, die betrachteten Materialflüsse oder die modellierten Maschinenzustände variiert werden. Beispiele finden sich unter anderem bei FANG et al. (2011), ARTIGUES et al. (2013), LUO et al. (2013), LE & PANG (2013), WANG et al. (2013), LIU et al. (2014), SHROUF et al. (2014) und GONG et al. (2015). KÜSTER et al. (2013) betrachten neben variablen Strompreisen auch prozessperiphere Verbraucher und die Stromeigenerzeugung in der Belegungsplanung, die anhand evolutionärer Optimierung gelöst wird. In keinem dieser Ansätze werden Produktionsstörungen, Abweichungen von geplanten Verläufen oder eine Anknüpfung an die Produktionssteuerung berücksichtigt.

GROBE BÖCKMANN (2014) definiert einen Energiereglerkreis, anhand dessen flexible Stromtarife und kurzfristige Ereignisse, wie beispielsweise Produktionsstörungen und Lastabwurf, in der Produktionssteuerung berücksichtigt werden, um die Energiekosten zu minimieren. Zu diesem Zweck wird die Belegungsplanung um periphere Nebenprozesse ergänzt und in Abhängigkeit flexibler Stromtarife durchgeführt²⁰. Als weiterer Bestandteil des Energiereglerkreises wird eine Produktionsregelung zur Reaktion auf kurzfristige Störungen oder Lastspitzen vorgestellt. Die Regelstrategien umfassen dabei die Maßnahmen „*Maschine*

²⁰ Dem Verständnis der vorliegenden Arbeit folgend wird der entwickelte Energiereglerkreis vorrangig der Produktionsplanung zugeordnet.

3.2 Energieorientierte Ansätze der Produktionsplanung und -steuerung

stoppen“, „*Maschine nicht stoppen*“, „*Ereignis an Maschine beheben*“ sowie die Neuplanung der Maschinenbelegung. Eine Umsetzung der Produktionsregelung in konkrete Algorithmen bleibt aus. Eine Berücksichtigung weiterer Aufgaben der Produktionssteuerung, wie beispielsweise der Auftragsfreigabe oder der Kapazitätssteuerung, wird ebenfalls nicht vorgenommen. Ein analoger Ansatz wird im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes „Steuerung des Energieverbrauchs in der Fertigung und Steigerung der Energieeffizienz durch Automatisierung“ (ECOMATION) verfolgt. Dazu wird ein maschinenferner Energiereglerkreis entwickelt, der einer Feinplanung nach Effizienzzielen sowie einer Energieüberwachung entspricht. In Abhängigkeit der jeweiligen Fertigungsstrategie wird eine Belegungsplanung durchgeführt und entscheidungsrelevante Kennzahlen, beispielsweise der Energieverbrauch, simulationstechnisch prognostiziert. Treten im Betrieb Störungen auf, die nicht durch eventuelle Planungsreserven abgefangen werden können, wird eine Neuplanung nach demselben Prinzip initiiert. (EBERSPÄRCHER 2014, EBERSPÄRCHER 2015, SCHLECHTENDAHL et al. 2016)

KELLER et al. (2016b) stellen einen Produktionsplanungsprozess unter Berücksichtigung des flexiblen Strombezugs ausgehend von der Losgrößenrechnung über die Termin- und Kapazitätsplanung bis zur Maschinenbelegung vor. Die elektrische Energie wird zu diesem Zweck als Lagerbestand modelliert, der entweder aus lang- und kurzfristigen Strommärkten oder einer Stromeigenerzeugung bereitgestellt wird (KELLER et al. 2016a). Der Energiebezug wird auf diese Weise in einem ERP-System abgebildet und in dessen Planungslauf integriert (KELLER & REINHART 2016). Darüber hinaus wird ein heuristisches Feinplanungsverfahren für die Werkstattfertigung auf Basis von Simulated Annealing vorgeschlagen, das die Maschinenbelegung im Hinblick auf variable Strompreise adaptiert. Der Planungshorizont reicht bis zum Vortag der Produktion und stellt energetische Zielvorgaben für eine anschließende Produktionssteuerung bereit (KELLER et al. 2015, KELLER et al. 2016a, KELLER et al. 2016b).

Die Analyse bestehender Ansätze zur Berücksichtigung der elektrischen Energie in der PPS zeigt, dass eine Vielzahl der bisherigen Arbeiten auf die Feinplanung und insbesondere die Belegungsplanung fokussiert ist (vgl. Tabelle 3). Dazu wird im Allgemeinen das Zielsystem der Belegungsplanung um Energiekosten sowie eine Modellierung des Energiebedarfs erweitert und die daraus resultierende Problembeschreibung anhand von Optimierungsalgorithmen gelöst. Diese Anpassung der Belegungsplanung um zeitvariable Strompreise zeigt in unterschiedlichen Anwendungsfällen gute Ergebnisse bei der Reduzierung der

Energiekosten. Jedoch bleiben während der Feinplanung die im Produktionsablauf unausweichlichen Störungen, die eine zielgerechte Umsetzung der Produktionspläne gefährden, unberücksichtigt. Der Horizont der Belegungsplanung endet in der Regel spätestens am Vortag des Produktionsbeginns (PECHMANN et al. 2012, EMEC et al. 2013, KELLER et al. 2015). Um die von der Feinplanung gesetzten Energieziele im Fabrikbetrieb durchsetzen zu können, bietet sich daher die Ergänzung des Planungssystems um eine energieorientierte Produktionssteuerung für den Umgang mit dynamischen Veränderungen an.

3.2.3 Ansätze in der Produktionssteuerung

Die Planungsergebnisse werden zur Durchführung an eine Produktionssteuerung übergeben. LÖDDING (2008) unterteilt diese in die drei Funktionen Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung (vgl. Abschnitt 2.4.4). Im Folgenden werden Ansätze untersucht, die sich diesen Aufgaben zuordnen lassen.

NEUGEBAUER et al. (2012) stellen mit dem sog. eniMES ein Frameworks zur Abbildung und Überwachung des Energiebedarfs durch ein MES in der Fließfertigung vor. Neben einer Schichtplanung in Abhängigkeit variabler Strompreise liegt insbesondere die Entwicklung von Steuerungsverfahren zur Auswahl des energieeffizientesten Produktionszustands im Fokus der Arbeiten. Im Vordergrund steht dabei die Bündelung von Nebenzeiten unter Ausnutzung von Materialpuffern, sodass Maschinen längere Zeit in energiesparende Betriebsmodi geschaltet werden können. Ein ähnlicher Optimierungsansatz findet sich auch bei FRIGERIO & MATTA (2015). In Ergänzung beschreiben PUTZ et al. (2012) das Verfahren Constant-Energy-In-Process zur Freigabe von Zustandswechseln beliebiger Anlagen in Abhängigkeit der Energieverfügbarkeit. 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, beispielsweise von „Betriebsbereit“ zu „Produzierend“, vornehmen. Durch die Anwendung des Verfahrens kann der Gesamtenergiebedarf der Produktion reduziert werden (LANGER et al. 2014). Eine Berücksichtigung der Strompreise oder der Energieeigenversorgung findet hingegen nicht statt.

HAAG (2013) entwickelt ein Kennzahlensystem zur Bewertung der Energieeffizienz der Produktion, das die energetischen Wechselwirkungen zwischen den Produktionsprozessen und der Produktionsperipherie abbildet. Anhand von simulationstechnischen Szenarioanalysen wird das Bewertungsschema genutzt,

3.2 Energieorientierte Ansätze der Produktionsplanung und -steuerung

um die energetisch effiziente Kombination der Produktionsparameter, z. B. des Arbeitsplans und der Betriebszustände, zu ermitteln. Produktionsrückmeldungen können in die Simulation zurückgespeist und in die Auswahl der Parameter einbezogen werden. Auf diese Weise fungiert das Simulations- und Bewertungssystem als Produktionssteuerung. Der Ansatz verfolgt das Ziel, die Energieeffizienz der Produktion zu erhöhen und bildet den Strombezug folglich nicht ab.

HERING et al. (2013) empfehlen ein kaskadiertes Regelkreismodell zur Erreichung von Energieeffizienzzielen in der Eigenfertigungsplanung und -steuerung. Das Modell sieht vor, Messwerte aus der Prozessebene, wie den Energieverbrauch, in Echtzeit aufzunehmen, mit den Sollvorgaben eines zentralen Produktionsmanagements zu vergleichen und Maßnahmen (z. B. eine Anpassung der Auftragsreihenfolge) einzuleiten. Darauf aufbauend stellen SCHUH et al. (2015) eine Prioritätsregel zur Reihenfolgebildung in Abhängigkeit des Strompreises vor. Die Prioritätsregel betrachtet die Energieintensität wartender Aufträge und gibt in Zeiten hoher Strompreise den Aufträgen mit niedriger Intensität bzw. analog bei niedrigen Strompreisen denen mit hoher Intensität den Vorzug. Mit diesem Verfahren konnten die Energiekosten gegenüber einer First-In-First-Out-Regel (FIFO) reduziert werden (SCHUH et al. 2015). Eine Abbildung der Energieeigenversorgung und der Prozessperipherie wird von den Autoren nicht vorgenommen.

SUN et al. (2013) entwickeln eine Kapazitätssteuerung für lose verkettete Fertigungslinien zur Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs. Unter Ausnutzung der Materialpuffer werden Anlagen dabei gezielt heruntergefahren, ohne dass die Durchbringungsmenge reduziert wird. Darauf aufbauend stellen SUN & LI (2014) ein analytisches Modell basierend auf einem Markov-Entscheidungsproblem für die Bereitstellung von Regelleistung in Fertigungslinien auf, mit dem die Leistungsaufnahme innerhalb eines 15-minütigen Intervalls maximal reduziert werden kann, ohne den Materialdurchfluss zu reduzieren (SUN & LI 2014). ZHOU et al. (2013) wenden ein vergleichbares Verfahren unter Betrachtung von nur zwei Betriebszuständen an. Um den Durchsatz bei Abruf der Regelleistung aufrechtzuerhalten, wird der Fertigungsengpass dynamisch ermittelt und von steuernden Eingriffen ausgenommen. FERNANDEZ et al. (2013) dimensionieren anhand nichtlinearer Programmierung zusätzliche Materialpuffer in einer lose verketteten Fertigungslinie, um eine Kapazitätssteuerung in Hochpreisphasen umzusetzen (SUN et al. 2014). Die Aufgaben der Auftragsfreigabe und der Reihenfolgebildung sowie die Reaktion auf Störungen des Produktionsbetriebs werden von den Autoren nicht adressiert.

3 Stand der Forschung und Technik

BEIER et al. (2016a) stellen ein Verfahren für die Kapazitätssteuerung einer lose verketteten Fertigungslinie vor, das den Energiebedarf der Produktion in Echtzeit an die Erzeugungsleistung dezentraler Energieerzeuger anpasst, um die Eigenversorgung zu maximieren. Die Steuerungslogik beobachtet kontinuierlich die Stromeinspeisung sowie die Pufferbestände zwischen Produktionsprozessen und ermittelt den aktuellen Engpass im Materialfluss (BEIER et al. 2016a, BEIER 2017). Durch die Vorgabe von Betriebszuständen und Geschwindigkeiten für unkritische Prozesse wird ein Abgleich zwischen Stromerzeugung und -bedarf vorgenommen. Als unkritisch gelten dabei alle Prozesse, die durch hinreichend gefüllte Entkopplungspuffer vom Materialfluss entkoppelt und außerdem nicht der aktuelle Produktionsengpass sind. Tritt eine Veränderung in den Zuständen, im Engpass oder aktuell in der Erzeugungsleistung auf, wird der Steuerungsalgorithmus erneut durchlaufen. Anhand eines Simulationsmodells aus drei Maschinen sowie drei Transportbändern können die Autoren den Anteil der Stromeigenversorgung im Vergleich zu einer Referenzsteuerung nach dem One-Piece-Flow-Prinzip erhöhen. Demgegenüber steht das Risiko verlängerter Durchlaufzeiten und höherer Umlaufbestände (BEIER et al. 2016a, BEIER 2017). In einer vergleichenden Betrachtung können die Autoren aufzeigen, dass mit dieser Steuerungslogik eine ähnliche Steigerung der Stromeigenversorgung erreicht werden kann, wie beim Einsatz von Stromspeichern, die dem lokalen Stromnetz in Form von Elektrofahrzeugen temporär zur Verfügung gestellt werden (BEIER et al. 2016b). Da die Autoren sich auf die dezentrale Energieerzeugung fokussieren, erfolgt keine Berücksichtigung variabler Stromkosten. Das Verfahren wird auf eine einfache Fließfertigung einer einzelnen Variante reduziert, sodass folglich keine Auftragsfreigabe oder Reihenfolgebildung vorgenommen werden.

Im Projekt „Integration von Energiekosten in Fertigungssteuerungsverfahren“ (EnKoFer) werden zeitvariable Energiekosten als Zielgröße in konventionelle Verfahren der Produktionssteuerung integriert (IPH 2014, WILLEKE et al. 2014). Dabei wird adressiert, dass die Produktionssteuerung durch Zuordnung von Aufträgen zu Maschinen einen mittelbaren Einfluss auf den Lastgang der Fertigungsmittel nimmt. Durch eine zeitliche Verlagerung von Maschinenanläufen und Aufträgen soll volatilen Stromkosten in der Auftragsbearbeitung Rechnung getragen werden (WILLEKE et al. 2014). In diesem Zuge entwickeln die Autoren energiekostenorientierte Verfahren für die Auftragsfreigabe, die Reihenfolgebildung sowie die Kapazitätssteuerung.

3.2 Energieorientierte Ansätze der Produktionsplanung und -steuerung

Die Energiekosten- und Belastungsorientierte Auftragsfreigabe (eBOA) unterscheidet zwischen dringlichen Aufträgen, die nach den Regeln der Belastungsorientierten Auftragsfreigabe (BOA) gemäß BECHTE (1984) eingeplant werden, und nicht-dringlichen Aufträgen, die gemäß den minimalen spezifischen Energiekosten für die Freigabe priorisiert werden. Zu diesem Zweck werden für jeden Auftrag die Energiekosten aus der auftragsabhängigen elektrischen Leistungsaufnahme und der zeitabhängigen Energiekostenfunktion ermittelt. Eine Freigabe nicht-dringlicher Aufträge erfolgt, wenn die Bestandsgrenzen der einzelnen Fertigungsmittel nicht überschritten werden (WILLEKE et al. 2015a). Gegenüber der konventionellen BOA kann durch dieses Verfahren eine Reduktion der Energiekosten um 17 % erreicht werden.

Ergänzend stellen die Autoren eine energiekostenorientierte Reihenfolgebildung (ECO-S) vor, die auf der Schlupfzeitregel basiert. Wartende Aufträge werden anhand ihres für den Bearbeitungszeitraum durchschnittlichen Strompreises bewertet und mit einem aus historischen Daten ermittelten Strompreismedian verglichen. Ist der durchschnittliche Preis niedriger als der Median, werden Aufträge mit höherer Leistungsaufnahme priorisiert. Im umgekehrten Fall werden Aufträge mit niedriger Leistungsaufnahme bevorzugt. Als weiteres Kriterium wird die Schlupfzeit der Aufträge berücksichtigt, d. h. Aufträge mit niedriger oder negativer Schlupfzeit werden höher priorisiert. Ein Gewichtungsfaktor zwischen beiden Kriterien erlaubt eine individuelle logistische Zielpositionierung. In Simulationsstudien konnten die Stromkosten um 13,52 % reduziert werden, während die Termintreue nur geringfügig verschlechtert wird (WILLEKE et al. 2015b, WILLEKE et al. 2016).

Die energiekostenorientierte Rückstandsregelung (ECO-BC) berücksichtigt Energiekosten bei der Terminierung von Kapazitätsanpassungen, indem Kapazitätserhöhungen bevorzugt zu Zeiten niedriger Strompreise und Kapazitätsreduktionen zu Zeiten hoher Preise durchgeführt werden. Über einen Verzinsungsfaktor wird die Präferenz einer frühzeitigen Kapazitätsanpassung abgebildet. Eine Validierung des Verfahrens steht derzeit noch aus (WILLEKE et al. 2015c). Die Autoren stellen umfassende Vorschläge dar, variable Stromkosten in die Verfahren der Produktionssteuerung zu integrieren. Prozessperiphere Verbraucher sowie die Energieeigenerzeugung werden von den Autoren jedoch nicht berücksichtigt. Ebenso wird das Zusammenwirken der energiekostenorientierten Produktionssteuerung mit einer übergeordneten Produktionsplanung nicht betrachtet.

3 Stand der Forschung und Technik

Eine Gegenüberstellung der bisherigen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der energieorientierten Produktionssteuerung ist in Abbildung 20 dargestellt. Alle Verfahren beziehen die Produktionsanlagen ein. Die Produktionsperipherie wird hingegen nur von wenigen Autoren abgebildet. Es zeigt sich, dass die meisten Ansätze auf die Fließfertigung ausgerichtet sind und Produktionsstörungen dabei oftmals nicht oder nur indirekt berücksichtigt werden. Die bestehenden Arbeiten, die sich auf die Werkstattfertigung beziehen, sind weder auf die Produktionsperipherie noch auf die Stromeigenerzeugung ausgerichtet, sondern bilden lediglich die Spotmarktpreise in den Aufgaben der Produktionssteuerung ab.

		PUTZ et al. 2012	FERNANDEZ et al. 2013	HAAG 2013	SUN et al. 2013, 2014	WILLEKE et. al. 2015a,b,c	SCHUH et al. 2015	BEIER et al. 2016a, b, 2017
Legende:								
	○ : Kriterium nicht erfüllt							
	◐ : Kriterium teilweise erfüllt							
	● : Kriterium vollständig erfüllt							
Funktion der Produktionssteuerung	Auftragsfreigabe	◐	○	○	○	●	○	○
	Reihenfolgebildung	○	○	◐	○	●	●	○
	Kapazitätssteuerung	◐	●	○	●	◐	○	●
Einbeziehung von ...	Produktionsanlagen	●	●	●	●	●	●	●
	Produktionsperipherie	◐	○	●	○	○	○	◐
Zielgröße	Reduzierung der Energiekosten	○	●	○	●	●	●	○
	Steigerung des Eigenverbrauchs	○	○	○	○	○	○	●
	Steigerung der Energieeffizienz	●	○	●	○	○	○	○
Betrachtete Randbedingungen	Variable Strompreise	○	○	○	◐	●	●	○
	Produktionsstörungen	◐	○	●	○	◐	○	◐
Betrachtetes Fertigungsprinzip	Fließfertigung	●	●	○	●	○	○	●
	Werkstattfertigung	○	○	◐	○	●	●	○

Abbildung 20: Gegenüberstellung bisheriger Arbeiten zur energieorientierten Produktionssteuerung

Bestehende Ansätze im Bereich der energieorientierten Produktionssteuerung können in der Regel der Kapazitätssteuerung in Abhängigkeit der aktuellen Verfügbarkeit elektrischer Energie zugeordnet werden. Zumeist umfassen diese Ansätze maschinenbezogene Schaltstrategien, bei denen die Betriebsmittelinten-

sität unter Ausnutzung von Materialpuffern so angepasst wird, dass ein Abgleich zwischen Energieangebot und -bedarf eingestellt werden kann. Diese Verfahren sind oftmals auf Fertigungslinien mit einem einzelnen Produkt ausgerichtet und greifen daher nicht die Auswahl der Fertigungsaufträge ein. Produktionsstörungen sowie die Prozessperipherie werden dabei in vielen Ansätzen nicht explizit betrachtet. Darüber hinaus bestehen einzelne Arbeiten zur Erweiterung der Auftragsfreigabe und der Reihenfolgebildung um variable Strompreise. Die existierenden Ansätze zielen darauf, die Gesamtenergiekosten durch die Ausnutzung von Strompreisdifferenzen zu minimieren. Die Stromerzeugung und die Anknüpfung an eine Produktionsplanung nach Energieaspekten sind in diesen Verfahren nicht abgebildet. Da die Freigabe und Reihenfolgebildung fest an Fertigungsaufträge gebunden sind, findet in diesen Fällen keine Berücksichtigung der Prozessperipherie statt.

3.2.4 Rechnergestützte zur Steuerung des Strombedarfs

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Produktionssteuerung, die in der Regel einen kurzfristigen Zeitraum von Minuten bis zu einzelnen Tagen betrachtet. Zur Unterstützung der Aufgaben in diesem Horizont haben sich in der Praxis MES etabliert (vgl. Abschnitt 2.5.2). SAUER et al. (2016) haben in einer Marktstudie die Produkte von 39 MES-Softwareanbietern im Hinblick auf deren Fähigkeit zur Steuerung des elektrischen Energiebedarfs untersucht und mit Softwaresystemen aus dem Bereich des Energiemanagements verglichen. Im Kontext der definierten Gesamtzielsetzung (vgl. Abschnitt 1.3) sind dabei die folgenden Erkenntnisse von Bedeutung:

- Softwaresysteme für das Energiemanagement sind im Allgemeinen auf die Erfassung, die Verwaltung und die Dokumentation von Verbrauchsdaten, nicht dagegen auf Steuerungsfunktionalitäten ausgerichtet.
- Alle untersuchten MES-Lösungen sind prinzipiell in der Lage, Verbrauchsdaten in Echtzeit zu erfassen. Insbesondere die elektrische Energie ist in allen Systemen abgebildet. 90 % der Systeme erlauben darüber hinaus eine Visualisierung dieser Verbrauchsdaten.
- Eine Korrelation zwischen Verbrauchsdaten und Produktionsparametern ist bereits in über 70 % der MES möglich.
- Eine Prognose oder Simulation voraussichtlicher Energiebedarfe ist dagegen in den meisten Systemen nicht abgebildet.

- Ebenso werden Daten hinsichtlich der Energielieferung, der Energieerzeugung und der Energiespeicherung aktuell nicht in MES abgebildet.
- Die Steuerungsfunktionalitäten beschränken sich in der Regel auf ein automatisiertes Spitzenlastmanagement. In einigen Fällen ist auch eine Feinplanung hinsichtlich des Energiebedarfs implementiert.

3.3 Ansätze des innerbetrieblichen Lastmanagements

3.3.1 Allgemeines

Wie in Abschnitt 2.3.4 dargelegt, umfasst das Lastmanagement die zielgerichtete Steuerung einzelner Lasten zur Beeinflussung des Lastgangs und dient als Instrument, um die Energiekosten eines Unternehmens zu senken. Dies setzt voraus, dass im Unternehmen geeignete elektrische Verbraucher verfügbar sind, die sich zeitweise in unterschiedliche Betriebszustände schalten lassen. In der industriellen Praxis findet insbesondere das Spitzenlastmanagement Verwendung, da sich durch die Begrenzung der Spitzenlast die Stromkosten energieintensiver Unternehmen reduzieren lassen (vgl. Abschnitt 2.3.1). Eine Betrachtung des Materialflusses tritt hier vielfach in den Hintergrund. Das Lastmanagement steht dabei in Konflikt mit der logistischen Zielerreichung des Unternehmens. So gelten potenzielle Störungen der Produktions- und Arbeitsabläufe sowie die Beeinträchtigung der Produktqualität als größte Hemmnisse für die Implementierung eines Lastmanagements. (DENA 2012, KLOBASA et al. 2013, NEUGEBAUER 2014, DIEBLER 2016, WEINERT & MOSE 2016)

Je nach Zielsetzung finden sich unterschiedliche Ansätze zur Umsetzung des Lastmanagements, die sich im Allgemeinen in *regelbasierte Ansätze* und *optimierende Ansätze* klassifizieren lassen. Dabei sind die Übergänge zu den Verfahren der Produktionsfeinplanung und -steuerung (vgl. Abschnitt 3.2.2 und 3.2.3) teilweise fließend. Eine grundsätzliche Einordnung für das Verständnis im Kontext dieser Arbeit ist in Abbildung 21 dargestellt. Demnach wird ein Lastmanagement vorrangig im kurzfristigen Zeitbereich (optimierende Ansätze) bis hin zur Echtzeitsteuerung (regelbasierte Ansätze) eingesetzt.

3.3 Ansätze des innerbetrieblichen Lastmanagements

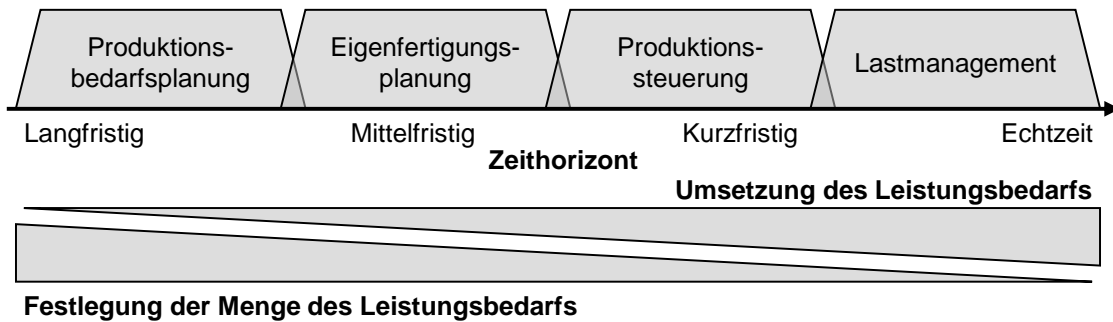


Abbildung 21: Einordnung des Lastmanagements
in den Planungs- und Steuerungsablauf

3.3.2 Regelbasiertes Lastmanagement

Die Grundlagen für das regelbasierte Lastmanagement sind die kontinuierliche Überwachung des Lastgangs sowie die Definition von Warn- und Eingriffsgrenzen in Form von Maximalleistungen, auf deren Basis in die Leistungsaufnahme angeschlossener Verbraucher eingegriffen wird. Dabei kann weiter zwischen Leistungswächtern, Maximumwächtern und Vorrangschaltungen unterschieden werden.

Bei einfachen *Leistungswächtern* wird vorab eine feste Maximalleistung definiert und unabhängig von der Abrechnungsperiode bei jeder Überschreitung dieses Maximalwerts eine Schaltung ausgelöst. Da im Allgemeinen nicht die momentane Leistungsaufnahme, sondern deren Durchschnitt über eine Abrechnungsperiode kostenrelevant ist, können Leistungswächter oftmals im Hinblick auf die Energiekosten unnötige Eingriffe verursachen. Demgegenüber liegt den *Maximumwächtern* die mittlere Leistung in der abrechnungsrelevanten Periode zugrunde. Innerhalb dieses Zeitintervalls wird dazu fortlaufend die mittlere Leistungsaufnahme ermittelt und, beispielsweise durch Extrapolation, für den Rest der Periode prognostiziert. Um Überschreitungen vom vertraglich vereinbarten Leistungsmittelwert zu verhindern, können elektrische Verbraucher gemäß einer vorab zu definierenden Prioritätsliste heruntergefahren werden. Die Schaltung der elektrischen Verbraucher kann dabei entweder manuell erfolgen, nachdem das Lastmanagement Warnsignale ausgegeben hat (z. B. optisch in Form einer Lastampel), oder vollautomatisiert durchgeführt werden. Da im praktischen Betrieb hohe Lasten insbesondere bei Anfahrvorgängen von Anlagen auftreten, besteht zu den Zeitpunkten, an denen mehrere große Verbraucher in kurzer Folge hochgefahren werden, ein gesteigertes Risiko für Lastspitzen. Aus

diesem Grund werden *Vorrang-* oder *Prioritätsschaltungen* genutzt, welche die Anfahrvorgänge der Anlagen zeitlich strecken und somit konstruktive Überlagerungen der Einzellastspitzen vermeiden. (WOLF 1987, DITTMER 1989, WOHINZ & MOOR 1989, HESSEL 2008, DENA 2012)

3.3.3 Optimierendes Lastmanagement

Optimierende Lastmanagementansätze berücksichtigen im Gegensatz zu den regelbasierten Verfahren zusätzliche Randbedingungen bei der Schaltung von Anlagen. Die optimierenden Ansätze werden zumeist in komplexeren Algorithmen umgesetzt. WOLF (1987) differenziert anhand eines vorgegebenen Produktionsprogramms zwischen zeitlich fixierten und flexiblen Verbrauchern. Durch die heuristische Anpassung der Maschineneinsatzzeiten flexibler Verbraucher wird die Gesamtlast auf einen vorgegebenen Maximalwert beschränkt. Auf der Ebene einer einzelnen Anlage nehmen POPP & ZÄH (2014a, 2014b) ebenfalls die Unterscheidung in zeitlich determinierte und nicht-determinierte Prozesse (z. B. Hilfsaggregate der Maschine) vor. Durch die separate Ansteuerung der Prozesse kann am Beispiel der zerspanenden Werkzeugmaschine eine Reduktion der Spitzenlast erreicht werden. Ein darauf aufbauender Optimierungsansatz findet sich auch bei ABELE et al. (2016).

WEINERT & MOSE (2016) entwickeln ein Multi-Agenten-System für ein verteiltes Lastmanagement von Härteöfen. Durch eine Adaption der Startzeitpunkte sowie der Temperaturgradienten der einzelnen Ofenprozesse minimiert das Agenten-System die Maximallast des Produktionsbereichs. Im betrachteten Anwendungsfall zeigt sich, dass den Einsparungen durch die geringere Maximallast eine erhöhte Bearbeitungszeit der Einzelprozesse und somit höhere Prozesskosten gegenüberstehen. Nur für Lastreduktionen von maximal 15 % trägt das System zu einer Minimierung der Gesamtkosten bei. Vergleichbare Lastmanagementansätze finden sich vorrangig für den privaten Sektor. So fassen KOSTKOVÁ et al. (2013) sowie FLOREA et al. (2013) verschiedene Arbeiten zu Agenten-Systemen, die zur Koordination verteilter Verbraucher in Privathaushalten oder öffentlicher Netze entwickelt wurden, zusammen. KAMPER (2009) entwickelt ein dezentrales Lastmanagement auf Basis evolutionärer Algorithmen und lokaler Suchverfahren, das zahlreiche Einzelhaushalte kombiniert, um regionale Lastabweichungen auszugleichen. Im Allgemeinen unterscheiden sich die Anforderungen dabei deutlich vom betrieblichen Lastmanagement, da im privaten Sektor eine deutlich höhere Flexibilität bezüglich der Einsatzzeiten besteht.

Grundsätzlich sind Lastmanagementsysteme in der betrieblichen Praxis seit Langem bekannt und insbesondere bei energieintensiven Unternehmen im Einsatz. Regelbasierte Lastmanagementansätze haben dabei die höchste Verbreitung, da diese einfach umzusetzen und zu automatisieren sind. Die Ansätze sind vor allem dazu geeignet, kurzfristige Lastspitzen zu vermeiden und die Spitzenlast eines Unternehmens zu begrenzen, bringen jedoch die Gefahr von unnötigen Schalteingriffen und Produktionsstörungen mit sich. Optimierende Lastmanagementverfahren stellen dagegen hohe Anforderungen an die Vernetzung der Anlagen und die Informationstransparenz. Im industriellen Einsatz werden Lastmanagementsysteme vielfach autark betrieben, ohne eine Verknüpfung mit der innerbetrieblichen PPS, und sind somit in der Regel einseitig auf Energieziele fokussiert, während die übrigen logistischen Zielgrößen keine Berücksichtigung finden. (NEUGEBAUER 2014, WEINERT & MOSE 2016)

3.4 Ansätze zur Modellierung produktionsbedingter Energiebedarfe

3.4.1 Allgemeines

Im Hinblick auf die Gesamtzielsetzung der vorliegenden Arbeit kommt der Abbildung und Prognose produktionsbedingter Energiebedarfe eine tragende Bedeutung zu (vgl. Abschnitt 1.3). Die Analyse verfügbarer Softwaresysteme im Bereich der energieorientierten Steuerung hat jedoch gezeigt, dass diese Aspekte in kommerziellen Lösungen bisher nur unzureichend umgesetzt sind (vgl. Abschnitt 2.5.2). Im Folgenden werden daher bestehende Forschungsansätze zur Modellierung der elektrischen Energiebedarfe innerhalb der Produktion analysiert. Im Vordergrund stehen dabei Ansätze, die bereits einen Bezug zur PPS aufweisen.

Nach SCHMID et al. (2015) können die Modellierungsansätze produktionsbedingter Energiebedarfe grundlegend in empirische Modelle (vgl. Abschnitt 3.4.2) und simulationsbasierte Ansätze bzw. zustandsbasierte Modelle (vgl. Abschnitt 3.4.3) eingeteilt werden. Ergänzend kommen zudem komponentenbasierte Modelle (vgl. Abschnitt 3.4.4) und produktbasierten Modelle in Betracht. Simulationsbasierte Ansätze stehen nicht im Fokus der Betrachtung, werden aber untersucht, sofern sie im Kontext der Arbeit sinnvoll erscheinen.

Produktbasierte Ansätze dienen im Allgemeinen der Bilanzierung der Gesamtenergie, die während des Herstellungsprozesses für ein spezifisches Produkt auf-

3 Stand der Forschung und Technik

gewandt wird und werden vorrangig in der Produktentwicklung eingesetzt (RAHIMIFARD et al. 2010, SEOW & RAHIMIFARD 2011, SEOW et al. 2013, BONVOISIN et al. 2013). Die Ansätze liefern keine expliziten Einblicke in einzelne Produktionsschritte und werden in dieser Arbeit nicht betrachtet.

3.4.2 Empirische Modelle

Die Grundlage der empirischen Energiebedarfsmodellierung bilden im Wesentlichen experimentelle Beobachtungen des Energieverbrauchs einer Anlage in Abhängigkeit der gewählten Prozessparameter. Anhand statistischer Methoden wird eine mathematische Korrelation zwischen den Parametern und dem resultierenden Energieverbrauch formuliert, um somit eine Prognose zukünftiger Energiebedarfe vornehmen zu können (KARA & LI 2011, BONVOISIN et al. 2013, SCHMID et al. 2015). Aufgrund der umfangreichen Untersuchungen der letzten Jahre finden sich in der Literatur inzwischen für zahlreiche Produktionsprozesse empirische Modelle. Eine Einteilung exemplarischer Modelle anhand der Fertigungsverfahren nach DIN (8580) zeigt Abbildung 22, wonach insbesondere zerspanende Trennprozesse in der Forschung umfassend untersucht worden sind. Da sich das prinzipielle Vorgehen zur Ermittlung empirischer Energiebedarfsmodelle im Allgemeinen gleicht, wird die folgende Darstellung auf ein repräsentatives Modell aus der Zerspanung reduziert.

Fertigungsverfahren		
Trennen	Urformen	Umformen
<u>Drehen und Fräsen:</u> KARA & LI 2011 LI & KARA 2011 DIAZ et al. 2011 DIAZ et al. 2012 LI et al. 2013a LIU et al. 2015b	<u>Spritzgießen:</u> THIRIEZ & GUTOWSKI 2006 QURESHI et al. 2012 <u>Selektives Lasersintern:</u> MOGNOL et al. 2006 <u>Extrusion:</u> LI et al. 2013b	<u>Abkantpressen:</u> SANTOS et al. 2011
<u>Schleifen und Polieren:</u> AURICH et al. 2012		

Abbildung 22: Einordnung empirische Energiebedarfsmodelle nach Fertigungsverfahren

3.4 Ansätze zur Modellierung produktionsbedingter Energiebedarfe

KARA & LI (2011) beschreiben eine Methode zur Entwicklung eines Energiebedarfsmodells auf Basis von gezielten Messungen in der zerspanenden Bearbeitung. In diesem Vorgehen werden über eine statistische Versuchsplanung zunächst die zu untersuchenden Kombinationen von Prozessparametern bestimmt. Unter diesen Parametern werden anschließend Energiebedarfsmessungen an Anlagen durchgeführt und ein statistisches Modell in Abhängigkeit der Prozessgrößen abgeleitet. Die Vorhersagen des entwickelten Modells werden schließlich durch weitere Messungen validiert. Nach dieser Methode entwickeln die Autoren ein Modell für den spezifischen Energiebedarf von Bearbeitungsmaschinen und können das Modell mit Genauigkeiten von über 90 % in der Praxis validieren (vgl. Abbildung 23).

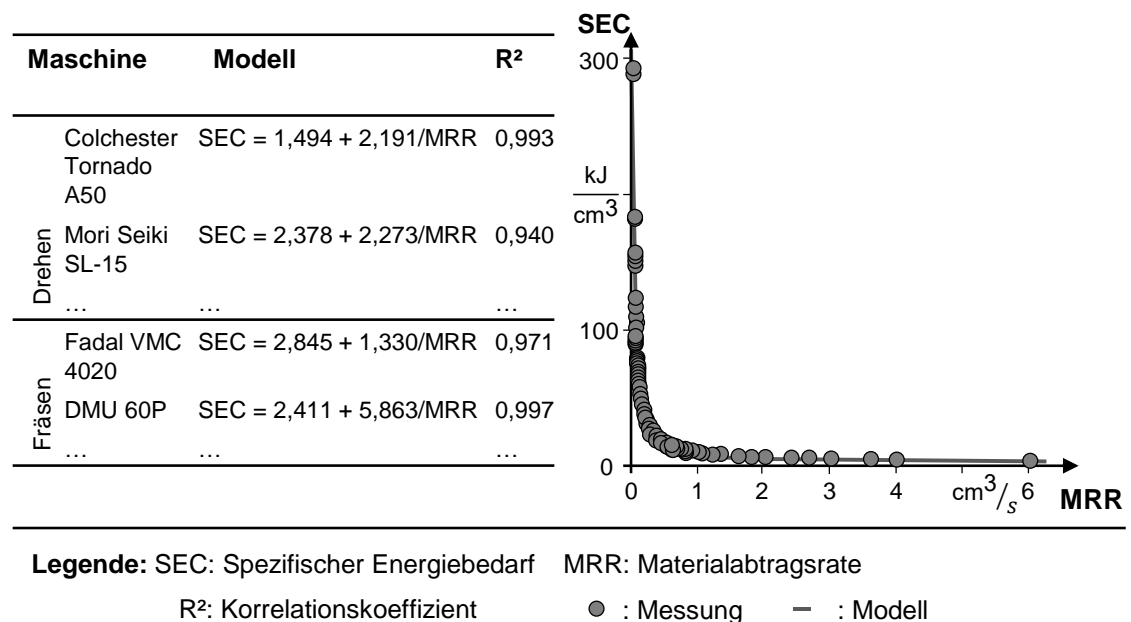


Abbildung 23: Energiebedarfsmodelle für Bearbeitungsmaschinen (links), Gegenüberstellung von Messwerten und Modell am Beispiel der DMU 60P (rechts) (KARA & LI 2011)

Durch eine verfeinerte Modellbildung, beispielsweise unter Berücksichtigung der Spindeldrehzahl oder einer durchschnittlichen Schnittleistung, lässt sich die Prognosegenauigkeit dieses Modells weiter verbessern (LI et al. 2013a, LIU et al. 2015b). Demgegenüber steht jedoch eine erhöhte Anzahl an Maschinenkoeffizienten, die experimentell bestimmt werden müssen. Die empirischen Modelle bilden in der Regel ausschließlich die Leistungsaufnahme während des Bearbeitungsprozesses ab (SWAT et al. 2015a), sodass der Energiebedarf der übrigen Betriebszustände separat bestimmt werden muss.

Empirische Ansätze weisen im Allgemeinen die höchste Prognosegenauigkeit auf, erfordern jedoch eine umfassende experimentelle Datenbasis und einen entsprechenden Modellierungsaufwand (SCHMID et al. 2015). Die detaillierten Prozessdaten (z. B. die Materialabtragsrate) sind in der Feinplanung und Steuerung nicht explizit verfügbar, so dass sich diese Verfahren nicht für eine direkte Anbindung an die PPS eignen. Stattdessen kann die empirische Modellierung dazu genutzt werden, um im Rahmen der Arbeitsvorbereitung die erforderlichen Stammdaten für die PPS zu ermitteln.

3.4.3 Zustandsbasierte Modellierung

Addition theoretischer Einzelwerte

Ein Ansatz zur Energiebedarfsprognose resultiert aus der Übertragung der Methods-Time-Measurement (MTM), bei der menschliche Bewegungsabläufe einer Tätigkeit in kleinste Grundelemente zerlegt werden. Durch Summierung der Einzelzeiten ergibt sich die Gesamtzeit der Tätigkeit (BULLINGER 1995). Analog kann auch der Energiebedarf eines Prozesses aus einer Summation kleinster Vergleichswerte ermittelt werden (RACKOW et al. 2015).

BORNSCHLEGEL et al. (2014) formulieren auf dieser Basis ein Methods-Energy-Measurement (MEM), bei der alle Verbraucher in kleinste Energieelemente zerlegt werden. Über sog. Technologiestrukturpläne werden die für eine spezifische Anlage erforderlichen Energieelemente definiert und anhand einer Verrechnung mit den jeweiligen Zeitanteilen somit der Energiebedarf der Anlage ermittelt. Der Vorteil der Methode liegt darin, dass auch die peripheren Verbraucher, die zum Betrieb einer Anlage erforderlich sind, in Strukturplänen abgebildet und somit in den Energiebedarf einkalkuliert werden. Eine Kombination der Methode mit der PPS wird von den Autoren nicht aufgezeigt.

KREITLEIN et al. (2015a) stellen in diesem Zusammenhang die Methode des E|Benchmark vor, bei der Vergleichswerte für Produktionsprozesse aus einem System vorbestimmter energetischer Minima bestimmt werden. Als Grundlage wird von einem physikalisch minimalen Energiebedarf des betrachteten Transformationsprozesses ausgegangen. Diesem minimalen Wert werden schrittweise Aufschläge zugerechnet, um somit das technische Minimum einer speziellen Fertigungstechnologie und schließlich das reale Minimum durch Berücksichtigung des gewählten Betriebsmittels, der Umgebungsbedingungen und eventueller Verluste zu bestimmen. Die Autoren werden diese Vergleichswerte im Rah-

men von Studien ermitteln und in einen Katalog überführen. Zum derzeitigen Stand ist dieser Katalog jedoch nicht für den praktischen Einsatz verfügbar. (KREITLEIN et al. 2015a, KREITLEIN et al. 2015b, RACKOW et al. 2015)

Modellierung der Betriebszustände

Alle Arten von Betriebsmitteln, wie beispielsweise Bearbeitungsmaschinen, Transportsysteme oder Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung (TGA), können im Zeitverlauf unterschiedliche Betriebszustände einnehmen. Es zeigt sich dabei eine Korrelation zwischen dem Betriebszustand einer Anlage und deren Leistungsaufnahme, sodass sich aus der Vorhersage der Betriebszustände auch der Energiebedarf ableiten lässt (WEINERT 2010a, STOCK & SELIGER 2015).

DIETMAIR & VERL (2008) entwickeln eine zustandsbasierte Modellierungsmethode für den Energiebedarf und definieren zu diesem Zweck verschiedene Betriebszustände einer Werkzeugmaschine, die durch die Aktivität unterschiedlicher Maschinenaggregate gekennzeichnet sind. Die Leistungsaufnahmen der Aggregate werden separat gemessen und unter der Annahme eines jeweils konstanten Leistungsbedarfs zum Gesamtleistungsbedarf eines Betriebszustands aufsummiert. Die Reihenfolge und die Dauer der einzelnen Betriebszustände ergeben sich dabei aus dem produktabhängigen Nutzungsprofil der Maschine. Die Kombination des Nutzungsprofils und der zustandsabhängigen Leistungsbedarfe ermöglicht eine Abschätzung des Gesamtenergiebedarfs. In der Validierung zeigt der Ansatz einen Fehler von ungefähr 5 % gegenüber Referenzmessungen. Die Autoren nutzen das Verfahren zur Bewertung unterschiedlicher Verfahrensalternativen, nicht jedoch im Kontext der PPS (DIETMAIR et al. 2008, DIETMAIR & VERL 2008, DIETMAIR & VERL 2009, KUHRKE 2011). Ein vergleichbarer Ansatz findet sich auch bei STOCK & SELIGER (2015).

HAAG (2013) erweitert diesen Ansatz auf die prozessperipheren Verbraucher. Dazu werden acht grundlegende Zustände für Ressourcen festgelegt und ebenso wie bei DIETMAIR & VERL (2008) mit Nutzungsprofilen kombiniert (vgl. Abbildung 24). Die konstanten Leistungsbedarfe der einzelnen Zustände können messtechnisch, erfahrungsbasiert oder anhand weiterer Modellierungsmethoden (vgl. WEINERT 2010a) bestimmt werden. Dabei wird am Beispiel der Kühlmittelversorgung, der Druckluftversorgung und der Beleuchtung aufgezeigt, wie mit diesem Ansatz periphere Verbraucher modelliert werden können. Zur Ermittlung der Zeitanteile der Nutzungsprofile wird explizit auf die Arbeitsplanung verwiesen. Eine Einbindung in die PPS erfolgt durch die Simulation und Bewertung unterschiedlicher Szenarien der Kapazitätsplanung (HAAG 2013).

3 Stand der Forschung und Technik

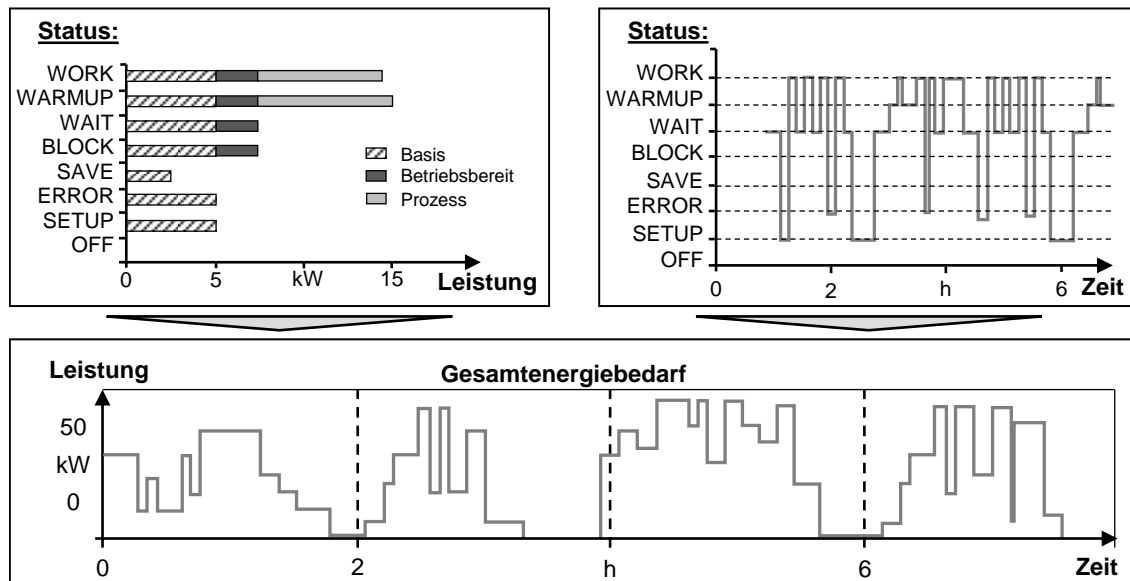


Abbildung 24: Zustandsbasierte Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs
(HAAG 2013)

WEINERT (2010a) verfolgt ebenfalls einen zustandsbasierten Ansatz und unterteilt die Prozessabläufe dazu in regelmäßig auftretende Standardzustände (z. B. Prozessausführung und Warten) sowie Sonderzustände (z. B. Ein- und Ausschalten). Die Leistungsbedarfe der einzelnen Zustände werden dabei nicht konstant angenommen, sondern in Form eines spezifischen Energieaufnahme Profils – sog. EnergyBlocks – repräsentiert (vgl. Abbildung 25). Die Ermittlung einzelner Profile kann experimentell durchgeführt werden, indem Messverläufe mathematisch angenähert und anschließend in einzelne Zustände aufgeteilt werden. Alternativ können die einzelnen Energieaufnahme profile auch analytisch oder numerisch berechnet werden. Durch die Aneinanderreihung mehrerer EnergyBlocks können somit unterschiedliche Arbeitsabläufe energetisch abgebildet werden. Auf dieser Basis ist eine Bewertung des Energiebedarfs von Fertigungsaufträgen in der Produktionsplanung und somit die Umsetzung einer Belegungsplanung zur Minimierung des Energiebedarfs möglich. Eine Kopplung zur Produktionssteuerung wird dabei nicht vorgenommen. (WEINERT 2010a, WEINERT 2010b, WEINERT et al. 2011)

3.4 Ansätze zur Modellierung produktionsbedingter Energiebedarfe

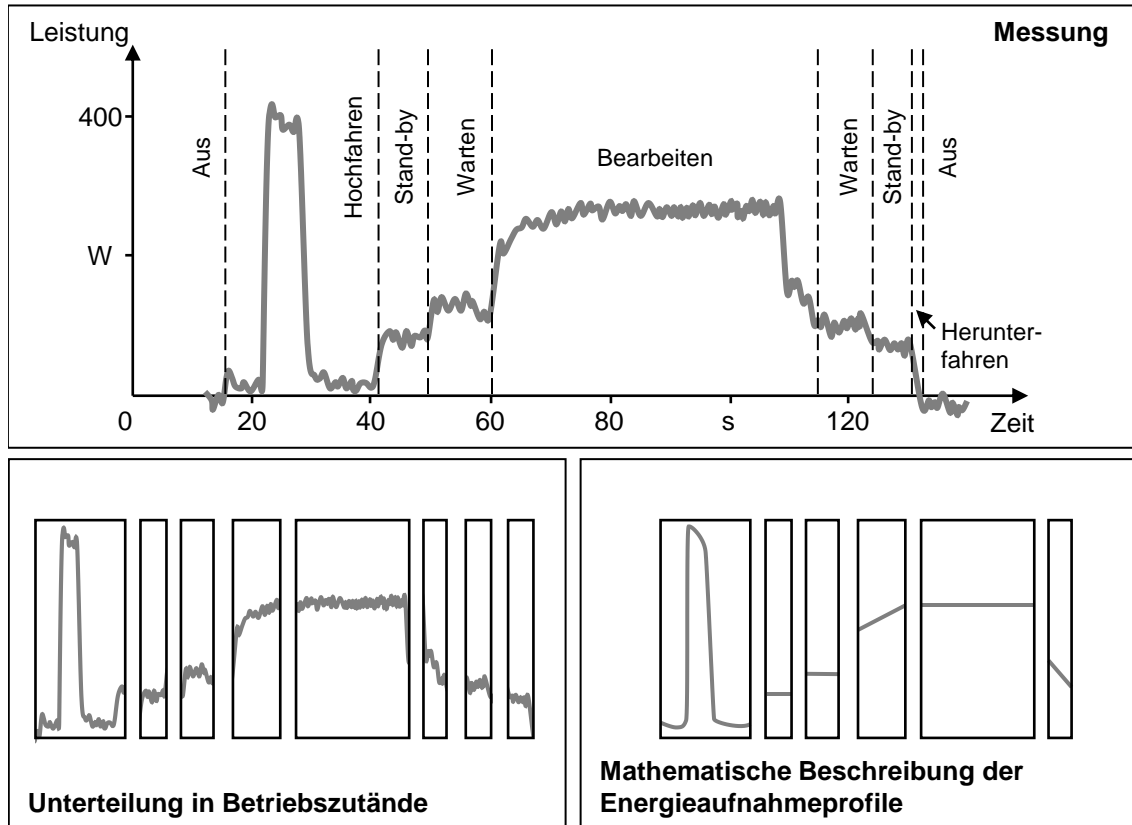


Abbildung 25: Vorgehen zur Ermittlung der EnergyBlocks
in Anlehnung an WEINERT (2010a), WEINERT et al. (2011)

Simulationsbasierte Ansätze

Den simulationsbasierten Ansätzen zur Energiebedarfsprognose liegt in der Regel eine Modellierung der Betriebszustände von Maschinen zugrunde. Im Bereich der Produktionssteuerung bleibt der Einsatz von Simulationen oftmals auf die Validierung der gewählten Steuerungsstrategie beschränkt (KIBIRA et al. 2015). Aus diesem Grund werden im Folgenden nur ausgewählte Ansätze vorgestellt. Für eine ausführliche Darstellung sei beispielsweise auf THIEDE (2012) verwiesen.

Wie bereits in Abschnitt 3.2.2 dargelegt, verknüpft JUNGE (2007) Simulationsmodelle für den Materialfluss, den Energie- und Stoffstrom sowie die Gebäudehülle um die Wechselwirkungen zwischen Produktionsprozess, der Abwärme und den Emissionen dazustellen. Die gekoppelte Simulation wird zur Minimierung der Heizkosten durch eine Optimierung der Maschinenbelegung genutzt. Als Datengrundlage dienen einfache Linearisierungen von Messreihen. Eine genauere Beschreibung der maschinenabhängigen Bedarfsprognose bleibt aus.

THIEDE (2012) entwickelt eine energieflussorientierte Simulationsumgebung, die neben den Produktionsanlagen auch die Druckluft- und die Dampferzeugung mit einschließt. Zur Bestimmung des Gesamtenergiebedarfs werden die einzelnen Verbraucher zustandsbasiert modelliert und in Kombination mit einem benutzerdefinierten Produktionsprogramm simuliert. Die Simulationsumgebung erlaubt Auswertungen hinsichtlich der Energieeffizienz, der Lastspitzen und der Energiekosten. Ein Bezug zur Produktionssteuerung oder zu einer flexiblen Strombeschaffung wird nicht vorgenommen.

KOHL et al. (2014) erweitern die kommerzielle Materialflusssimulation Plant Simulation um die Abbildung variantenspezifischer Lastprofile sowie zeitvariabler Strompreise. Die Profile werden messtechnisch ermittelt und in der Simulationsumgebung hinterlegt. Auf diese Weise kann die Simulation zur Prognose und Bewertung fabrikweiter Lastgänge sowie den damit assoziierten Stromkosten genutzt werden. Eine Anknüpfung an die Produktionsplanung wird von den Autoren zwar vorgeschlagen, jedoch nicht konkretisiert.

Mehrere Autoren schlagen eine Integration der zustandsbasierten Energiebedarfsmodellierung in die PPS vor. Die Anwendung der zustandsbasierten Modellierung bleibt dabei bisher jedoch auf die Planungsphase, insbesondere die Belegungsplanung oder die Simulation einer Produktionsstrategie, beschränkt (WEINERT 2010a, THIEDE 2012, HAAG 2013). Eine Anknüpfung an die Produktionssteuerung wird bisher für keinen der Ansätze vorgenommen. Da die erforderlichen Informationen über den Betriebszustand einer Ressource im Produktionsbetrieb im Allgemeinen verfügbar sind, erscheint eine Anwendung der zustandsbasierten Bedarfsmodellierung auch im Rahmen der Produktionssteuerung möglich. Die Bestimmung der zustandsabhängigen Energiebedarfe kann entweder messtechnisch erfolgen oder auf der Grundlage der detaillierteren Modellierungsverfahren, d. h. der empirischen oder komponentenbasierten Modellierung, erfolgen.

3.4.4 Komponentenbasierte Modellierung

Die komponentenbasierte Energiebedarfsmodellierung ähnelt den zuvor vorgestellten zustandsbasierten Ansätzen und wird in der Regel für zerspanende Bearbeitungsmaschinen eingesetzt. Die Grundlage dieses Ansatzes bildet die Zerlegung des zu betrachtenden Verbrauchers in Einzelaggregate. Der Energiebedarf der Aggregate wird jeweils separat ermittelt und aus den Einsatzzeiten der Komponenten anschließend den Gesamtenergiebedarf zu berechnen.

3.4 Ansätze zur Modellierung produktionsbedingter Energiebedarfe

HE et al. (2012) nutzen eine Kombination aus physikalischer Modellierung und experimentellen Messwerten, um die Energiebedarfe der Einzelaggregate in Abhängigkeit der Prozessparameter zu modellieren. Anschließend wird der zeitliche Verlauf der Prozessparameter für die Herstellung eines spezifischen Bauteils aus dem Programmcode der Bearbeitung abgeleitet und somit der Gesamtenergiebedarf abgeschätzt. Einen vergleichbaren Ansatz stellen ABELE et al. (2012a) sowie LI et al. (2014) zur Optimierung des Energiebedarfs während der Maschinenentwicklung vor. Eine Anwendung des Verfahrens im Rahmen der PPS wird von den Autoren nicht diskutiert.

SCHREMS (2014) stellt eine simulationsbasierte Prognose des maschinenbezogenen Energiebedarfs vor. Zu diesem Zweck werden die Maschinen in energierelevante Baugruppen eingeteilt und anschließend der Energiebedarf jeder einzelnen Baugruppe physikalisch modelliert (EISELE et al. 2011, ABELE et al. 2012a). Anschließend werden die separaten Baugruppenmodelle zu einem Gesamtmaschinenmodell zusammengesetzt, dessen Energiebedarf sich je Betriebszustand aus den Einzelbedarfen berechnen lässt (VERL et al. 2011a). Zur Verknüpfung mit der Prozesskette werden die Maschinenmodelle mit einer Materialflusssimulation verknüpft. Der Ansatz bietet die Möglichkeit, eine Maschinenbelegung hinsichtlich ihres voraussichtlichen Lastgangs auszuwerten. Der Fokus des Autors liegt dabei auf der Phase der Fabrikplanung und der Anlagenauswahl (ABELE et al. 2012b). Eine Verknüpfung mit der Produktionssteuerung wird nicht vorgenommen.

Ähnlich wie empirische Ansätze weisen auch komponentenbasierte Verfahren eine hohe Prognosegenauigkeit auf. Aufgrund des damit verbundenen Modellierungsaufwandes und der erforderlichen Datengrundlage (z. B. Einsatzzeiten einzelner Aggregate), erscheint eine explizite Verbindung mit der PPS nicht zweckmäßig. Die Anwendung der Verfahren liegt typischerweise in frühen Phasen der Produkt- oder Anlagenplanung.

3.5 Ableitung des Handlungsbedarfs

Im Rahmen des vorliegenden Kapitels sind die im Kontext dieser Arbeit relevanten Vorarbeiten aus Forschung und Technik analysiert worden. Aus dieser Untersuchung ergeben sich die nachstehenden Schlussfolgerungen:

- Unter den bestehenden Arbeiten zur energieorientierten PPS bildet die Berücksichtigung des flexiblen Strombezugs in der Belegungsplanung den Schwerpunkt der Betrachtungen. Das Vorgehen der Ansätze ähnelt sich und zielt in der Regel darauf ab, unter Nutzung von Heuristiken einen energiekostenminimalen Produktionsplan zu finden. Der Planungshorizont endet dabei spätestens einen Tag vor Produktionsbeginn und bietet somit Anknüpfungspunkte für die Produktionssteuerung.
- Die bisherigen Ansätze zur energieorientierten Produktionssteuerung fokussieren sich vielfach auf die Kapazitätssteuerung für die Fließfertigung und sind hierbei im Allgemeinen auf Schaltstrategien für Produktionsanlagen beschränkt.
- Einzelne Steuerungsverfahren sind zwar für die Werkstattfertigung geeignet, berücksichtigen dabei jedoch meist nicht die Prozessperipherie. Weiterhin sind diese Ansätze vollständig auf variable Strompreise ausgerichtet, ohne dass dabei die Eigenerzeugung betrachtet wird.
- Kommerziell verfügbare MES-Software kann eine geeignete Basis für die Umsetzung der energieorientierten Produktionssteuerung darstellen. Nahezu alle verfügbaren Produkte sind mittlerweile in der Lage, gemessene Energiedaten zu verarbeiten. Den Softwarelösungen fehlt dabei in der Regel jedoch die Fähigkeit, eine Prognose des Energiebedarfs durchzuführen, sodass die Steuerungsfunktionalitäten bisher vorrangig auf ein kurzfristiges Lastmanagement beschränkt bleiben.
- Verbreitete Verfahren des Lastmanagements sind derzeit einseitig auf die Energieziele und insbesondere auf die Vermeidung von Lastspitzen ausgerichtet. Das Lastmanagement steht somit in Konflikt mit den logistischen Unternehmenszielen und wird in der Praxis daher oftmals wegen des Risikos von Produktionsausfällen nicht implementiert.
- In der Literatur besteht eine Vielzahl umfassend untersuchter Modellierungsansätze für den produktionsbedingten Energiebedarf. Für die Verwendung in der PPS werden insbesondere zustandsbasierte Modelle vorgeschlagen. Dabei erfolgt die Anknüpfung vorrangig auf der Ebene der Belegungsplanung; eine Anwendung in der Produktionssteuerung erscheint im Rahmen dieser Arbeit jedoch ebenso umsetzbar.

3.6 Anforderungen an eine energieorientierte Produktionssteuerung

Aus dem dargelegten Fazit lassen sich konkrete Anforderungen an eine energieorientierte Produktionssteuerung zur Reduzierung der betrieblichen Stromkosten formulieren. Diese Anforderungen dienen als Leitlinie für das zu entwickelnde System (vgl. Kapitel 4) und als Maßstab, anhand dessen das System letztlich bewertet wird (vgl. Abschnitt 8.4.1).

Verfahren der Produktionssteuerung dienen allgemein dazu, Entscheidungsprozesse im Produktionsablauf zu standardisieren und zu rationalisieren, um auf diese Weise die Entscheidungsgeschwindigkeit zu erhöhen (LÖDDING 2008). Die Maßgabe einer energieorientierten Produktionssteuerung ist es, das Energieangebot als zusätzliches Kriterium in diese Entscheidungsprozesse zu integrieren. Damit ein solches Verfahren für ein Unternehmen wirtschaftlich und nachhaltig ist, müssen die Stromkosten in das logistische Zielsystem der Produktion eingeordnet werden. Eine einseitige Minimierung der Stromkosten könnte andernfalls eine Verschlechterung der Termintreue oder anderer Kostenarten nach sich ziehen, die von Unternehmen infolge der Opportunitätskosten in der Regel nicht akzeptiert wird (PAULUS & BORGGREFE 2011). Aus diesen Erwägungen sowie Erfordernissen für die technische Umsetzung resultieren die folgenden Anforderungen an die energieorientierte Produktionssteuerung.

Minimierung der betrieblichen Stromkosten

Die maßgebliche Anforderung an die energieorientierte Produktionssteuerung besteht darin, dass diese zur Reduzierung der betrieblichen Stromkosten beiträgt. Zu diesem Zweck soll die betriebliche Stromversorgung anhand des kurzfristigen Stromhandels, der Fahrplanvereinbarungen sowie der Energieeigenerzeugung in der Steuerung abgebildet werden. Dazu soll die elektrische Energie in der Produktionssteuerung als begrenzte Ressource aufgefasst und im engen Zusammenspiel mit einer übergeordneten Energiebezugsplanung betrachtet werden.

Reaktionsfähigkeit der Steuerung auf unerwartete Ereignisse

Die Kernaufgabe einer Produktionssteuerung liegt in der Umsetzung der Planwerte trotz unvermeidlicher Störungen. Aus diesem Grund muss die Produktionssteuerung in der Lage sein, den aktuellen Produktionszustand zeitnah auszuwerten, Abweichungen von logistischen oder energieorientierten Zielen zu identifizieren und korrigierende Maßnahmen einzuleiten.

Ganzheitliche logistische Zielerfüllung

Das Zielsystem der energieorientierten Produktionssteuerung soll sich nicht einseitig auf die Energiekosten fokussieren. So nehmen logistische Zielgrößen, allen voran die Termintreue, nach heutigem Stand gegenüber den Energiekosten oftmals einen höheren Stellenwert ein, weshalb diese Ziele auch in der energieorientierten Produktionssteuerung zu berücksichtigen sind.

Einbindung einer Strombedarfsprognose in die Produktionssteuerung

Der Umfang, in dem eine Produktionssteuerung flexibel auf Veränderungen in der Energiebereitstellung reagieren kann, ist maßgeblich von der Reaktionszeit des Unternehmens und der Vorwarnzeit vor dem Eintritt des Ereignisses abhängig. Durch die Prognose des Strombedarfs auf Basis aktueller Betriebsdaten kann die Vorwarnzeit verlängert und die Reaktionsfähigkeit somit verbessert werden.

Verknüpfung mit produktionsperipheren Verbrauchern

Ein nennenswerter Anteil des betrieblichen Strombedarfs fällt durch Verbraucher an, die nicht oder nur indirekt mit dem Produktionsprozess in Verbindung stehen. Die Steuerung dieser peripheren Verbraucher bietet die Möglichkeit zur flexiblen Lastanpassung ohne Rückkopplung in den Produktionsablauf. Die produktionsfernen Verbraucher sollen daher informations- und steuerungstechnisch in die Produktionssteuerung integriert werden.

Universalität der Steuerungsverfahren

Die Einsetzbarkeit des zu entwickelnden Steuerungsverfahrens soll unabhängig vom vorliegenden Materialfluss des Unternehmens sein. Dies bedeutet, dass das Verfahren auch für komplexe Materialflüsse, wie sie in der Werkstattfertigung auftreten, anwendbar sein muss. Auf diese Weise soll eine prinzipielle Umsetzbarkeit in möglichst vielen produzierenden Unternehmen gewährleistet werden.

Integrationsfähigkeit in Softwaresysteme

Die Komplexität der beschriebenen Zielsetzung und Anforderungen an das Steuerungsverfahren legt eine Unterstützung durch ein Softwaresystem nahe. Die Beschreibung der dafür erforderlichen Schnittstellen und Datenstrukturen soll dabei von der konkreten Implementierung in einem einzelnen Informationssystem unabhängig sein. Für die Beschreibung der Architektur und der damit zusammenhängenden Datenstrukturen ist folglich eine angemessene und allgemeine Beschreibungsebene zu wählen.

4 System zur energieorientierten Produktionssteuerung

4.1 Übersicht

Im vorliegenden Kapitel werden das System zur energieorientierten Produktionssteuerung sowie die zu dessen Umsetzung vorgesehenen Systemelemente vorgestellt, die in den nachfolgenden Kapiteln der Arbeit entwickelt werden. Entsprechend der in Abschnitt 1.3 dargelegten Zielsetzung dient die Produktionssteuerung in diesem Kontext dazu, die elektrische Energie als begrenzte Ressource zu disponieren und somit die Gesamtenergiekosten des Unternehmens zu reduzieren. Aufbauend auf den Anforderungen, die aus dem Stand der Forschung und Technik abgeleitet wurden, umfasst das Gesamtsystem die in Abbildung 26 dargestellten Systemelemente *Energieorientiertes Informationsmanagement*, *Bedarfsüberwachung* und *Energieorientierte Steuerungsverfahren*.

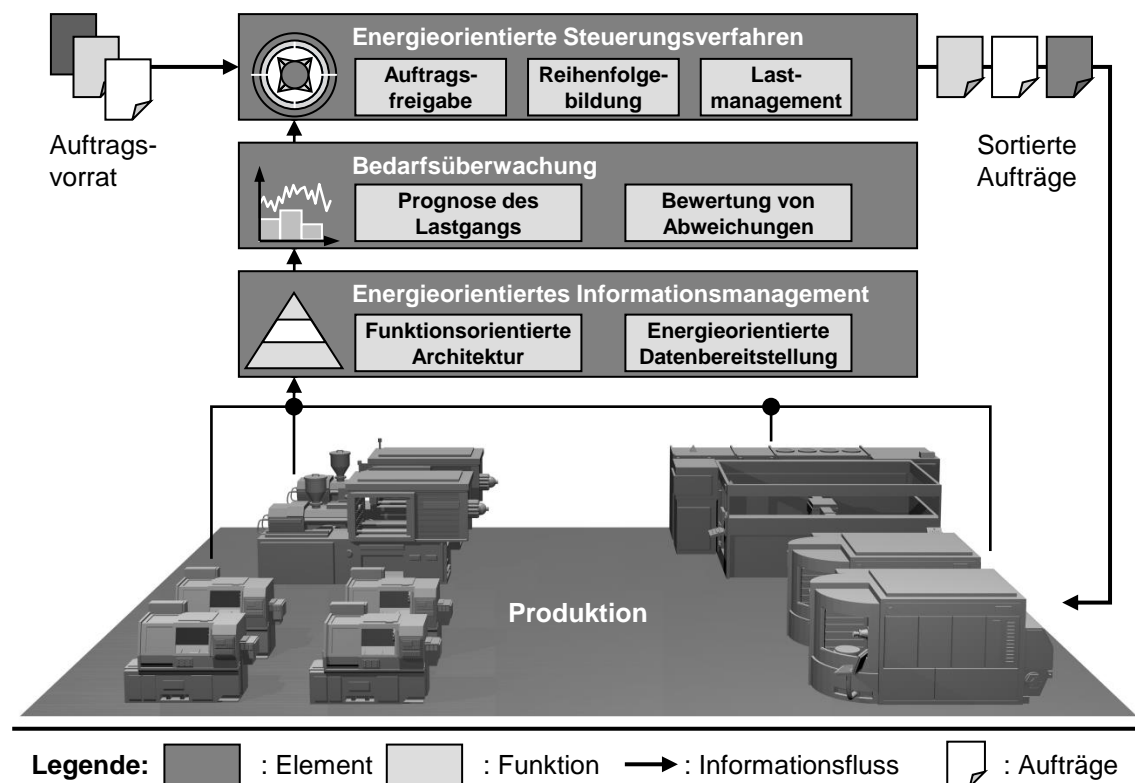


Abbildung 26: Gesamtdarstellung des Systems zur energieorientierten Produktionssteuerung

4.2 Systemelemente

Das *energieorientierte Informationsmanagement*, welches als erstes Systemelement in Kapitel 5 beschrieben wird, bildet die informationstechnischen Grundlagen ab, die zur Umsetzung energieorientierter Verfahren in der Produktionssteuerung geschaffen werden müssen. Dieses Systemelement umfasst insbesondere die Entwicklung einer Referenzarchitektur, in der das funktionale Zusammenwirken der PPS mit den Energieversorgern dargestellt ist. Im Vordergrund steht dabei eine Aufteilung der Funktionen zwischen der Planung und der Steuerung im Kontext der Energiebetrachtungen. Ebenso werden die erforderlichen Schnittstellen und Datenstrukturen zur Darstellung und zur Kommunikation von Plan-, Soll- und Ist-Werten für den Strombedarf innerhalb des Steuerungsprozesses geschaffen. Auf diese Weise soll eine Abbildung der energieorientierten Produktionssteuerung in Softwaresystemen ermöglicht werden.

Im Fokus des Systemelements *Bedarfsüberwachung* liegt die Identifizierung von Abweichungen im Stromangebot oder -bedarf, die einen Eingriff der Produktionssteuerung erforderlich machen (vgl. Kapitel 2.3.1). Zu diesem Zweck erfolgt zunächst eine Beschreibung und Klassifizierung von Störgrößen, die derartige Abweichungen verursachen können. In Analogie zum Störungsmanagement werden Kategorien potenzieller Störungen untersucht, um deren jeweiligen Auswirkungen auf die Strombereitstellung oder -nachfrage herzuleiten.

Anschließend wird methodisch dargelegt, wie Störungen auf Basis von Ist-Daten aus der Produktion identifiziert und deren Meldungen verarbeitet werden können, um somit ein aktuelles Produktionsabbild zu schaffen. Ausgehend vom aktuellen Produktionszustand erfolgt die Auswahl und Ergänzung einer Methode zur Strombedarfsmodellierung, die es erlaubt, den voraussichtlichen Lastgang der Produktion in der Steuerung zu prognostizieren.

Durch einen Soll-Ist-Abgleich mit den Vorgabewerten der Energiebezugsplanung werden die zu erwartenden Lastgangabweichungen ermittelt und ein Kostenmodell zur monetären Bewertung dieser Abweichungen aufgestellt. Der Handlungsbedarf der Produktionssteuerung ergibt sich somit genau aus den Abweichungen, die aufgrund der damit verbundenen Kosten als kritisch bewertet wurden und zu vermeiden sind.

Aufbauend auf den genannten Systemelementen bilden die *energieorientierten Steuerungsverfahren* den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit (vgl. Kapitel 7). Die Steuerungsverfahren verfolgen das Ziel, Maßnahmen zur Steuerung des Lastgangs in der Produktion zu identifizieren, zu beschreiben und zur ganzheitlichen Erfüllung der operativen logistischen Ziele umzusetzen. Die zu diesem Zweck eingesetzten Verfahren sind grundsätzlich situativ, da sie bei der Ausführung die jeweils aktuellen Rückmeldungen aus der Produktion einbeziehen. Die entwickelten Verfahren umfassen die *energieorientierte Reihenfolgebildung*, die *hybride energieorientierte Auftragsfreigabe* sowie das *situative Lastmanagement*.

Zentraler Bestandteil der Steuerungsverfahren ist die *energieorientierte Reihenfolgebildung*. Diese verfolgt das Ziel, solche Aufträge aus einem Auftragsvorrat aufgrund des Energiebedarfs zu priorisieren, die dazu geeignet sind, Lastgangabweichungen zu vermeiden. Das hierzu hergeleitete Verfahren berücksichtigt sowohl den Energiebedarf als auch die Schlupfzeit der Aufträge und erlaubt durch die Möglichkeit der Parametrierung eine logistische Positionierung zwischen Termintreue und Lastgangtreue.

Für die *hybride energieorientierte Auftragsfreigabe* wird ein zweistufiges Freigabeverfahren entwickelt, das eine zentrale Freigabestufe nach Dringlichkeit der Aufträge um eine zusätzlich dezentrale Freigabe anhand der Verfügbarkeit der elektrischen Energie erweitert. Auf diese Weise werden die Freigabezeitpunkte der Aufträge an den Fertigungsmitteln so gewählt, dass eine Reduzierung der Lastgangabweichungen erreicht wird.

Das *situative Lastmanagement* ergänzt die beiden Steuerungsverfahren und dient insbesondere der Einbindung produktionsperipherer Verbraucher. Hierzu werden zunächst potenzielle laststeuernde Maßnahmen in einem Produktionssystem ermittelt und hinsichtlich ihrer Eignung für die Steuerung klassifiziert. Weiterhin wird ein methodisches Vorgehen entwickelt, das eine Quantifizierung der Lastmanagementmaßnahmen basierend auf der aktuellen Produktionssituation ermöglicht. Für die situationsabhängige Auswahl geeigneter Maßnahmen im Produktionsbetrieb wird ein heuristischer Lösungsalgorithmus beschrieben, der einen Produktionsverantwortlichen bei seinem Entscheidungsproblem unterstützt.

4 System zur energieorientierten Produktionssteuerung

5 Energieorientiertes Informationsmanagement

5.1 Übersicht

Die Basis für eine zielgerichtete Umsetzung von PPS-Verfahren ist, dass die dazu erforderlichen Daten zur richtigen Zeit und in der richtigen Qualität verfügbar sind. Dementsprechend verfolgt das energieorientierte Informationsmanagement das Ziel, die Informationstransparenz hinsichtlich der Bereitstellung und der Nutzung der elektrischen Energie in der Produktion zu schaffen und somit die Grundlage für eine Adaption der Produktionssteuerung zu legen. Zu diesem Zweck wird unter Berücksichtigung der elektrischen Energie und insbesondere der unterschiedlichen Formen des Strombezugs eine funktionale Aufteilung zwischen der Planung und der Steuerung vorgenommen. Dies ermöglicht eine klare Einordnung der Produktionssteuerung in den Gesamtprozess einer energieorientierten PPS. Das daraus abgeleitete Zusammenwirken der PPS mit dem Energieversorger auf der einen Seite und den elektrischen Verbrauchern auf der anderen Seite wird in einer Referenzarchitektur zusammengefasst, die als ein Template für die Implementierung der energieorientierten PPS genutzt werden kann. Die Referenzarchitektur beschreibt plattformunabhängig das funktionale Gesamtkonzept zur Abbildung des Strombezugs in der PPS (vgl. Abschnitt 5.2) sowie die dazu erforderlichen Datenstrukturen (vgl. Abschnitt 5.3).

5.2 Referenzarchitektur für die energieorientierte Produktionssteuerung

5.2.1 Allgemeines

Die in Abbildung 27 aufgezeigte Referenzarchitektur stellt das zentrale Beschreibungsmodell der energieorientierten Produktionssteuerung dar. Um dem Anspruch eines Referenzmodells gerecht zu werden, soll die Architektur einen allgemeingültigen Charakter haben, der als Empfehlung für unternehmensspezifische Implementierung gilt (KRCMAR 2011). Ein Referenzmodell beschreibt somit Soll-Aussagen, die für konkrete Anwendungsfälle bedarfsgerecht angepasst werden müssen und auf die bei der Entwicklung einer spezifischen Lösung referenziert werden kann (BECKER & DELFMANN 2004, MERTENS 2013). Referenzmodelle lassen sich daher als allgemeingültige Vorlagen auffassen, die mo-

5 Energieorientiertes Informationsmanagement

dular aufgebaut, anpassbar gestaltet und unabhängig von möglichen Implementierungsformen sind (WENZEL 2000). Folglich beschreibt das Modell den Umfang dessen, was zur Umsetzung der energieorientierten PPS erforderlich ist, nicht jedoch die konkrete Implementierung in einer unternehmensspezifischen Softwarelösung, wie z. B. ERP oder MES. Dem Anwender wird somit die Möglichkeit geboten, eine Anpassung auf seine jeweilige Softwarelandschaft vorzunehmen.

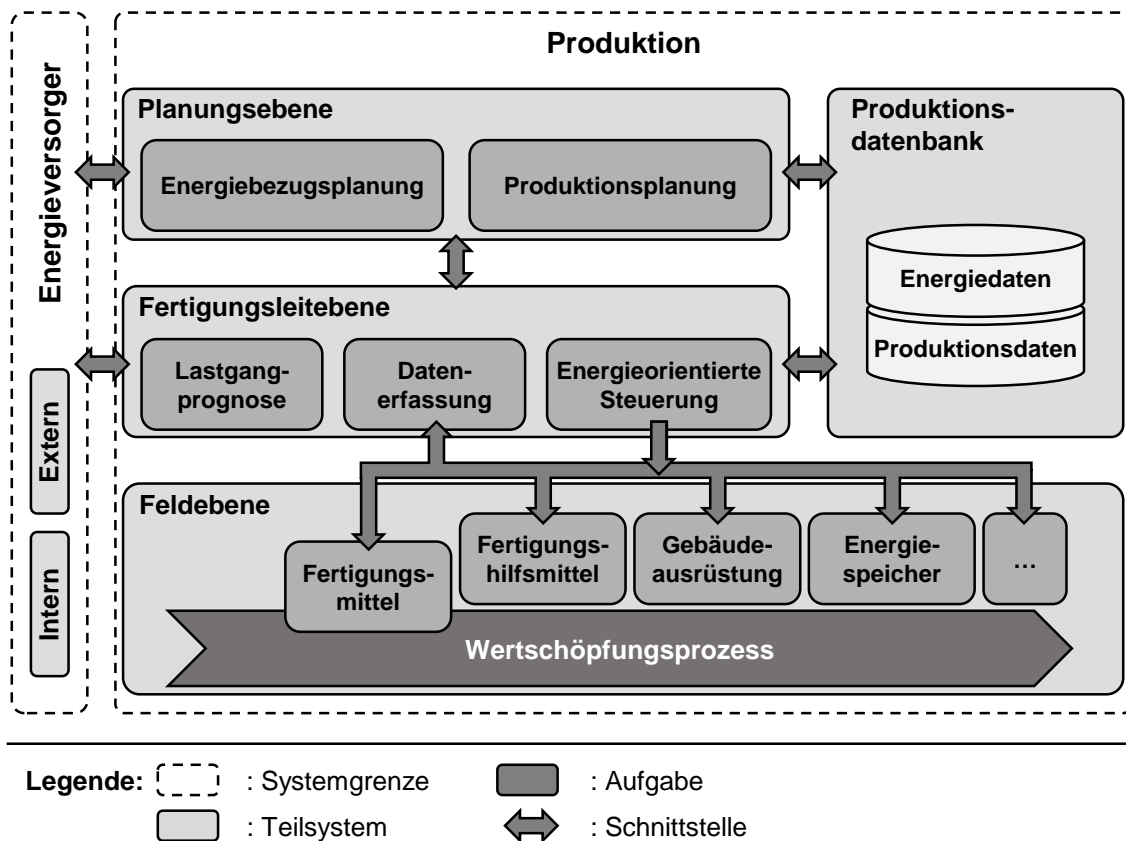


Abbildung 27: Referenzarchitektur für die energieorientierte PPS
in Anlehnung an SCHULTZ et al.(2016b)

Der vorrangige Zweck der im Rahmen der Arbeit entwickelten Referenzarchitektur liegt darin, den Funktionsumfang der energieorientierten Produktionssteuerung im Gesamtkontext der PPS zu definieren und die von der Steuerung zu verarbeitenden Informationsflüsse zu beschreiben. Im Vordergrund stehen dabei die Schnittstellen der Produktionssteuerung zum Energieversorger, zur übergeordneten Planung sowie zur Feldebene vor dem Hintergrund des flexiblen Strombezugs. Um eine hinreichende Allgemeingültigkeit zu erreichen, werden etablierte Standards und Normen, beispielsweise die Richtlinie VDI 5600 und der Entwurf der DIN EN 62264, bei der Entwicklung berücksichtigt.

5.2 Referenzarchitektur für die energieorientierte Produktionssteuerung

Um die Verständlichkeit der beschriebenen Architektur zu gewährleisten, beschränkt sich deren Darstellung auf die im Rahmen der vorliegenden Arbeit neuentwickelten und die für deren Entwicklung vorausgesetzten Komponenten. Die übrigen Bestandteile eines fertigungsnahen Informationssystems werden ausgeblendet. Stattdessen sei auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen (u.a. KURBEL 2005, KLETTI 2006, VDI 5600). Im Folgenden wird der funktionale Zusammenhang zwischen den zentralen Teilsystemen der Architektur erläutert.

5.2.2 Energieversorger

Der Energieversorger stellt im Kontext der Referenzarchitektur eine abstrakte Entität dar, die einerseits die Versorgung aus dem öffentlichen Netz (extern) und andererseits die dezentrale Eigenversorgung (intern) umfasst. Um eine Flexibilisierung des Strombezugs zu realisieren, wird die öffentliche Energieversorgung in Form der Börsenmärkte und der Regelleistung berücksichtigt (vgl. Abschnitt 2.3.1). Der Handel kann dabei entweder über die Börse direkt oder einen Dienstleister erfolgen, der die Konditionen der Börse an das Unternehmen weitergibt. Folglich stellt der Energieversorger differenzierte Produkte mit entsprechend unterschiedlichen Fristigkeiten bereit. Der Preis dieser Produkte steht dabei teilweise erst kurz vor Erfüllung des Geschäftes fest. Eine Gegenüberstellung der jeweiligen Zeithorizonte der PPS und der Strombörse lässt eine zeitliche Zuordnung der Produkte zu den Planungs- und Steuerungsaufgaben zu (SCHULTZ et al. 2014). Ähnliches gilt für die dezentrale Eigenversorgung, die unterschiedliche Stromerzeuger, wie beispielsweise KWK- oder PV-Anlagen, umfassen kann. Je nach Stromerzeuger fallen unterschiedliche Kosten für die Bereitstellung des Stroms²¹ an. Ferner ist der Prognosehorizont für die Erzeugungsleistung von der jeweiligen Technologie abhängig. So kann beispielsweise die Erzeugung durch eine PV-Anlage maximal drei Tage im Voraus zuverlässig bestimmt werden (KELLER et al. 2016a).

Abbildung 28 verdeutlicht diese Einordnung der Energieversorgung in die PPS. Die Termin- und Day-Ahead-Märkte werden im Kontext der vorliegenden Arbeit folglich dem Produktionsplanungsprozess zugeordnet. Dies deckt sich mit aktuellen Ansätzen der energieorientierten Maschinenbelegung, deren Zeithorizont in der Regel einen Tag vor der Umsetzung endet (PECHMANN et al. 2012, EMEC et al. 2013, KELLER et al. 2015). In diesem Zeitbereich wird ein Großteil des Energiebedarfs und der Energiekosten bereits festgelegt, sodass ein wirt-

²¹ Die Kosten der Stromerzeugung werden auch als Stromgestehungskosten bezeichnet.

5 Energieorientiertes Informationsmanagement

schaftlicher Abgleich zwischen dem Produktionsbedarf und den Stromkosten vorrangig im Zuge der Planung vorgenommen werden muss. Folglich ist die Energiebezugsplanung, die festlegt, wie sich die Energieversorgung des Unternehmens zusammensetzt, der Unternehmensleitebene zuzuordnen. Als Ergebnis kann die Produktionsplanung somit einen Fahrplan für den Folgetag generieren und diesen an den Energieversorger sowie die Produktionssteuerung übermitteln. Der Intraday-Handel und auch die Abrufe von Regelleistung liegen dagegen im Einflussbereich der Produktionssteuerung, wodurch die Steuerung auf kurzfristige Preisschwankungen reagieren kann. Dementsprechend erfordert die energieorientierte Produktionssteuerung ebenfalls eine Schnittstelle zum Energieversorger, über die die aktuellen Spotmarktpreise und die Zeitpunkte für den Abruf der Regelleistung kommuniziert werden.

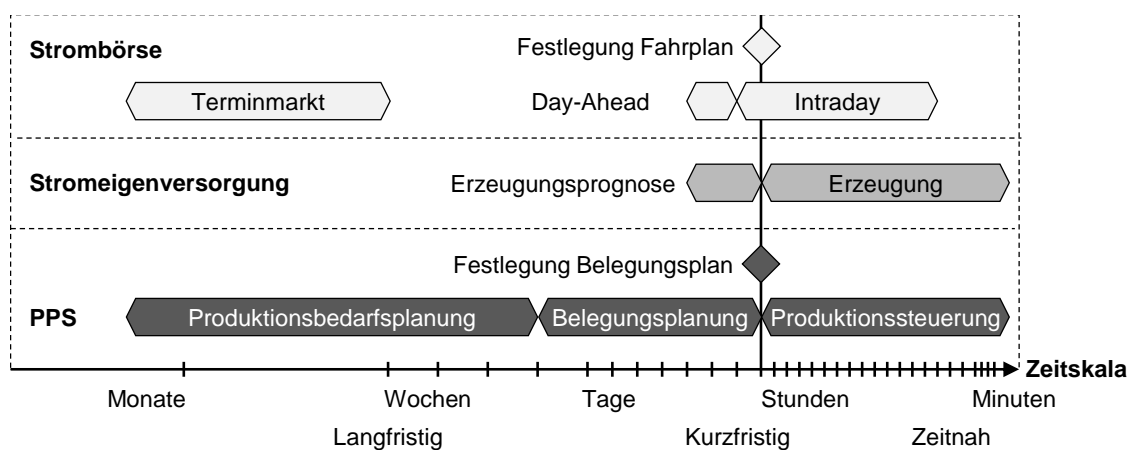
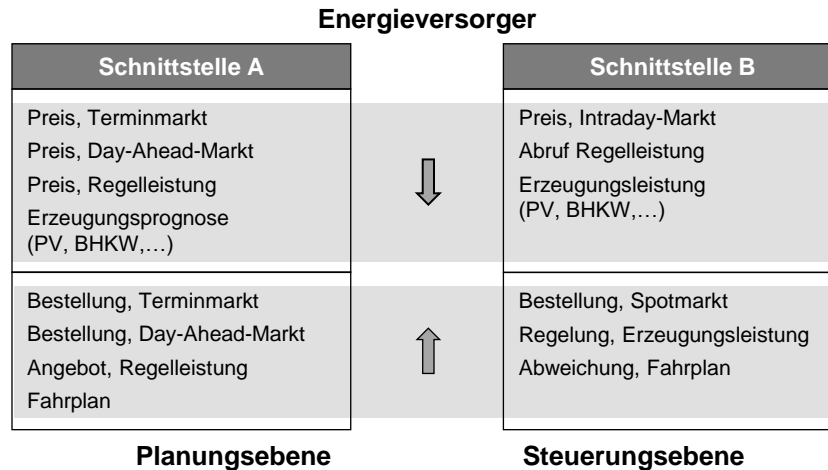


Abbildung 28: Zeitliche Einordnung des Strombezugs in die PPS
in Anlehnung an SCHULTZ et al. (2014)

Gemäß Abbildung 29 weist der Energieversorger jeweils eine bidirektionale Schnittstelle zur Unternehmens- und zur Fertigungsleitebene auf. Der Planungsebene werden die zeitabhängigen Preise auf dem Termin-, Day-Ahead- und Regelleistungsmarkt bereitgestellt. Darüber hinaus liefert die interne Eigenversorgung eine Erzeugungsprognose zur Berücksichtigung in der Planung. Als Ergebnis werden dem Energieversorger ein Fahrplan mit Bestellungen für Energielieferungen und gegebenenfalls Angebote für Regelleistung übermittelt. Seitens der Steuerungsebene übermittelt der Energieversorger hingegen die Preissignale des Intraday-Marktes sowie die zeit- und mengenmäßigen Abrufe der angebotenen Regelleistung. Auch die reale Erzeugungsleistung der Eigenversorgung wird an die Steuerung kommuniziert.

5.2 Referenzarchitektur für die energieorientierte Produktionssteuerung

Im Gegenzug werden von der Steuerungsebene kurzfristige Stromlieferungen ausgelöst und gegebenenfalls eine Regelung der Eigenerzeugung vorgenommen. Sollten Fahrplanabweichungen unausweichlich sein, werden diese an den Energieversorger rückgemeldet.



Legende: : Informationsfluss

Abbildung 29: Schnittstellen zwischen der PPS und dem Energieversorger für Unternehmen mit eigener Energiebezugsplanung und -handel

Zur Umsetzung der Schnittstellen bietet sich beispielsweise die Verwendung von intelligenten Stromzählern an, die in der Lage sind, Preissignale vom Energieversorger an den Endkunden zu übertragen. Diese Signale können dann von der PPS ausgewertet werden. Ebenso wäre eine Übermittlung der Börsenpreise über Web-Services direkt an das PPS-System denkbar. Aufgrund der relativ langen Fristigkeiten von 15 Minuten (Regelleistung) oder mehr bestehen keine hohen Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit der Schnittstellen.

5.2.3 Planungsebene

Wie Abbildung 28 verdeutlicht, ergibt sich die Funktionstrennung zwischen der Planungs- und der Steuerungsebene der energieorientierten PPS aus der Fristigkeit des Strombezugs. Die beiden Ebenen stehen in einer hierarchischen Beziehung. Dies bedeutet, dass die längerfristige Unternehmensleitebene Vorgabewerte zur Umsetzung an die kurzfristige Steuerung übergibt. Im Kontext dieser Arbeit sind dabei insbesondere die Aufgaben der Produktionsplanung und der Energiebezugsplanung relevant (vgl. Abbildung 30). Die *Produktionsplanung* umfasst die zuvor in Abschnitt 2.4.3 aufgeführten Aufgaben – insbesondere die

5 Energieorientiertes Informationsmanagement

Produktionsbedarfsplanung und die Belegungsplanung. Als zeitlich gesehen letzter Schritt der Produktionsplanung wird ein Belegungsplan zur Terminierung und Zuordnung von Aufträgen auf die Fertigungsmittel erzeugt.

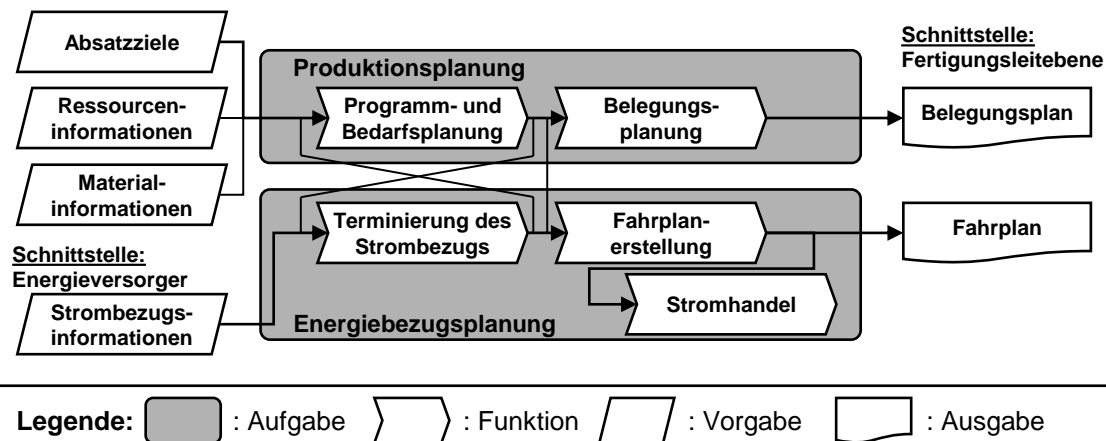


Abbildung 30: Aufgaben der Unternehmensleitebene

Zur Minimierung der Gesamtenergiekosten können diese Aufgaben mit der *Energiebezugsplanung* abgeglichen und die Verfahren entsprechend um Energiekostenbetrachtungen erweitert werden (vgl. Abschnitt 3.2). Das Ziel der Bezugsplanung liegt darin, festzulegen, über welche Quellen, d. h. öffentliches Netz oder Eigenversorgung, der zur Produktion erforderliche Strom bezogen werden soll. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Preis- und Mengenrisiken der unterschiedlichen Bezugsformen (z. B. durch Preis- und Prognoseschwankungen) wird in enger Verzahnung mit der Produktionsplanung das wirtschaftlichste Portfolio des Strombezugs gebildet. Auf einzelne Tage heruntergebrochen stellt dieses Portfolio den Fahrplan für den jeweiligen Folgetag dar. Nach Übermittlung an den Energieversorger ist der Fahrplan vom Produktionsablauf unabhängig, d. h. Änderungen im tatsächlichen Fertigungsbetrieb werden nicht unmittelbar im Fahrplan abgebildet. Jedoch lässt sich der Fahrplan durch kurzfristigen Energiehandel anpassen.

Der Belegungsplan sowie der Fahrplan werden der Produktionssteuerung zur Umsetzung übergeben. Um die Planung für den Folgetag adaptieren zu können, werden der Produktionsplanung die Fertigstellungen von Aufträgen und insbesondere der daraus abgeleitete Produktionsrückstand zurückgemeldet. Der Rückstand kann auf dieser Basis entweder unmittelbar nachgeholt oder in Form zusätzlicher Aufträge für die folgenden Tage eingeplant werden. Neben logistischen Zielen können bei dieser Entscheidung ebenfalls die Energiekosten berücksichtigt werden.

5.2.4 Fertigungsleitebene

Die in Abbildung 31 zusammengefassten Aufgaben der Fertigungsleitebene und der energieorientierten Steuerungsverfahren bilden den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Die *Erfassung von Betriebs (BDE)- und Maschinendaten (MDE)* bildet eine zentrale Grundkomponente der Fertigungsleitebene und dient vorrangig der Aktualisierung des Belegungsplans auf Basis aktueller Rückmeldungen aus der Fertigungsebene. Im Zuge der Energieorientierung bietet sich eine zusätzliche *Energiedatenerfassung (EDE)* auf zwei unterschiedlichen Ebenen an. Zunächst lässt sich der Gesamtlastgang der Fabrik am Übergabepunkt, d. h. am Stromzähler, erfassen und überwachen. Der Gesamtlastgang bildet die Grundlage der Stromkostenabrechnung durch den Energieversorger und stellt vor dem Hintergrund der Energiekostenbetrachtungen somit eine Kontrollgröße für die Produktionssteuerung dar. Weiterhin lassen sich über separate Zähler oder Messgeräte die Leistungsbedarfe der einzelnen Betriebsmittel und insbesondere der Fertigungsmittel aufzeichnen. Durch Korrelation der Messwerte mit den jeweiligen Produktionsdaten aus der Fertigungsleitebene lassen sich die zur Planung und Steuerung erforderlichen Stammdaten ableiten. Diese Verknüpfung ist in kommerziellen Systemen aktuell noch nicht umgesetzt und erfordert eine Weiterentwicklung der Softwarelösungen (vgl. Abschnitt 3.2.4).

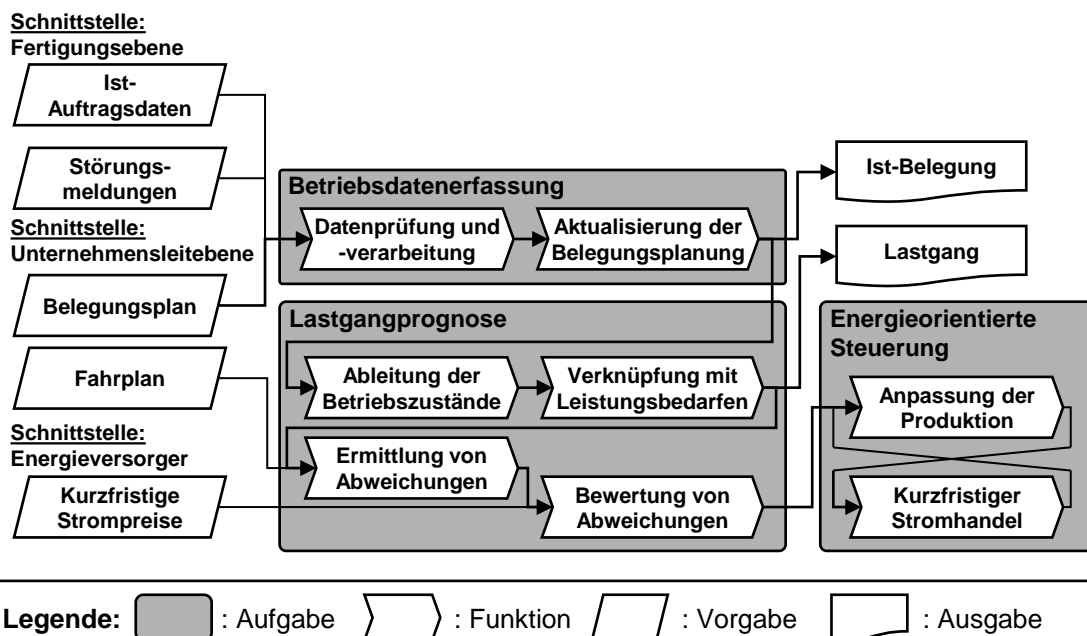


Abbildung 31: Aufgaben der Fertigungsleitebene

Die *Prognose des untertägigen Lastgangs* ist erforderlich, um eine zielgerichtete und angemessene Steuerung des Lastgangs vornehmen zu können (vgl. Abschnitt 3.6). Werden ausschließlich die Ist-Werte des Lastgangs zur Steuerung herangezogen, verringert sich der zeitliche Eingriffshorizont und es können daraus teils unnötige Steuerungseingriffe sowie eine hohe „Unruhe“ in der Steuerung resultieren (WOLF 1987). Grundlage der Prognose ist eine Repräsentation des aktuellen und zu erwartenden Produktionszustands durch Auswertung der Planungs- sowie der Betriebsdaten. Durch Anreicherung des Produktionszustands um Planwerte des Leistungsbedarfs wird der Lastgang prognostiziert.

Die *energieorientierten Steuerungsverfahren* dienen anschließend der bewussten Einstellung des betrieblichen Lastgangs. Die aktuelle Auftragsituation und die zu erwartenden Lastgangabweichungen werden zu diesem Zweck visualisiert und ausgewertet, um dem Produktionsverantwortlichen angemessene laststeuernde Maßnahmen vorzuschlagen oder diese direkt automatisiert umzusetzen.

5.2.5 Feldebene

Während die Planungs- und die Steuerungsebene der Erfüllung organisatorischer Aufgaben dienen, umfasst die Feldebene die physikalischen Betriebsmittel, die an den Abläufen der Fabrik beteiligt sind. Weiterhin werden auch Energiespeicher als Betriebsmittel mit berücksichtigt. Stromspeicher treten zwar zum derzeitigen Zeitpunkt nur in sehr geringer Verbreitung auf, können jedoch langfristig einen wesentlichen Beitrag zur Lastflexibilisierung leisten (STERNER & STADLER 2014). Ebenso lassen sich Speicher für andere Energieformen, vor allem Wärmespeicher, auf diese Weise mit berücksichtigen.

Die Umsetzung der Referenzarchitektur erfordert eine Vernetzung der Fertigungsleitebene mit Betriebsmitteln aus unterschiedlichen und teils produktionsfernen Domänen, z. B. die Einbindung der TGA. Aus diesem Grund bietet sich die Verwendung eines plattformunabhängigen Protokolls an, über das die Schnittstelle zu heterogenen Betriebsmitteln realisiert werden kann. Eine Möglichkeit zur Umsetzung bietet die Verwendung des Kommunikationsprotokolls OPC Unified Architecture (OPC UA). Die Server-Client-Struktur von OPC UA erlaubt einen plattformunabhängigen und vor allem herstellerübergreifenden Informationsfluss (NEUGEBAUER et al. 2012, OSTERFELD et al. 2015).

5.2.6 Produktionsdatenbank

Die *Produktionsdatenbank* umfasst klassischerweise die von der Planung und Steuerung benötigten Stammdaten zu Aufträgen, Ressourcen, Personal oder Material. Dies beinhaltet beispielsweise die Arbeitspläne mitsamt den darin spezifizierten Vorgabezeiten für Arbeitsvorgänge oder die Kapazität einzelner Fertigungsmittel. Weiterhin wird in der Datenbank der aktuelle Produktionsablauf anhand von Bewegungsdaten, wie z. B. der einzelnen Zeitstempel der Ist-Zeiten oder Fortschrittmeldungen, abgebildet. Während die Planungsebene vorrangig die Stammdaten verwendet, bezieht die Fertigungsleitebene auch die Bewegungsdaten mit ein. In Ergänzung zu den Daten der konventionellen Planung und Steuerung umfasst die erweiterte Produktionsdatenbank auch Energiestamm- und -bewegungsdaten (SCHULTZ et al. 2016a). Hierzu ist das Datenmodell der Produktionsdatenbank entsprechend anzupassen.

5.3 Datenmodelle der energieorientierten Produktionssteuerung

5.3.1 Allgemeines

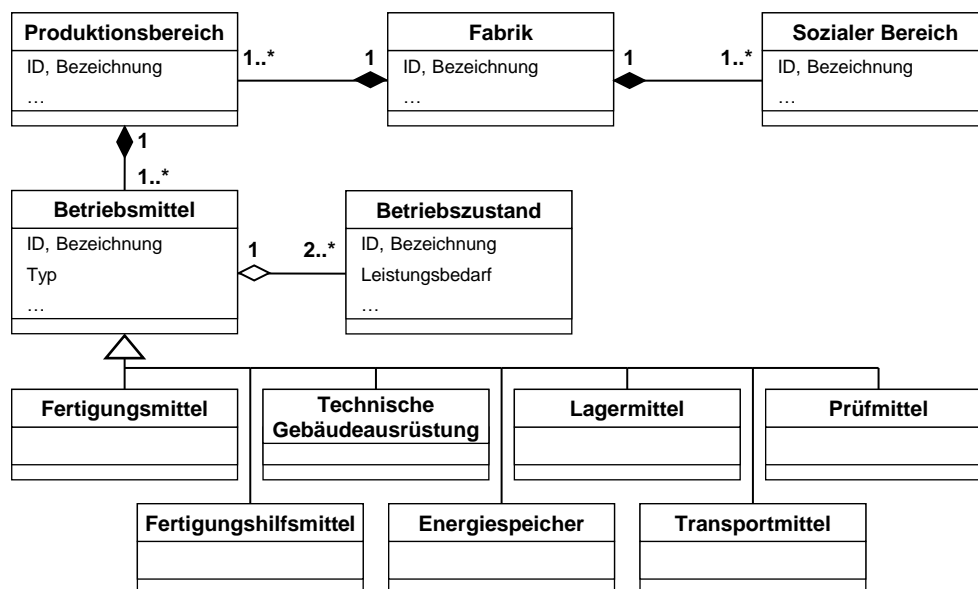
In Ergänzung zur Beschreibung der funktionalen Struktur der Architektur und den sich daraus ergebenden Schnittstellen zwischen den Teilsystemen, werden zusätzlich die zur Umsetzung der Steuerung erforderlichen Datenmodelle definiert. Anhand dieser Datenmodelle werden die Verfügbarkeit der benötigten Informationen und deren strukturierte Verwaltung bei der Implementierung sichergestellt. Zur informationstechnischen Abbildung des Datenmodells bietet sich die Darstellung nach der Unified Modelling Language (UML) an. Die UML-Notation stellt die datentechnischen Zusammenhänge in abstrahierter Form dar und weist aufgrund der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten eine hohe Akzeptanz in der Softwaretechnik auf (CZUCHRA 2010, RUMPE 2011). Das Datenmodell umfasst die folgenden Bestandteile:

- Das *Fabrikmodell*, in dem die Bestandteile der Produktionsumgebung beschrieben sind, die grundsätzlich zum Lastgang beitragen
- Das *Belegungsplanmodell*, das den geplanten und den aktuellen Produktionszustand widerspiegelt
- Das *Energiemodell*, in dem der Energiebezug sowie der Energiebedarf der Fabrik abgebildet ist

5.3.2 Fabrikmodell

Das Fabrikmodell fasst die Struktur der betrieblichen Energieverbraucher innerhalb der Produktionsbereiche zusammen, die zur Bearbeitung der Aufträge erforderlich und letztlich für die Realisierung des Lastgangs verantwortlich sind. Das Gesamtmodell ist in Abbildung 32 dargestellt.

Die Fabrik setzt sich vorrangig aus Produktionsbereichen zusammen, die wiederum unterschiedliche Betriebsmittel umfassen (KARA et al. 2011, MÜLLER et al. 2013). Die Betriebsmittel können nach VDI (2815) unmittelbar dem Produktionsprozess dienen (*Fertigungsmittel*), die Funktionsausführung der Fertigungsmittel ermöglichen (*Fertigungshilfsmittel*) oder für die Aufrechterhaltung des allgemeinen Fabrikbetriebs erforderlich sein (*Technische Gebäudeausrüstung*). Weiterhin werden Betriebsmittel beschrieben, mit denen Gegenstände oder Erzeugnisse gelagert (*Lagermittel*), transportiert (*Fördermittel*) oder hinsichtlich ihrer jeweiligen Anforderungen geprüft werden (*Prüfmittel*). Zwischenspeicher, beispielsweise für Strom oder Wärme, die einem einzelnen Produktionsbereich zugeordnet und von der Steuerung adressiert werden können, gelten in diesem Kontext ebenfalls als Betriebsmittel (*Energiespeicher*).



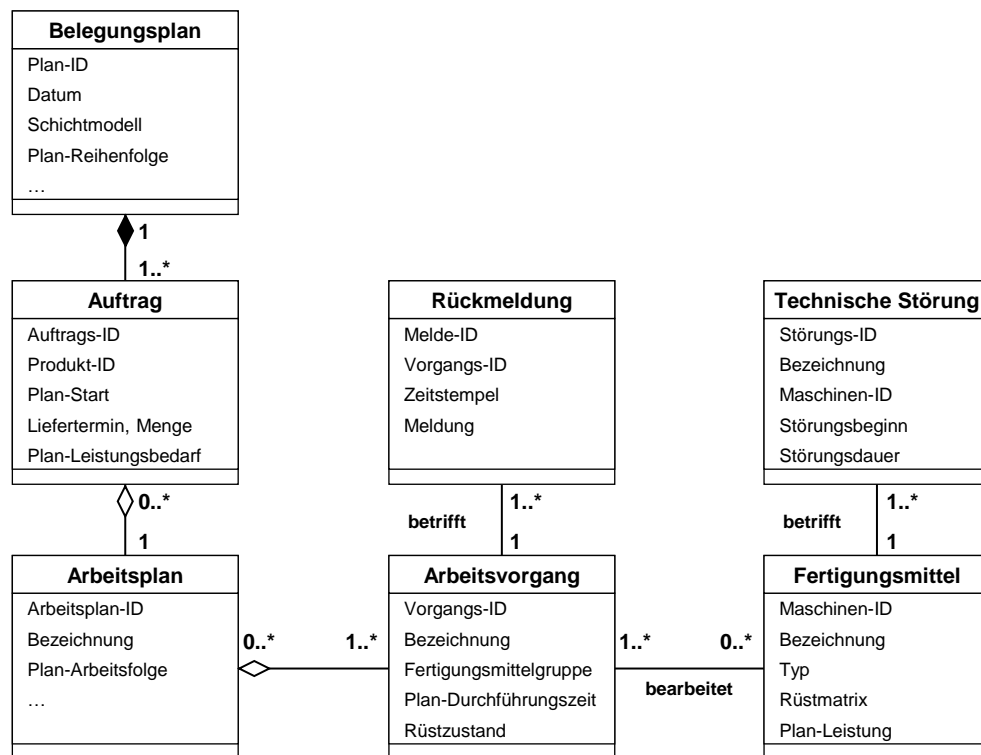
Legende: : Klasse : Komposition : Generalisierung

Abbildung 32: Darstellung des Fabrikmodells in UML-Notation

In Abhängigkeit der Steuerungsvorgaben nehmen die Betriebsmittel im Zeitverlauf unterschiedliche Betriebszustände ein, die jeweils einem spezifischen Leistungsbedarf assoziiert sind (vgl. Abschnitt 3.4.3). Diese Eigenschaft wird an alle Arten von Betriebsmitteln vererbt.

5.3.3 Belegungsplanmodell

Die Produktionsplanung erzeugt mit der Belegungsplanung und dem Fahrplan zwei interdependente Arten von Vorgabesätzen, die für einen definierten Zeitraum durch die Produktionssteuerung zu erfüllen sind. Der Belegungsplan fasst die Produktionsvorgaben zusammen und enthält hierzu in erster Linie die zu erfüllenden Aufträge. Zur Visualisierung der Belegungsplanung wird vielfach die Gantt-Darstellung aus Ressourcensicht verwendet. Die gesamte Datenstruktur des Belegungsplans ist in Abbildung 33 zusammengefasst.



Legende: : Klasse : Komposition : Aggregation
 : Aufträge

Abbildung 33: Darstellung des Belegungsplanmodells in UML-Notation

Ein *Auftrag* ist spezifiziert über die Art und die Menge des herzustellenden Produktes sowie des im Zuge der Produktionsplanung zugewiesenen Liefer- und Plan-Starttermins. Der produktspezifische Herstellungsablauf ist im *Arbeitsplan* anhand einer Reihenfolge von *Arbeitsvorgängen* definiert. Die Durchführung eines Arbeitsvorgangs muss auf einem speziellen Typ von Fertigungsmittel vorgenommen werden und resultiert dort in der Auslösung eines vorgangsspezifischen Betriebszustandes. Aus der Durchführungszeit des Arbeitsvorgangs und dem Leistungsbedarf des Betriebszustandes des Fertigungsmittels ergibt sich letztlich der spezifische Energiebedarf. Anhand von *Rückmeldungen*, wie z. B. Meldungen zu Beginn oder Fertigstellung eines Arbeitsvorgangs, sowie *Störungsmeldungen* der Fertigungsmittel, wird der aktuelle Produktionszustand im Belegungsplan abgebildet (ENGELHARDT 2015, NIEHUES 2017).

5.3.4 Energiemodell

Ergänzend zu den Produktionsvorgaben wird im Rahmen der Energiebezugsplanung ein *Fahrplan* für die Bereitstellung des elektrischen Stroms erzeugt. Der gesamte Produktionstag wird dazu in eine Abfolge definierter Zeitintervalle zerlegt und für jede dieser *Zeitscheiben* der Umfang der verfügbaren elektrischen Energie festgelegt. Die verfügbare Energie ergibt sich aus der Summation von Eigenerzeugung und Fremdbezug aus dem öffentlichen Netz. Anstelle einer Energiemenge wird dabei eine durchschnittliche Plan-Leistung für jedes Intervall angegeben, aus deren zeitlichem Integral sich die elektrische Arbeit errechnen lässt. Begründet in der aktuellen Ausgestaltung des deutschen Strommarktes liegt die Granularität dieser Intervalle beispielsweise bei 15 Minuten. Der Fahrplan bildet somit die Bereitstellungsseite des *Energiemodells* (vgl. Abbildung 34).

In analoger Weise lässt sich auch die Energiebedarfsseite darstellen. Der *Lastgang* als Zusammenfassung des gesamten betrieblichen Leistungsbedarfs lässt sich ebenfalls als Reihe von *Zeitscheiben* repräsentieren, deren Granularität sich nach dem Abrechnungsintervall definiert (z. B. 15 Minuten). Der durchschnittliche Leistungsbedarf für jede Zeitscheibe ergibt sich aus der Summe der Bedarfe der einzelnen Fabrikbereiche, die sich jeweils wiederum auf die zustandsabhängigen Leistungsaufnahmen der beteiligten *Betriebsmittel* zurückführen lassen (vgl. Abbildung 34). Für den Fall, dass auch Lastspitzen in der Produktionssteuerung berücksichtigt werden sollen, sind anstelle der durchschnittlichen Bedarfe die Momentanwerte der Leistungsaufnahme zu verwenden. Dies liegt jedoch nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit.

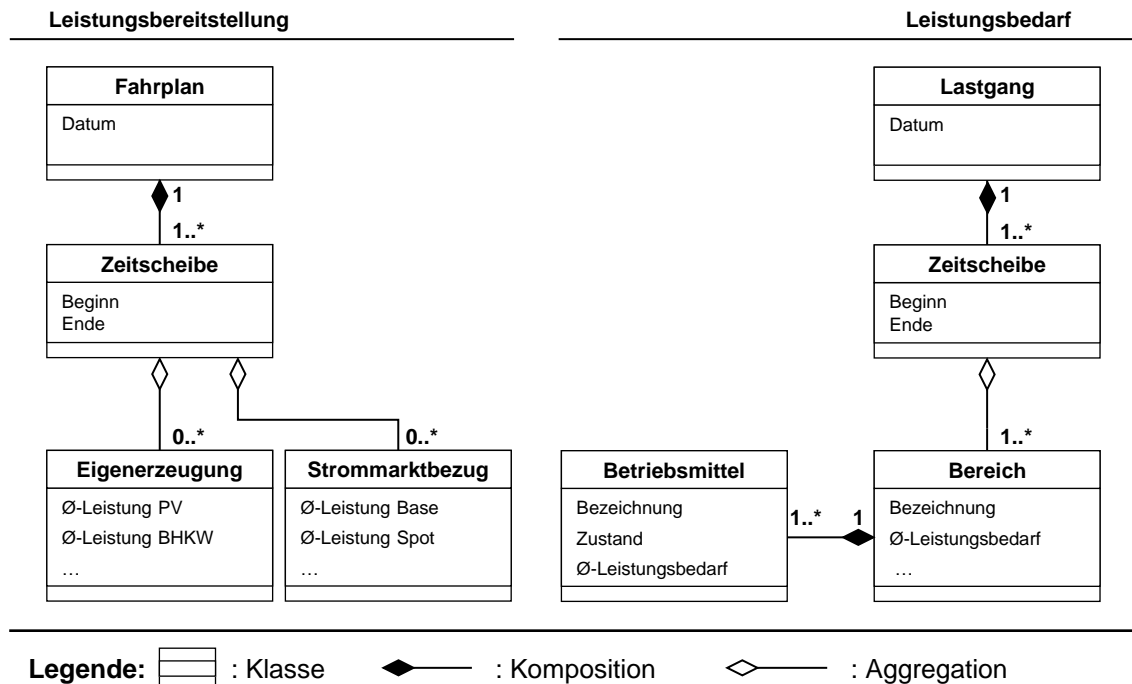


Abbildung 34: Darstellung des Energiemodells der Produktionssteuerung in UML-Notation

5.4 Fazit

In diesem Kapitel sind die informationstechnischen Grundlagen der energieorientierten PPS definiert worden. Zur Beschreibung der funktionalen Zusammenhänge ist zunächst eine Referenzarchitektur für die energieorientierte PPS aufgestellt worden (vgl. Abschnitt 5.2), auf deren Basis anschließend die erforderlichen Datenstrukturen abgeleitet wurden (vgl. Abschnitt 5.3).

Ausgehend von einer Betrachtung des Zusammenwirkens zwischen der PPS und der betrieblichen Energieversorgung lässt sich der erforderliche Funktionsumfang der Fertigungsleitebene ableiten, die im Wesentlichen die Produktionssteuerung umfasst. Für die funktionale Einteilung sind dabei insbesondere die unterschiedlichen Zeithorizonte des Strombezugs ausschlaggebend. Diesbezüglich wird die Produktionssteuerung auf den kurzfristigen Horizont des Spotmarktes, d. h. eines Produktionstags, fokussiert (vgl. Abschnitt 5.2.2). Für den Austausch von produktions- und energietechnischen Sollvorgaben zwischen der Planung und der Fertigungsleitebene sind ein Belegungsplan und ein Fahrplan definiert worden, den die Steuerung im Produktionsbetrieb einzuhalten hat.

Weiterhin sind die Aufgaben, die aus der funktionalen Aufteilung für die Unternehmens- und die Fertigungsleitebene resultieren, detailliert beschrieben und in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 5600 grafisch dargestellt worden (vgl. Abschnitt 5.2.3 und 5.2.4).

Darauf aufbauend sind die erforderlichen Datenstrukturen zur Umsetzung des Funktionsumfangs entwickelt worden. Die Datenmodelle umfassen dabei zunächst ein Fabrikmodell zur Strukturierung der betrieblichen Energieverbraucher, die von der Steuerung adressiert werden (vgl. Abschnitt 5.3.2), und ein Belegungsplanmodell zur Abbildung der Produktionsvorgaben sowie des aktuellen Produktionszustands (vgl. Abschnitt 5.3.3). Ergänzend werden in einem Energiemodell die Leistungsbereitstellung und der Leistungsbedarf der Produktion abgebildet (vgl. Abschnitt 5.3.4). Um gemäß dem Referenzcharakter die Übertragbarkeit der Modelle zu gewährleisten, sind die Datenstrukturen in der UML-Notation verfasst.

Die entwickelte Referenzarchitektur ist somit unabhängig von einer konkreten Implementierung definiert worden. Auf dieser Basis kann eine Integration der energieorientierten Produktionssteuerung in die innerbetrieblichen Informationssysteme der PPS vorgenommen werden. Die dargestellte Referenzarchitektur stellt somit in strukturierter Form die benötigten Daten für die Bedarfsüberwachung (vgl. Kapitel 6) und für die Steuerungsverfahren (vgl. Kapitel 7) bereit. In Abschnitt 8.2 erfolgt schließlich die Umsetzung der Referenzarchitektur in einer konkreten Softwarelösung.

6 Bedarfsüberwachung

6.1 Übersicht

Das Ziel des Elements *Bedarfsüberwachung* ist es, Abweichungen vom Lastgang zu ermitteln, die einen Eingriff der Produktionssteuerung erforderlich machen. Zu diesem Zweck wird im folgenden Kapitel ein Verfahren zur Überwachung des Energiebedarfs in der Produktionssteuerung entwickelt. Der Fokus des Verfahrens liegt auf der Identifikation von Lastgangabweichungen gegenüber dem Fahrplan und deren monetärer Bewertung. Als Grundlage der Bedarfsüberwachung werden zunächst potenzielle Lastgangabweichungen klassifiziert und mit den ihnen zugrundeliegenden Produktionsstörungen in Verbindung gebracht (vgl. Abschnitt 6.2). Darauf aufbauend wird die Verknüpfung des anhand von Betriebsdaten aktualisierten Produktionszustands mit dem betrieblichen Leistungsbedarf aufgezeigt und auf dieser Basis eine Methode zur Lastgangprognose in der Produktionssteuerung entwickelt (vgl. Abschnitt 6.3). Durch einen Abgleich der Prognose mit den Planvorgaben werden die zu erwartenden Abweichungen ermittelt. Zu deren monetärer Bewertung wird ein Modell für die kurzfristigen Stromkosten aufgestellt (vgl. Abschnitt 6.4).

6.2 Klassifizierung lastgangrelevanter Störungen

Störungen, wie z. B. Maschinenausfälle, fehlendes Material oder Eilaufträge, sind bei der Durchführung von Produktionsprozessen im Allgemeinen unvermeidbar und haben zur Folge, dass Produktionspläne nur eine befristete Gültigkeit aufweisen (WIENDAHL et al. 2005). Aus diesem Grund ist zur Sicherung der logistischen Ziele eines Unternehmens eine Produktionssteuerung erforderlich, die reaktiv in den Ablauf eingreift und die Abweichungen zwischen Plan- und Ist-Werten minimiert (LÖDDING 2008). Eine *Störung* wird in der Regel durch eine externe Störgröße hervorgerufen und manifestiert sich als Abweichung zwischen dem geplanten Soll- und dem Ist-Zustand. Nach SCHWARTZ (2004) weisen Störungen folgende Charakteristika auf:

- Eine Störung tritt zufällig und unbeabsichtigt auf. Daher ist deren Vorhersage gar nicht oder nur mit hohem Aufwand möglich.
- Eine Störung ist zeitlich befristet und klar abgrenzbar.
- Mindestens ein Unternehmensprozess wird durch die Störung beeinflusst.

6 Bedarfsüberwachung

Produktionsstörungen haben häufig eine terminliche oder ressourcenbezogene Abweichung gegenüber dem Produktionsplan zur Folge. Typische Beispiele für derartige Störung sind die Verzögerung eines Arbeitsvorgangs oder der Ausfall eines Fertigungsmittels (HEIL 1995, WELLER 2003, SCHWARTZ 2004, FISCHÄDER 2009, FISCHER 2009). Aufgrund der unmittelbaren Kopplung des Energiebedarfs an die Fertigungsmittel (vgl. Abschnitt 2.2.2), schlagen sich Abweichungen aufgrund von Störungen folglich auch auf den Lastgang nieder. Die Auswirkungen terminlicher oder ressourcenbezogener Abweichungen auf den Lastgang lassen sich grundsätzlich in zwei Dimensionen unterscheiden. So kann sich der Betrag der aufgenommenen Leistung durch die Ressource ändern (Leistungsabweichung) oder es kann sich der Zeitpunkt der Leistungsaufnahme verschieben (Terminabweichung). Wie das Beispiel in Abbildung 35 zeigt, resultieren beide Varianten letztlich in einer Differenz zwischen den energiebezogenen Plan- und den Ist-Werten.

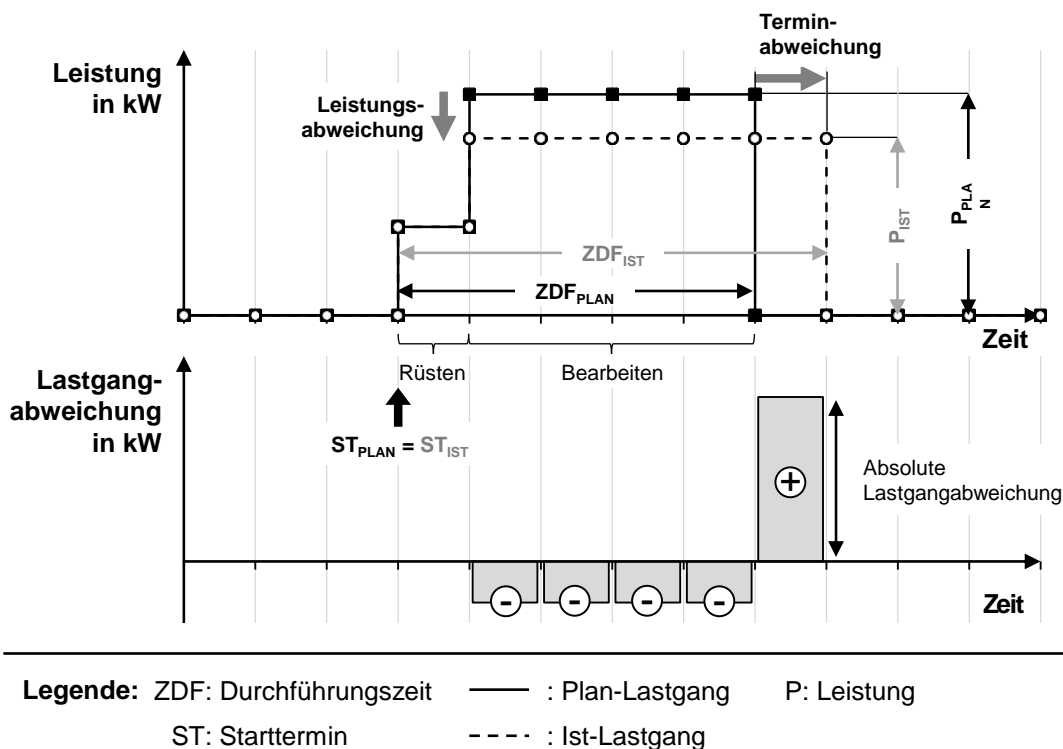


Abbildung 35: Abweichung zwischen Plan- und Ist-Lastgang infolge von Störungen

Die Leistungsabweichungen treten prinzipiell in zwei Ausprägungen auf:

- $P_{IST} > P_{PLAN}$: Der Betrag der Leistungsaufnahme übersteigt den Plan-Wert im betrachteten Intervall.

- $P_{IST} < P_{PLAN}$: Der Betrag der Leistungsaufnahme liegt unter dem Plan-Wert im betrachteten Intervall.

Terminabweichungen können hingegen danach unterschieden werden, ob diese in der Durchführungszeit (ZDF) und im Starttermin (ST) begründet liegen. Folgende Ausprägungen sind möglich:

- $ZDF_{IST} > ZDF_{PLAN}$: Die tatsächliche Durchführungszeit ist länger als die Plan-Durchführungszeit.
- $ZDF_{IST} < ZDF_{PLAN}$: Die tatsächliche Durchführungszeit ist kürzer als die Plan-Durchführungszeit.
- $ST_{IST} > ST_{PLAN}$: Die Durchführung des Vorgangs beginnt verspätet.
- $ST_{IST} < ST_{PLAN}$: Die Durchführung des Vorgangs beginnt frühzeitig.

Leistungs- und Terminabweichungen können sowohl separat voneinander als auch in Kombination auftreten. So können beispielsweise aus einem Ressourcenwechsel gegenüber dem Belegungsplan gleichzeitig eine Verlängerung der Durchführungszeit so wie eine Reduzierung der Leistungsaufnahme resultieren (vgl. Abbildung 35).

Infolge der Diversität möglicher Störungen und deren Auswirkungen im Produktionsablauf existiert in der Literatur des Störungsmanagements eine Vielzahl von Klassifizierungsansätzen. Durch die Klassifizierung wird eine Abstraktion von konkreten Störungen und somit ein strukturierter Überblick über Ursachen und Auswirkungen geschaffen (HEIL 1995). Als Kriterien werden dabei beispielsweise der Ort des Auftretens einer Störung, die Auftretenswahrscheinlichkeit oder die Intensität der Auswirkungen herangezogen (GREVE 1970, SCHWARTZ 2004). Für die folgende Betrachtung wird die Einteilung von SCHWARTZ (2004) verwendet, bei der Störungen dem jeweils betroffenen Produktionsfaktor zugeordnet und um informations- sowie auftragsbedingte Störungen ergänzt werden. Zu diesem Zweck werden in der Literatur beispielhafte Störungen recherchiert und analysiert, inwieweit diese sich auf den Bearbeitungstermin oder die Leistungsaufnahme auswirken (vgl. Tabelle 4). In analoger Weise können Störungen, die in diesem Schema noch nicht erfasst sind, ergänzt werden. Ausgehend von einer Störung ist es somit möglich, über deren termin- und ressourcenbezogene Auswirkung auf die resultierende Lastgangabweichung zurückzuschließen.

6 Bedarfsüberwachung

Tabelle 4: Gegenüberstellung von Störungen und resultierenden Abweichungen²²

		Terminabweichung				Leistungsabweichung				
		$ZDF_{Ist} > ZDF_{Plan}$	$ZDF_{Ist} < ZDF_{Plan}$	$ST_{Ist} > ST_{Plan}$	$ST_{Ist} < ST_{Plan}$	$P_{Ist} > P_{Plan}$	$P_{Ist} < P_{Plan}$			
Störungsursache	Betriebsmittelbedingt	Unterbrechung der Leistungserstellung auf Betriebsmittel		●					●	
		Inbetriebnahme von Betriebsmittel nicht möglich				●				
		höhere Leistungsfähigkeit des Betriebsmittels			●					●
		verminderte Leistungsfähigkeit des Betriebsmittels		●				●		
		Mehrarbeit/Ausschuss durch Mängel an Betriebsmittel		●						
	Personalbedingt	(temporäre) Abwesenheit vom Arbeitsplatz		●		●				
		Leistungsfähigkeit des Personals (z. B. bei Rüstvorgängen)	erhöht, schneller		●					
			vermindert, langsamer	●						
		Mehrarbeit/Ausschuss durch Fehler des Personals		●						
	Materialbedingt	Material (temporär) nicht verfügbar				●				
		Material besitzt unzureichende Qualität	schwerer zu bearbeiten	●				●		
			leichter zu bearbeiten		●					●
	Informationsbedingt	fehlende oder fehlerhafte Planvorgaben für...	ZDF	●	●					
			Leistungsaufnahme					●	●	
			Material	●	●			●	●	
			Personal	●	●	●	●			
			Maschinenbelegung			●	●			
	Auftragsbedingt	obsolet gewordene Aufträge/Vorgaben								●
		geänderte bzw. zusätzlich zu berücksichtigende Vorgaben	Terminlich			●	●			
			Arbeitsvorgänge	●	●			●	●	

Legende: ZDF: Durchführungszeit ST: Starttermin P: Leistung

²² Die zugrundeliegenden Ansätze finden sich bei SIMON (1994), HEIL (1995) und SCHWARTZ (2004).

6.2 Klassifizierung lastgangrelevanter Störungen

In Ergänzung zu den reinen Produktionsstörungen kann vor dem Hintergrund der flexiblen Stromversorgung eine zusätzliche Kategorie von Störungen definiert werden, die direkt in der Energiebereitstellung (P_{ERZ}) begründet sind. Diese Störungskategorie betrifft einerseits die Prognose der Eigenerzeugung, die von den Realwerten abweichen kann, und andererseits die Regelleistungsabrufe, die zwar geplant sind, deren Erfüllung aber dennoch eine Abweichung im Produktionsprozess und folglich eine Störung verursachen. Die Störungen treten somit in zwei Ausprägungen auf:

- $P_{ERZ,IST} > P_{ERZ,PLAN}$: Der Betrag der erzeugerseitig bereitgestellten Leistung liegt höher als der Fahrplan.
- $P_{ERZ,IST} < P_{ERZ,PLAN}$: Der Betrag der erzeugerseitig bereitgestellten Leistung liegt niedriger als der Fahrplan.

Demzufolge lassen sich für die energieorientierte Produktionssteuerung die in Abbildung 36 dargestellten Störungskategorien zusammenfassen, aus denen Differenzen zwischen dem Ist-Lastgang und dem Fahrplan resultieren können. Auf der einen Seite wirken sich Produktionsstörungen über terminliche und ressourcenbezogene Abweichungen direkt auf den Ist-Lastgang aus und auf der anderen Seite nehmen die Störungen der Energiebereitstellung Einfluss auf den Fahrplan. Die zentrale Zielstellung der energieorientierten Produktionssteuerung ist es, auf die resultierenden Lastgangabweichungen zu reagieren und somit eine Störungsfolgeminimierung zu bewirken²³.

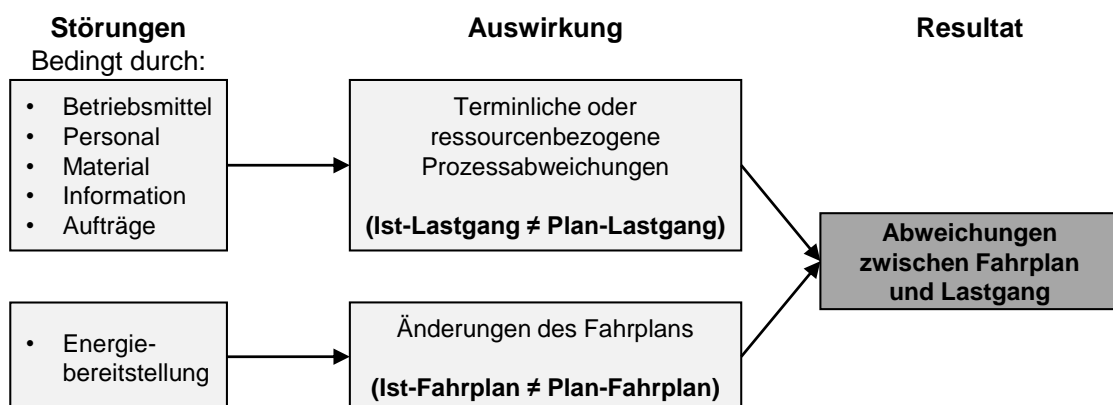


Abbildung 36: Zusammenhang zwischen Störungen und Lastgangabweichungen

²³ Die Behandlung von Produktionsstörungen liegt nicht im Betrachtungsfokus der vorliegenden Arbeit. Die entwickelte Produktionssteuerung kann jedoch mit Systemen des Störungsmanagements kombiniert werden. Systeme des Störungsmanagements finden sich beispielsweise bei (SIMON 1994, HEIL 1995, SCHWARTZ 2004, OSTGATHE 2012, GENC 2015, NIEHUES 2017).

6.3 Entwicklung einer Lastgangprognose

6.3.1 Allgemeines

Der Umfang, in dem die Produktionssteuerung durch Lastanpassungen auf Abweichungen reagieren kann, ist maßgeblich von der Vorwarnzeit bis zur Einleitung der Steuerungsmaßnahme abhängig (GRISMAJER & SELIGER 2012). Je geringer diese Zeitspanne ist, desto geringer ist in der Regel der Umfang verfügbarer Steuerungsmaßnahmen (FISCHER 2009). Darüber hinaus ist das Gesamtpotenzial eines Unternehmens für Lastanpassungen im Allgemeinen begrenzt, da eine einmal aktivierte Maßnahme im weiteren Zeitverlauf möglicherweise nicht mehr zur Verfügung steht. Kurzfristige Entscheidungen im Zeitbereich weniger Minuten können somit suboptimal sein und mittelfristig das Potenzial für Lastanpassung in Perioden höherer Strompreise reduzieren. Es bietet sich daher an, Lastgangabweichungen nicht lokal und über wenige Minuten zu betrachten, sondern den gesamten Zeithorizont, d. h. den jeweils verbleibenden Produktionstag, in die Steuerungsentscheidungen einzubeziehen (SCHULTZ et al. 2016b). Um einen rechtzeitigen und zielgerichteten Eingriff der Produktionssteuerung in den Leistungsbedarf des Produktionssystems vornehmen zu können, ist ein vorausschauendes Verfahren zur Lastgangprognose erforderlich, das den gesamten Entscheidungshorizont abdeckt. Andernfalls besteht die Gefahr, dass reaktive Steuerungseingriffe entweder nicht zeitgerecht innerhalb der relevanten 15-minütigen Abrechnungsintervalle erfolgen oder die eingeleitete Reaktion in ihrem Umfang zu groß bzw. zu klein gewählt wird.

Da der Leistungsbedarf eines Unternehmens durch dessen prozessnahe und prozessferne Betriebsmittel verursacht wird, bietet sich als Grundlage der Lastgangprognose die ressourcenbezogene Perspektive des Belegungsplans an. Dieses Vorgehen eröffnet insbesondere die Möglichkeit, dass sich durch Störungen verursachte Abweichungen der Auftragstermine oder Änderungen der Betriebsmittel über eine Aktualisierung des Belegungsplans anhand von Rückmeldedaten abbilden lassen. Die Belegungsaktualisierung stellt somit ein geeignetes Vorgehen dar, Abweichungen im Ist-Lastgang zu identifizieren. Infolgedessen ist das Prognoseverfahren eng mit der Überwachung des Produktionsprozesses verknüpft, d. h. der zeitnahen Aufnahme und Auswertung von Betriebs- und Maschinendaten (SCHULTZ et al. 2016b). Der Fahrplan wird hingegen von Störungen in der Energiebereitstellung beeinflusst und muss separat aktualisiert werden.

6.3.2 Beschreibung der Produktionsüberwachung

Der Belegungsplan stellt durch die zeitliche Zuordnung von Aufträgen zu Fertigungsmitteln das zentrale Beschreibungselement des untertägigen Produktionsablaufs dar (vgl. Abschnitt 5.3.3). Der initiale Belegungsplan umfasst die Soll-Vorgaben der Planung und repräsentiert den tatsächlichen Fortschritt dementsprechend nur solange keine Störungen oder Änderungen aufgetreten sind. Um die Gültigkeit des Belegungsplans aufrecht zu erhalten, ist es daher erforderlich, die Planvorgaben auf Basis einer Betriebsdatenerfassung zyklisch oder ereignisgesteuert zu revidieren (KURBEL 2005, FISCHER 2009, NIEHUES 2017). Den Ablauf der Datenerfassung zeigt Abbildung 37.

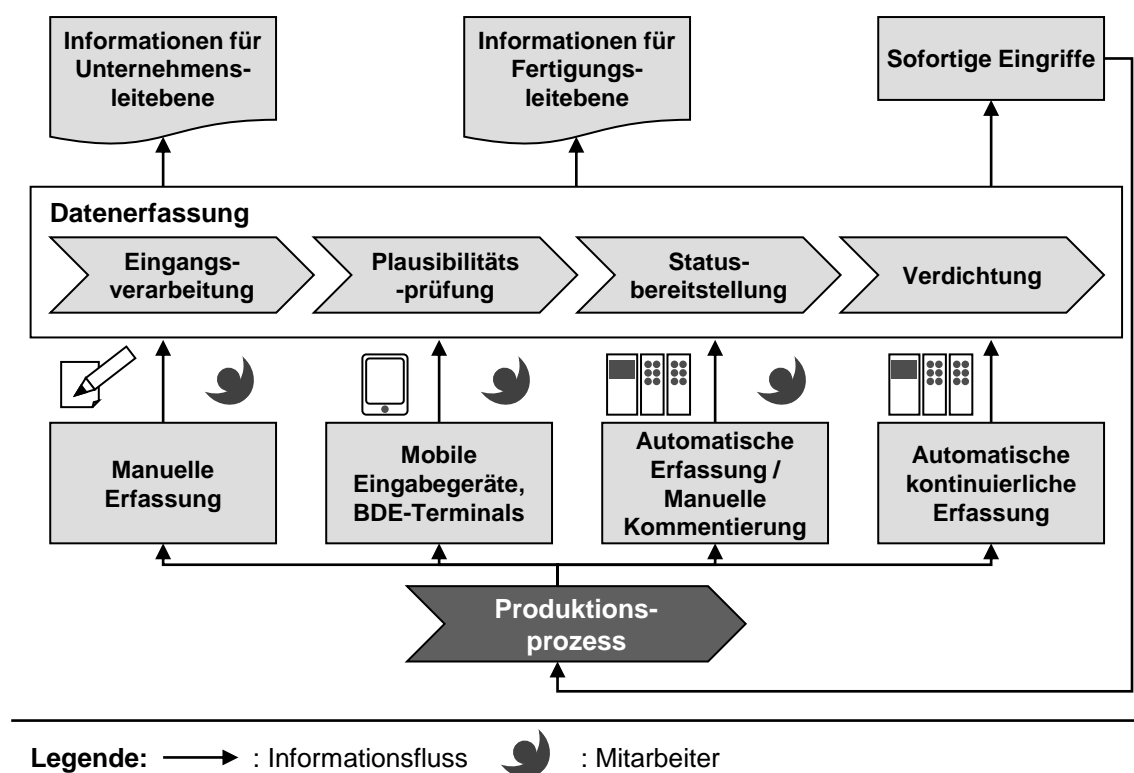


Abbildung 37: Ablauf der Datenerfassung im Kontext eines MES
 in Anlehnung an KÖHRMANN (2000), VDI (5600) und
 WIENDAHL & HEGENSCHIEDT (2012)

Die Betriebsdaten bezeichnen dabei alle auftrags-, personen- oder betriebsmittelbezogenen Daten, die während des Produktionsprozesses anfallen, wie z. B. benötigte Mengen und Zeiten, Materialbewegungen oder Meldungen zu Ausschuss (ROSCHMANN 1979, KURBEL 2005, KLETTI 2006). Diese Daten werden im Allgemeinen gemeinsam mit den Maschinendaten, d. h. von Anlagen selbstständig erhobenen Sensorwerten oder Prozessparametern, über eine BDE

6 Bedarfsüberwachung

aufgenommen und ausgewertet. Gemäß der VDI-Richtlinie 5600 kann die Datenerfassung aus der Feldebene auf Basis manueller, halb-automatischer und automatischer Rückmeldungen erfolgen (vgl. Abbildung 37). Je höher der Automatisierungsgrad liegt, desto geringer fällt der nachfolgende Aufwand für die Auswertung aus. Im Zuge der Datenerfassung bieten produktionsnahe Informationssysteme, wie beispielsweise ein MES, die Möglichkeit, Statusveränderung bezogen auf den Auftrag, die Betriebsmittel oder die Materialien bereitzustellen (VDI 5600). Automatisierte BDE-Systeme nehmen in der Regel eine Vielzahl von Rückmeldedaten aus dem Produktionsbetrieb auf und übermitteln diese direkt an die übergeordnete PPS-Software (ROSCHMANN 1979). Insbesondere im Zuge aktueller Entwicklungen in dem Bereich der Cyber-Physischen Systeme und der zunehmenden Durchdringung der Produktion durch Informationssysteme steigt die Anzahl und die Granularität der verarbeiteten Daten (ANDELFINGER & HÄNISCH 2017).

Vor dem Hintergrund der Lastgangprognose beschränkt sich die Betrachtung auf die Betriebsdaten, die sich unmittelbar auf den Belegungsplan auswirken (vgl. Tabelle 5). Dies umfasst vorrangig organisatorische Daten, die den Gesamtzeitraum definieren, der zur Bearbeitung von Aufträgen zur Verfügung steht, sowie auftragsbezogene Daten hinsichtlich des Bearbeitungsfortschritts. Der Fortschritt wird dabei im Allgemeinen auf einzelne Arbeitsvorgänge (AVO) heruntergebrochen. Weitere Daten zu den Betriebsmitteln, dem Personal, dem Material und den gefertigten Produkten geben Aufschluss über mögliche Unterbrechungen oder das Erfordernis, einzelne Produktionsschritte zu wiederholen.

Tabelle 5: Kategorisierung relevanter Betriebsdaten

Betriebsdaten			
Ebene	Kategorie	Bezeichnung	Daten
Fertigungsleitebene	Organisatorisch	Schichtanfang	Zeitpunkt
		Schichtende	Zeitpunkt
		Überstunden	Zeitpunkt, Dauer
Arbeitssystem	Auftragsbezogen	Ist-Beginn, AVO	ID _{Auftrag} , Zeitstempel
		Ist-Fertigstellung, AVO	ID _{Auftrag} , Zeitstempel
	Betriebsmittelbezogen	Technische Störung	ID _{Maschine} , Zeitstempel, Dauer
		Ist-Leistungsaufnahme	ID _{Maschine} , Zeitstempel, Leistung
	Personalbezogen	Arbeitsunterbrechung	ID _{Mitarbeiter} , Zeitstempel, Dauer
	Materialbezogen	Fehlmenge	ID _{Material} , Menge
	Produktbezogen	Qualität	ID _{Auftrag} , i.O./n.i.O.

Rückmeldungen, welche die An- bzw. Abmeldung von Aufträgen, Störungen oder Prozessunterbrechungen betreffen, werden durch eine Verschiebung bzw. Verlängerung des entsprechenden Auftrags in der Belegungsplanung abgebildet. Beim Auftritt von Störungen kann dabei eine optionale Störungsbehandlung berücksichtigt werden. Für den Fall, dass keine zeitlichen Puffer zwischen den Aufträgen bestehen, ist es erforderlich, jeweils das gesamte Auftragsnetz zu verschieben (vgl. Abbildung 38). Dabei zeigt sich, dass neben der eigentlichen Bearbeitung noch weitere Zustände auftreten (z. B. organisatorisch oder technisch bedingte Wartezeiten). Je nach Auslastung und Zuverlässigkeit des Fertigungsmittels können diese Nebenzeiten einen erheblichen Anteil der gesamten Nutzungszeit ausmachen (WIENDAHL 2010, ARNOLD et al. 2011). Die Anweisung von Überstunden, beispielsweise zur Kompensation eines Produktionsrückstands infolge von Unterbrechungen, resultiert darüber hinaus in einer zusätzlichen Anpassung des Schichtplans (vgl. Abbildung 38).

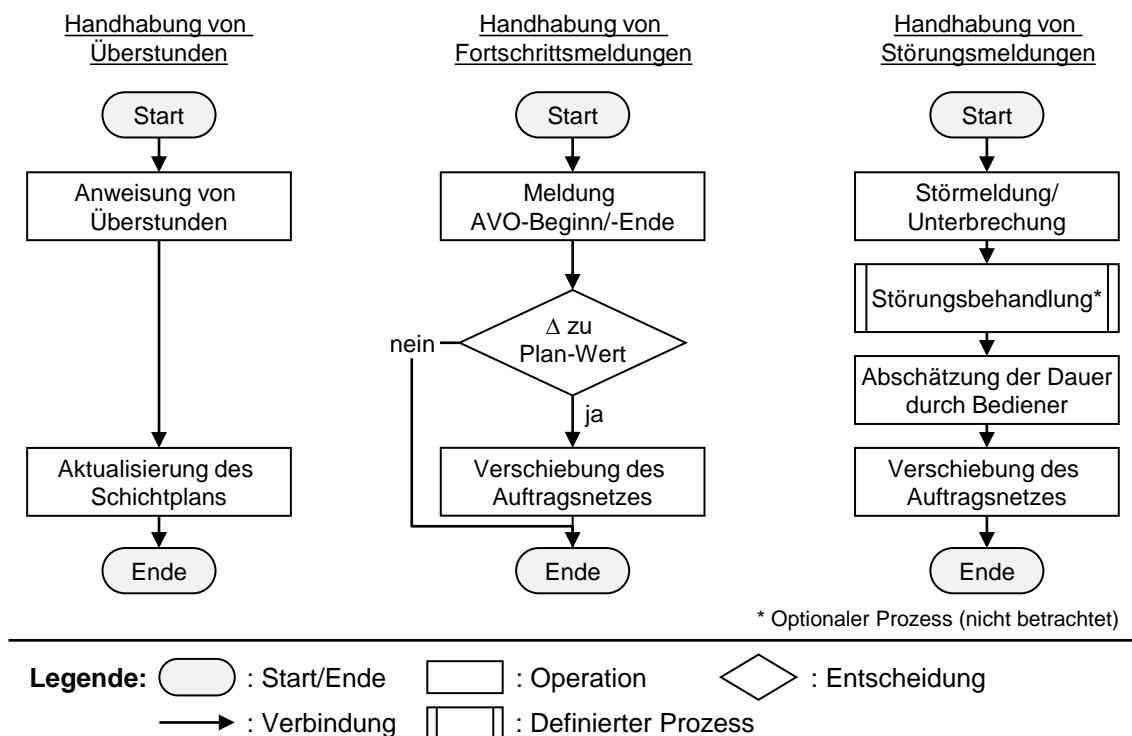


Abbildung 38: Vorgehen zur Aktualisierung von Schichtplan und Auftragsnetz

Auf dieser Basis zeigt Abbildung 39 exemplarische Rückmeldungen, die von der Betriebsdatenerfassung verarbeitet werden, um das Abbild des Produktionszustands zu aktualisieren. Durch die fortlaufende Auswertung der Betriebsdaten kann somit sichergestellt werden, dass der Belegungsplan die aktuelle Situation des Produktionssystems widerspiegelt.

6 Bedarfsüberwachung

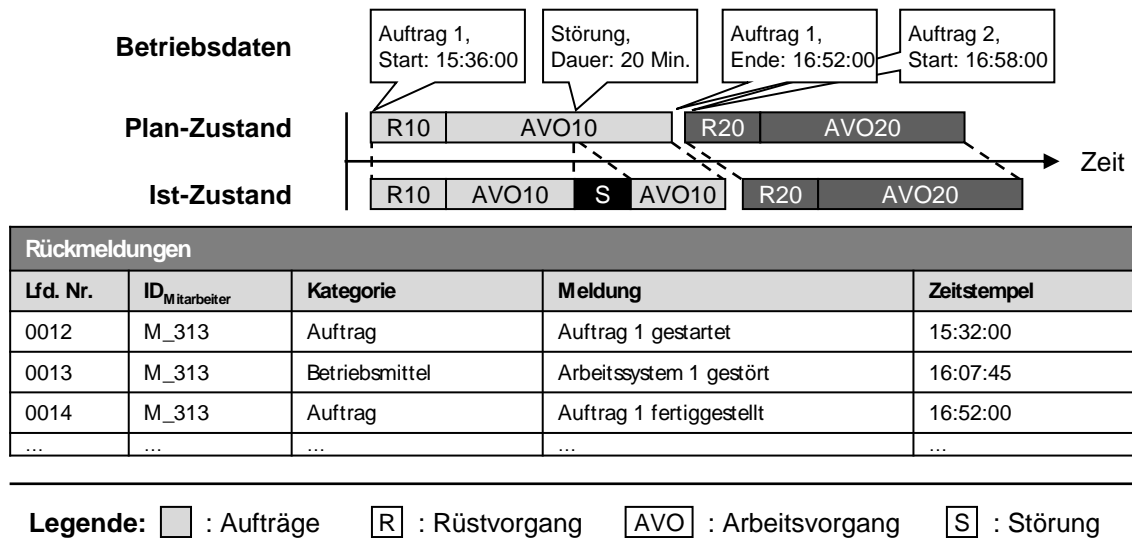


Abbildung 39: Abbildung des Ist-Fortschritts eines Fertigungsmittels auf Basis von Betriebsdaten

6.3.3 Analyse des betrieblichen Leistungsbedarfs

Der Lastgang der Fabrik setzt sich aus den Einzellastgängen der verschiedenen Betriebsmittel zusammen, sodass diese jeweils separat prognostiziert und aufsummiert werden können. Wie in Abschnitt 3.4 vorgestellt, existieren unterschiedliche Ansätze zur Modellierung des Leistungsbedarfs von Betriebsmitteln. Für die Auswahl eines Verfahrens ist dabei vorrangig entscheidend, ob die zur Anwendung des Modellierungsansatzes erforderlichen Informationen in der Produktionssteuerung verfügbar sind. Dabei muss grundsätzlich zwischen den Fertigungsmitteln des Produktionsprozesses, deren Hilfsprozessen und der TGA unterschieden werden (vgl. Abbildung 40). Zu den Hilfsprozessen zählt beispielsweise der Materialtransport.

Der Lastgang eines *Fertigungsmittels* ist maßgeblich davon abhängig, welche Aufträge dort im Zeitverlauf bearbeitet werden. Diese Informationen sind für alle Fertigungsmittel im Belegungsplan anhand der Vorgabezeiten hinterlegt. Die zeitgerechte Aktualisierung des Belegungsplans bietet die Möglichkeit, auch Unterbrechungen und Verschiebungen infolge von Störungen zu erfassen. Aus dem Belegungsplan lässt sich somit ableiten, welche Betriebszustände die Fertigungsmittel aktuell und im weiteren Zeitverlauf einnehmen.

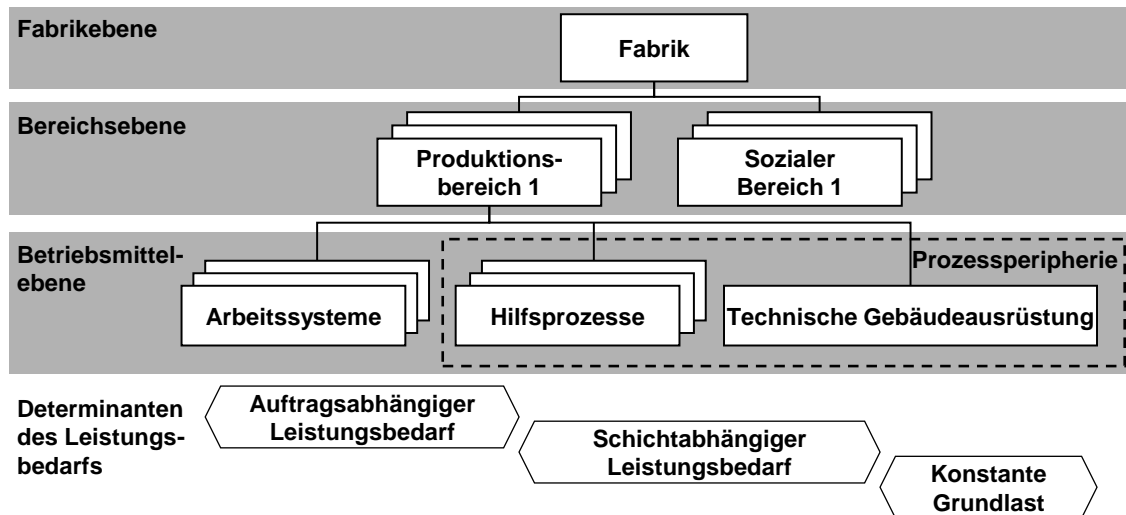


Abbildung 40: Zusammensetzung des betrieblichen Leistungsbedarfs

Fertigungshilfsmittel dienen vornehmlich der Versorgung der Fertigungsmittel durch Hilfsprozesse und können auf unterschiedliche Arten behandelt werden (MÜLLER et al. 2013). Sind Hilfsprozesse unmittelbar von einem einzigen Fertigungsmittel abhängig, kann deren Leistungsbedarf dem Lastprofil des jeweiligen Fertigungsmittels zugerechnet werden (GROBE BÖCKMANN 2014). Weist ein Hilfsprozess im Betrieb eine verhältnismäßig hohe Last auf, bedient dabei jedoch nur wenige Fertigungsmittel, so lässt sich dagegen ein auftragsabhängiger Leistungsbedarf annehmen. Der Lastgang des Hilfsprozesses kann in diesem Fall in Abhängigkeit der Aufträge der verbundenen Fertigungsmittel ermittelt werden, z. B. bei Fördermitteln, die immer nach Fertigstellung eines Auftrags eingeschaltet werden.

Werden dagegen wie üblich zahlreiche Fertigungsmittel von einem Hilfsprozess versorgt, so ist eine Darstellung des Leistungsbedarfs in Abhängigkeit von den Fertigungsmitteln nicht ohne Weiteres umsetzbar (GROBE BÖCKMANN 2014). Gleichen sich die Einzelbedarfe der jeweiligen Fertigungsmittel an den Hilfsprozess stochastisch aus, kann in diesem Fall angenommen werden, dass der Leistungsbedarf während der Schicht konstant ist. Andernfalls ist es erforderlich, den Leistungsbedarf als schichtabhängige Lastkurve aufzunehmen und zu hinterlegen. Gleiches gilt für viele Anlagen der TGA, wie z. B. die Lüftung, die Klimatisierung oder die Beleuchtung, die ein gesamtes Fabrikgebäude versorgen. Als determinierendes Beschreibungsmittel dient folglich der Schichtplan, aus dem die Zustände dieser Betriebsmittel abgeleitet werden müssen. Einzelne Betriebsmittel der Fabrik, beispielsweise zentrale IKT-Anlagen, sind dagegen durchgehend aktiv und können als konstante Grundlast modelliert werden.

Darüber hinaus tragen auch produktionsferne Bereiche, wie z. B. Sozialräume oder Büroflächen, zum Gesamtlastgang der Fabrik bei. Der Leistungsbedarf dieser Bereiche kann durch eine Lastkurve oder eine Grundlast angenähert werden, die während einer Schicht konstant ist. Da die Produktionssteuerung keinen Einfluss auf diese Bereiche nimmt, werden sie im Folgenden weder in der Lastgangprognose noch im Fahrplan näher betrachtet. Als Resultat lässt sich im Rahmen der Produktionssteuerung aus dem Belegungs- sowie dem Schichtplan eine Prognose über die Zustände generieren, die die Betriebsmittel im zeitlichen Tagesverlauf voraussichtlich einnehmen werden.

6.3.4 Definition von allgemeinen Betriebszuständen

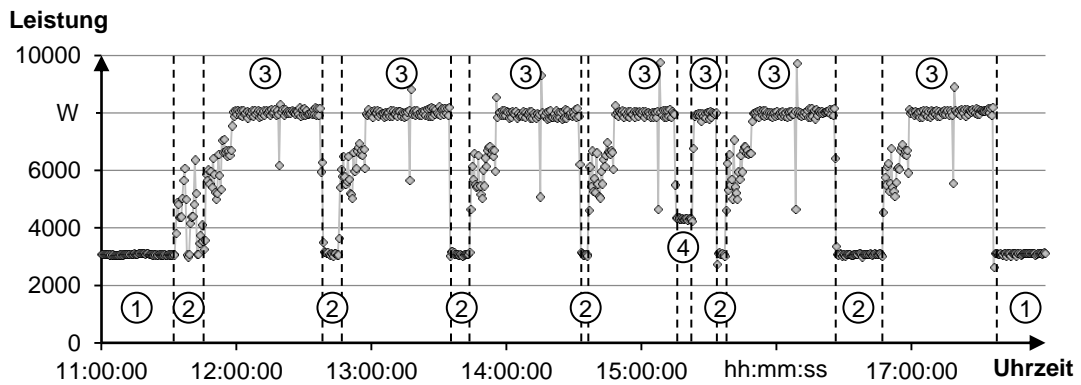
In Abschnitt 3.4.3 sind bereits umfassende Ansätze zur Beschreibung der energetisch relevanten Betriebszustände vorgestellt worden. Im Folgenden wird an die Arbeiten von DIETMAIR & VERL (2008), WEINERT (2010b) und HAAG (2013) angeknüpft. Die Betriebsmittel werden zu diesem Zweck als Black-Box betrachtet, ohne einen genaueren Einblick in deren Komponenten zu bekommen. Aus Sicht der Produktionssteuerung ist diese Vereinfachung sinnvoll, da die Regelung der Einzelkomponenten der Maschine selbst obliegt. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachteten Betriebszustände sind in Tabelle 6 zusammengefasst und werden im Folgenden beschrieben:

- „Aus“ bezeichnet den Zustand, in dem ein Betriebsmittel über den Hauptschalter ausgeschaltet wurde und infolgedessen keine Energie aufnimmt.
- Im Zustand „Hochlauf“ fährt das Betriebsmittel alle Komponenten nach Betätigung des Hauptschalters hoch.
- Während des Zustands „Betriebsbereit“ ist das Betriebsmittel eingeschaltet, jedoch liegen keine weiteren Vorgaben vor. Nebenaggregate können in diesem Zustand ausgeschaltet sein.
- Ist das Betriebsmittel bereits für einen Auftrag parametrisiert oder wird gerade gerüstet, nimmt es den Zustand „Warten“ ein. Nebenaggregate laufen in diesem Zustand bereits.
- „Bearbeiten“ beschreibt die Durchführung des eigentlichen Prozesses durch das Betriebsmittel, wie z. B. die Bearbeitung eines Auftrags.
- Beim Auftreten von Störungen wird das Betriebsmittel über Not-Aus in einen abgesicherten Zustand gebracht, der als „Störung“ bezeichnet wird.

Tabelle 6: Beschreibung der möglichen Betriebszustände

Betriebszustände		
Bezeichnung	Beschreibung	Leistungsbedarf
Aus	Betriebsmittel (BM) ist ausgeschaltet	-
Hochlauf	BM läuft nach Einschaltvorgang an	Abhängig von BM
Betriebsbereit	BM bereit für Auftragseingabe	Abhängig von BM
Warten	BM in Regelung / Rüstvorgang	Abhängig von BM
Bearbeiten	BM bearbeitet Auftrag	Abhängig von BM, Auftrag und Konfiguration
Störung	BM gestört oder in Not-Aus	Abhängig von BM

Jeder Betriebszustand ist mit einem spezifischen Leistungsbedarf assoziiert, der grundsätzlich vom jeweiligen Betriebsmittel selbst abhängig ist (vgl. Abbildung 41). Einzig während der Bearbeitung zeigt sich eine zusätzlich Abhängigkeit von den im Auftrag bzw. Arbeitsplan spezifizierten Bauteil- und Prozessparametern (STOCK & SELIGER 2015). Weiterhin lassen einige Fertigungsverfahren eine Veränderung der Konfiguration der Prozessparameter zu, um die Leistungsaufnahme während der Bearbeitung zu reduzieren. Infolge dessen können verschiedene Varianten des Betriebszustandes *Bearbeiten* definiert werden (WEINERT 2010b, HAAG 2013, GRABL 2015).



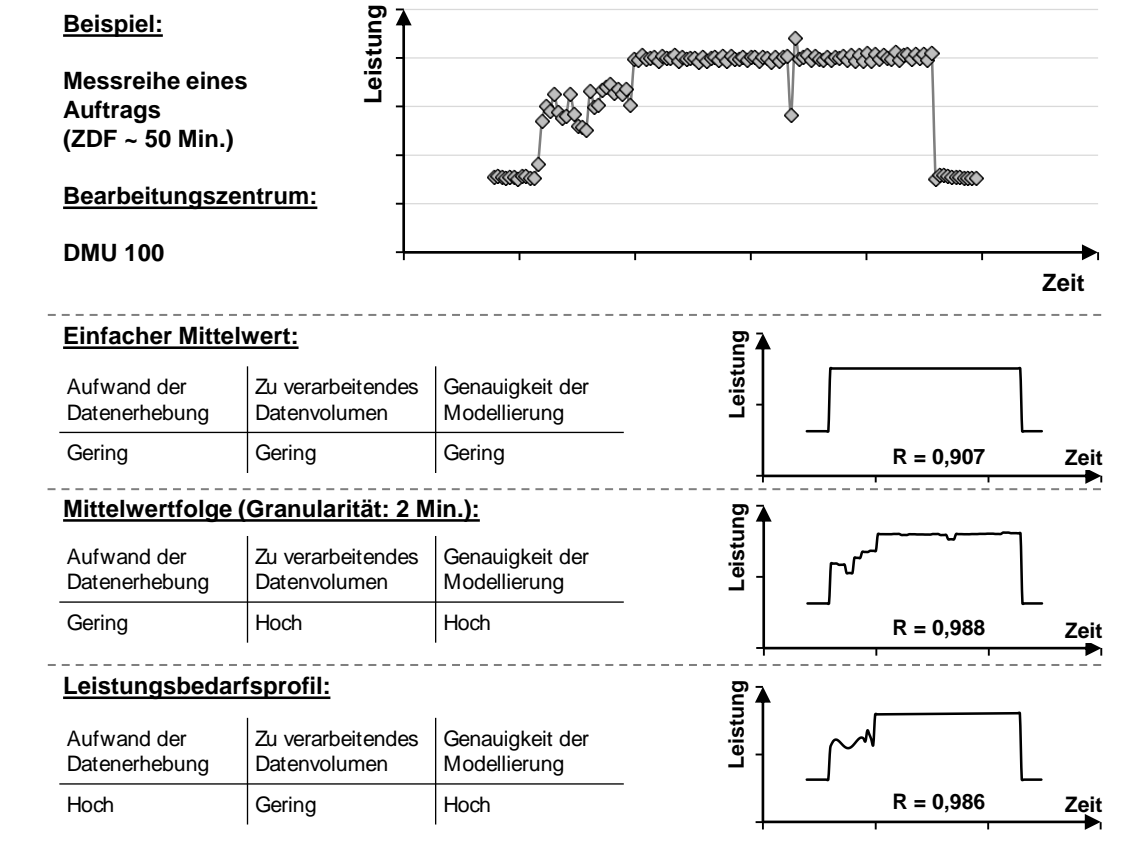
Legende: ① : Betriebsbereit ② : Warten ③ : Bearbeiten ④ : Störung

Abbildung 41: Beispielhafter Lastgang eines Bearbeitungszentrums vom Typ DMU 100

Zur Modellierung des zustandsabhängigen Leistungsbedarfs stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, die sich jeweils hinsichtlich der Datengrundlage und der Genauigkeit unterscheiden. Eine genauere Datenmodellierung verbessert die Prognosequalität, erhöht jedoch den Rechenaufwand und reduziert somit die

6 Bedarfsüberwachung

Reaktionsgeschwindigkeit (LI et al. 2016). Unterschieden werden soll dabei die Darstellung der Daten anhand von Leistungsmittelwerten für einen bestimmten Zustand und von Leistungsbedarfsprofilen (vgl. Abbildung 44).



Legende: R : Korrelationskoeffizient

Abbildung 42: Darstellung der Modellierungsverfahren anhand eines Beispiels

- *Einfache Mittelwerte* stellen die einfachste Form dar, den Leistungsbedarf zu modellieren. Zu diesem Zweck wird ein Mittelwert über die gesamte Zustandsdauer gebildet und im Weiteren für diesen Zustand angenommen.
- Durch die Verwendung von *Mittelwertfolgen* kann die Modellierungsgenauigkeit erhöht werden. Die Zustandsdauer wird dabei entsprechend einer vorgegebenen Granularität, z. B. 30 Sekunden oder 1 Minute, in Zeitintervalle aufgeteilt und ein Mittelwert für jedes dieser Intervalle gebildet.
- *Leistungsbedarfsprofile*, die bei WEINERT (2010b) als EnergyBlocks bezeichnet werden, nähern das kontinuierliche Lastprofil während eines Zustands mathematisch an. Der Leistungsbedarf eines Zustands wird folglich als zeitliche Funktion dargestellt. Auf diese Weise kann die Genauigkeit der Modellierung erhöht werden (GROßE BÖCKMANN 2014).

6.3 Entwicklung einer Lastgangprognose

Zur Bestimmung der jeweiligen Leistungsbedarfe ist entweder eine messtechnisch oder eine numerisch erhobene Datenbasis erforderlich. Insbesondere für die Betriebszustände, die lediglich vom Betriebsmittel nicht jedoch von den Prozessparametern abhängig sind, bietet es sich an, die Bedarfswerte durch Messung aufzunehmen. Wie die Dauerlastkurven, d. h. die Gegenüberstellung der Leistungsmesswerte und der jeweiligen Zeitanteile des Messwerts, zeigen, ist die Leistungsaufnahme einiger Betriebszustände weitestgehend konstant, sodass einfache Mittelwerte zu deren Modellierung ausreichen (vgl. Abbildung 43). Eine Ausnahme können hier die Hochlaufvorgänge bilden.

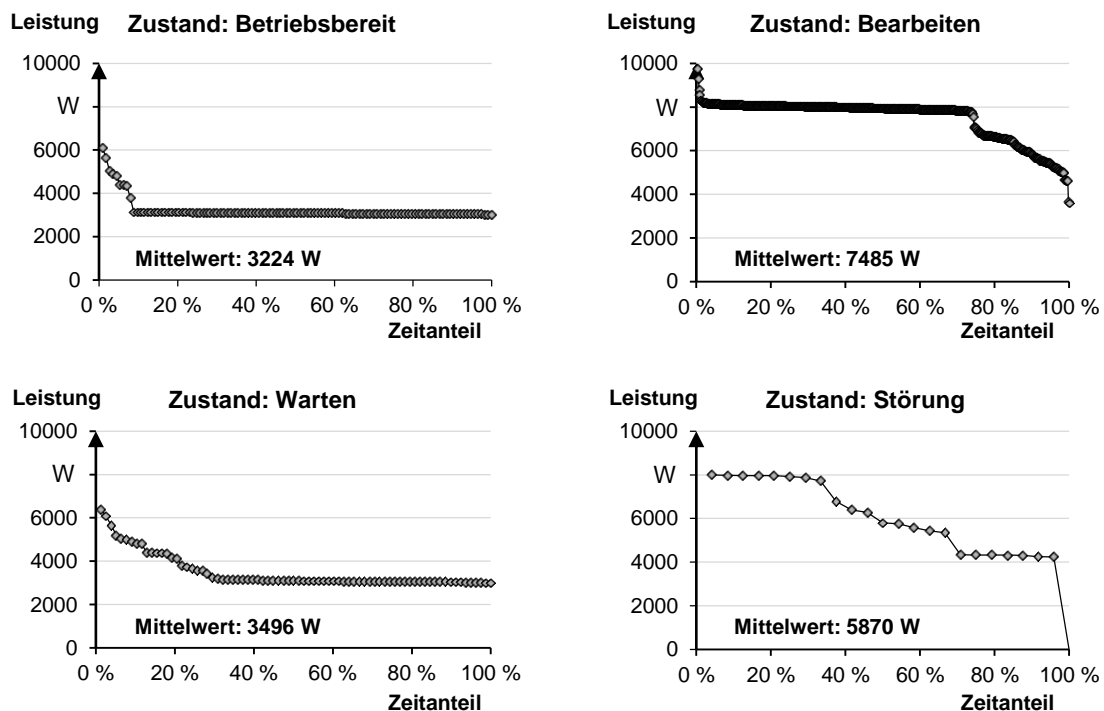


Abbildung 43: Beispielhafte Dauerlastkurven und Leistungsmittelwerte der Betriebszustände

Der Leistungsbedarf während der Bearbeitung ist hingegen nicht nur vom Betriebsmittel, sondern auch vom Auftrag und den gewählten Prozessparametern abhängig. Die Datenerhebung kann für Wiederholteile auch in diesem Fall messtechnisch erfolgen. Beispiele zur messtechnischen Datenerhebung und Aufbereitung für die PPS finden sich unter anderem bei KARA et al. (2011), BOGDANSKI et al. (2013), GONTARZ et al. (2015), SWAT et al. (2015b) und LIEBL et al. (2016). Darüber hinaus bestehen in der Literatur unterschiedliche Ansätze zur Abschätzung der jeweiligen Leistungsbedarfe anhand mathematischer Modelle oder anhand von Simulationsmodellen (vgl. Abschnitt 3.4). Die Erhebung und Dokumentation der erforderlichen Leistungsbedarfsdaten wird

6 Bedarfsüberwachung

oftmals einer vorangestellten Arbeitsplanung zugerechnet (WEINERT 2010b, HAAG 2013). Erlauben die Betriebsmittel eine kontinuierliche Messung der Leistungsaufnahme, kann durch die Fertigungsleitebene eine kontinuierliche Verbesserung der Mittelwerte oder Leistungsbedarfsprofile vorgenommen werden. Die Messwerte können dazu mit den aktuellen Betriebszuständen korreliert und statistisch ausgewertet werden. Dabei gilt es zu untersuchen, ob Abweichungen auf einen Prozessfehler hinweisen (Condition Monitoring), oder ob im Falle eines fehlerfreien Prozesses die hinterlegten Planwerte des Leistungsbedarfs angepasst werden müssen (EMEC et al. 2016).

6.3.5 Prognoseverfahren

Durch die Ableitung der Betriebszustände aus dem aktualisierten Belegungsplan und deren Verknüpfung mit einer Leistungsbedarfsmodellierung lässt sich somit das Lastprofil der Betriebsmittel prognostizieren (vgl. Abbildung 44). Der Zeithorizont der Prognose entspricht dabei dem Horizont des Belegungsplans.

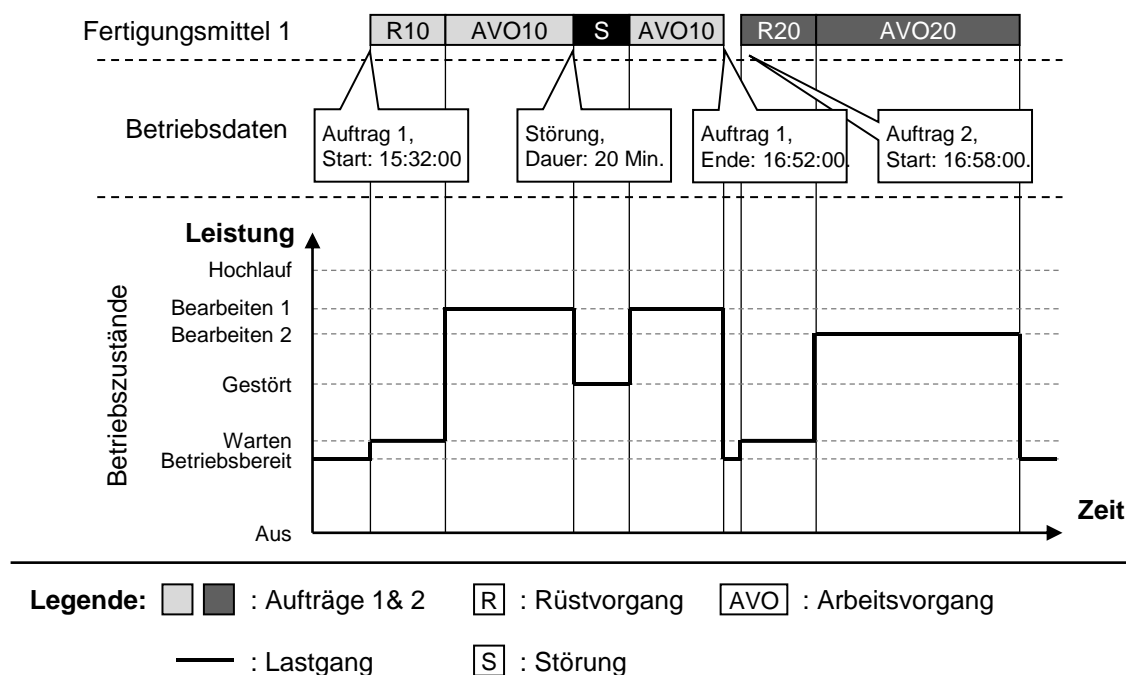
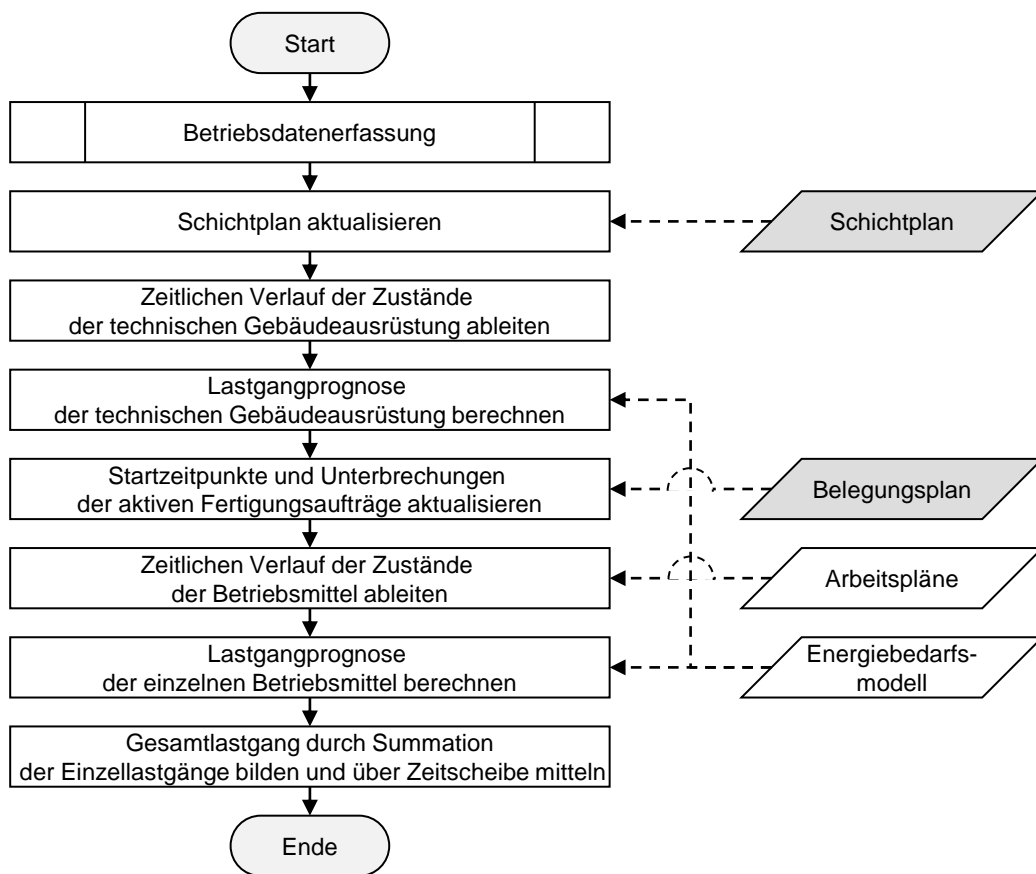


Abbildung 44: Ableitung der Lastgangprognose aus dem aktualisierten Belegungsplan

Die Güte der Prognose ist einerseits von der gewählten Bedarfsmodellierung und andererseits von der Genauigkeit der erfassten Durchlaufzeitanteile abhängig, z. B. Liegezeiten (LI et al. 2016). Da die aktualisierte Belegungsplanung im kurzfristigen Zeithorizont eine höhere Genauigkeit aufweist, ist in diesem Bereich

6.3 Entwicklung einer Lastgangprognose

auch die Prognosegüte höher. Eine weitere Steigerung der Prognosequalität ist durch die Verwendung simulationsbasierter Ansätze möglich, sofern die erforderliche Rechenzeit und Datengrundlage verfügbar ist. Verbleibende Ungenauigkeiten der Prognose müssen hingegen von der Flexibilität des Steuerungsverfahrens kompensiert werden. Der Gesamtlastgang ergibt sich als Summe der Einzellastgänge der Betriebsmittel. Zur Bildung des Gesamtlastgangs werden die Werte über jede Zeitscheibe des Abrechnungsintervalls gemittelt. Der resultierende Ablauf zur Prognose des produktionsbedingten Lastgangs ist in Abbildung 45 zusammengefasst. Als Ergebnis der Prognose liegt ein auf Basis der derzeitigen Produktionssituation aktualisierter Lastgang vor.



Legende: : Start/Ende : Operation : Definierter Prozess
 : Stammdaten : Verbindung : Datenfluss
 : Bewegungsdaten

Abbildung 45: Ablaufdiagramm der Lastgangprognose

6.4 Abweichungsidentifikation

6.4.1 Abweichungsanalyse

Die Lastgangprognose weist abhängig vom Umfang der Produktionsstörungen Abweichungen gegenüber dem ursprünglichen Fahrplan auf. Durch den Abgleich der Prognose und des Fahrplans ist es folglich möglich, die im Tagesverlauf zu erwartenden Lastgangabweichungen frühzeitig zu identifizieren und somit kompensierende Maßnahmen einzuleiten (SCHULTZ et al. 2016b). Da die Elemente des Fahrplans selbst teilweise mit Unsicherheiten behaftet sind, ist zu diesem Zweck ergänzend eine Aktualisierung des Fahrplans erforderlich. Die Vorhersagegenauigkeit der Erzeugungsprognosen volatiler Eigenversorgung steigt mit zunehmender zeitlicher Nähe zum Erfüllungszeitpunkt an (KLOBASA 2009). Ebenso erfolgt der Abruf der Regelleistung in einem Zeithorizont von 15 Minuten bis zu wenigen Stunden. Die Absicherung des Fahrplans umfasst somit einerseits eine Aktualisierung der Erzeugungsprognose und andererseits die zeitliche Zuordnung von Regelleistungsabrufen (vgl. Abbildung 46).

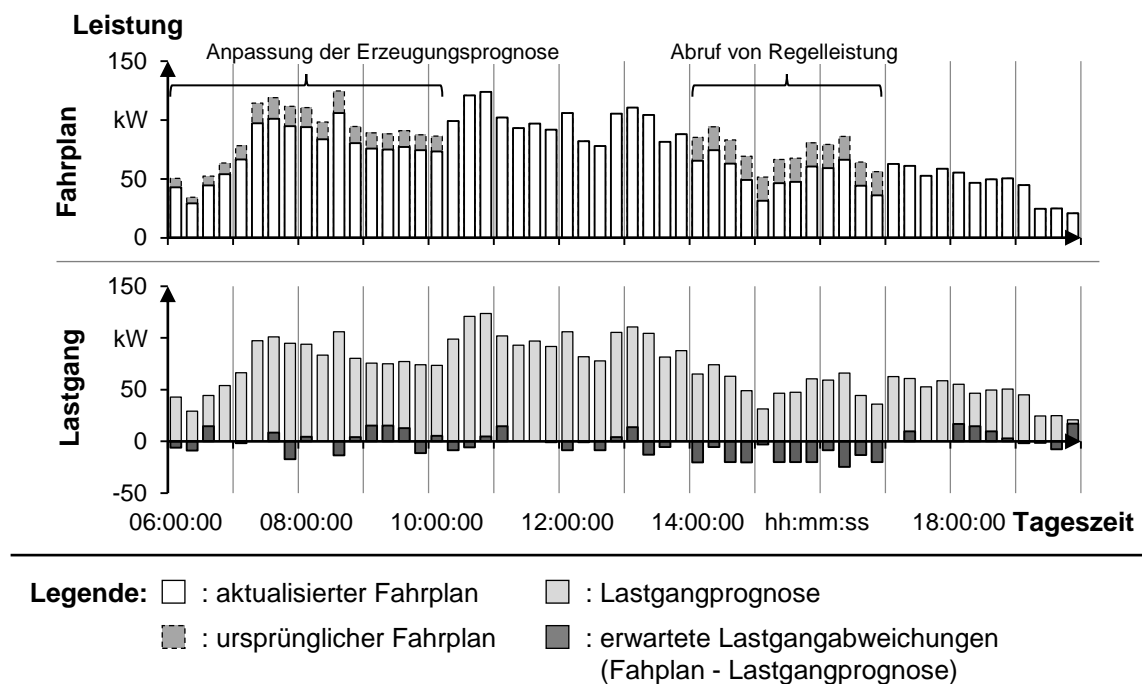


Abbildung 46: Aktualisierung des Fahrplans (oben) und Ableitung von Lastgangabweichungen (unten)

Durch einen Soll-Ist-Abgleich, d. h. die Subtraktion der Lastgangprognose vom aktualisierten Fahrplan, werden die tatsächlichen Lastgangabweichungen im Verlauf des Produktionstages ermittelt (vgl. Abbildung 46). Aufgrund der Varianz der Strombezugskosten im selben Zeitraum kommt nicht allen Abweichungen die gleiche Bedeutung zu. Stattdessen bietet es sich an, eine Gewichtung anhand der assoziierten Bezugskosten vorzunehmen.

6.4.2 Abweichungsbewertung

Als Basis der Gewichtung von Lastgangabweichungen dient eine Betrachtung der Strombezugskosten im kurzfristigen Zeitbereich der Produktionssteuerung. Diese Kosten setzen sich aus unterschiedlichen Komponenten zusammen und können im Tagesverlauf variieren. Gemäß der bisherigen Betrachtungsweise gilt als Grundannahme, dass die Bereitstellung der elektrischen Energie blockweise erfolgt und jeder Block eine Zeitscheibe des Fahrplans darstellt (vgl. Abschnitt 2.3.1 und 5.2.2). Beispielsweise kann in Anlehnung an den deutschen Strommarkt jeder Block eine Zeitdauer von 15 Minuten umfassen, in denen die Stromkosten jeweils separat betrachtet werden können. Aufgrund der vorab erfolgten Festlegung des Strombezugs durch die Produktionsplanung können die assoziierten Kosten in einen fixen und einen variablen Teil zerlegt werden (vgl. Abbildung 47).

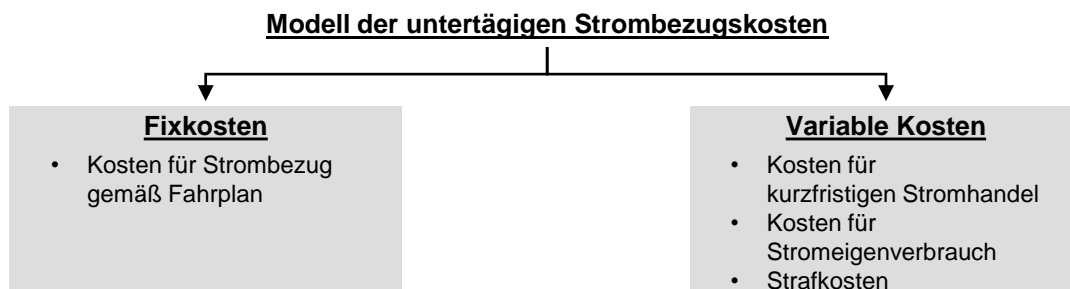


Abbildung 47: Komponenten der Strombezugskosten

6.4.2.1 Fixkosten des Fremdbezugs

Der fixe Kostenanteil resultiert aus dem Fahrplan, in dem bereits für jeden Block eine Energiemenge zu bestimmten Kosten festgelegt ist (KÜSTER et al. 2013). Da der Bezug dieser Energiemenge zunächst obligatorisch ist, gilt die Annahme, dass ohne weiteren Handel mindestens diese Fixkosten in jedem Block anfallen.

Die Fixkosten setzen sich zusammen aus der Summe der Einzelkomponenten des Portfolios (vgl. Abschnitt 2.3.1) und den jeweiligen Preisen, die von Bestell- und Lieferzeitpunkt abhängig sind. Die Minimierung der Fixkosten ist eine der Kernaufgaben einer energieorientierten Produktionsplanung (vgl. Abschnitt 5.2.2). Wird der externe Strombezug nicht vorab im Rahmen der Planung vorgenommen, entfallen die Fixkosten. Dementsprechend würde in diesem Fall die Kostenfestlegung vollständig durch die Produktionssteuerung erfolgen. Dabei gilt grundsätzlich der Zusammenhang in Formel (3):

$$K_{F,i} = c_n(t_i, t_j) \cdot \varepsilon_{n,i} \cdot \int_{t_i}^{t_i+\Delta t} P(t) dt \quad (3)$$

mit	$K_{F,i}$	Fixkosten des Strombezugs im Intervall i
	c_n	Preis des Strommarktproduktes bzw. der Eigenversorgung n
	t_i	Lieferzeit und Startzeitpunkt des Zeitintervalls
	t_j	Bestellzeitpunkt
	$\varepsilon_{n,i}$	Anteil der Bezugsform n an Bezug im Intervall i
	Δt	Dauer eines Intervalls
	$P(t)$	Wirkleistung
	i, j	Laufvariablen der Intervalle

6.4.2.2 Variable Kosten des Fremdbezugs

Abweichungen vom Fahrplan sind mit zusätzlichen Kosten verbunden, deren Art und Umfang davon abhängt, ob der Ausgleich der Abweichungen a priori vom Unternehmen selbst oder a posteriori vom Energieversorger durchgeführt wird. Um die verschiedenen Instrumente für den Lastausgleich vergleichen zu können, bietet sich eine Analyse der variablen Kosten an, die für die Bereitstellung oder den Entfall einer zusätzlichen Mengeneinheit anfallen (FANDEL 2005).

Dem Unternehmen steht für den Bilanzausgleich insbesondere der Spotmarkt zur Verfügung. Als Voraussetzung dafür muss die Abweichung rechtzeitig vor ihrem Eintritt erkannt sein, d. h. mindestens 30 Minuten plus Transaktionszeit zuvor (vgl. Abschnitt 2.3.1). Als Preis ergibt sich der zeitabhängige Spotmarktpreis zuzüglich der Transaktionsgebühren. In wenigen Fällen kann der Börsenpreis negative Werte annehmen, sodass eine Erhöhung der Leistungsaufnahme zu einer Verringerung der Gesamtstromkosten führen würde. Dabei gilt nach Formel (4):

$$c_{Handel,i} = c_{Spot,i} + c_{Spot,Transaktion} \quad (4)$$

mit	$c_{Handel,i}$	Preis für kurzfristigen Börsenhandel im Intervall i
	$c_{Spot,i}$	Spotmarktpreis im Intervall i
	$c_{Spot,Transaktion}$	Transaktionsgebühren
	i	Laufvariable der Intervalle

Im Allgemeinen gewährt der Energieversorger dem Endkunden eine Toleranz von ± 5 bis ± 10 % gegenüber der zugesagten Abnahmemenge (HESSEL 2008, WEIß 2010). Werden die Toleranzgrenzen jedoch überschritten, fallen vertraglich vereinbarte Strafkosten (Pönalen) an, die den ursprünglichen Strompreis übersteigen können (MÜLLER et al. 2013). Einen Anhaltspunkt für diese Strafkosten bietet die Berechnung des Ausgleichsenergiepreises²⁴, anhand dessen die Kosten für Einsatz von Regelleistung zum Ausgleich der Bilanzkreise abgegolten werden (ZAPF 2017). Der Bilanzausgleichspreis wird im Nachhinein über den gesamten deutschen Netzregelverbund kalkuliert. In Abhängigkeit des Saldos der deutschlandweit eingesetzten Regelleistung kann der Ausgleichspreis sowohl positive als auch negative Werte annehmen, die entsprechend bei einer Unterdeckung (Lastgang > Fahrplan) oder Überdeckung (Lastgang < Fahrplan) in Straf- bzw. Bonuszahlungen resultieren (LOMBARDI & SCHWALBE 2017, ZAPF 2017). Die Bilanzausgleichspreise sind durch eine ausgeprägte Volatilität gekennzeichnet und können von einer Viertelstunde zur nächsten um mehrere 100 % schwanken (GÖTZ et al. 2014). Aufgrund des hohen Preisrisikos²⁵ sollte der Umfang der erforderlichen Ausgleichsenergie weitestgehend minimiert werden. Es wird im Weiteren davon ausgegangen, dass die Kosten innerhalb eines Abrechnungsintervalls linear mit dem Umfang der Abweichung ansteigen, sodass nach Formel (5) gilt:

$$c_{Ausgleich,i} = c_{Strafe,Ausgleich,i} \quad (5)$$

mit	$c_{Ausgleich,i}$	Preis für Ausgleich durch Energieversorger
	$c_{Strafe,Ausgleich,i}$	Strafkosten für Lastgangabweichung
	i	Laufvariable der Intervalle

Einen Sonderfall stellt der Abruf von Regelleistung dar. Der Abruf ist zeitlich begrenzt und wird dem Kunden mit einer Vorwarnzeit von mindestens 15

²⁴ Im deutschen Netzverbund wird die Bezeichnung des *regelzonenübergreifenden einheitlichen Bilanzausgleichspreises* (reBAP) verwendet.

²⁵ GÖTZ et al. (2014) geben für den reBAP im Zeitraum von Dezember 2012 bis November 2013 eine Preisspanne von -2.498,40 € / MWh bis 1.680,20 € / MWh an.

Minuten mitgeteilt (KONSTANTIN 2013). Bleibt die Erfüllung des Abrufs durch den Kunden aus, fallen sowohl hohe Strafkosten als auch Opportunitätskosten durch die entfallene Vergütung an. Es gilt somit Formel (6):

$$c_{Regel,i} = K_{Strafe,Regel}/M_{Regel,i} + c_{Verguetung,Regel,i} \quad (6)$$

mit	$c_{Regel,i}$	Preis für Abweichung von Regelleistungsabruf
	$K_{Strafe,Regel}$	Strafkosten durch Energieversorger
	$M_{Regel,i}$	Menge der angebotenen Regelleistung
	$c_{Verguetung,Regel,i}$	Vergütung der Regelleistung
	i	Laufvariable der Intervalle

6.4.2.3 Kosten der Stromeigenversorgung

Ein weiterer Teil des Strombezugs kann aus der dezentralen Eigenerzeugung erfolgen. Der durch das Unternehmen selbst erzeugte Strom wird in Abhängigkeit der erzielbaren Erlöse anteilig entweder in das öffentliche Netz eingespeist oder für den Eigenverbrauch aufgewandt. Liegt die anlagenspezifische Einspeisevergütung höher als der aktuelle Strompreis, speist die entsprechende Anlage vollständig in das öffentliche Netz ein. Da die Einspeisung nicht zur Deckung der eigenen Lasten dient, ist sie nicht im Fahrplan berücksichtigt. Im umgekehrten Fall einer gegenüber dem Strompreis niedrigeren Einspeisevergütung, wird die Eigenerzeugung soweit wie möglich für den Eigenverbrauch aufgewandt. Die Einspeisevergütungen und somit die Einbindung in den Strombezug können sich dabei je nach Art und Alter für unterschiedliche Anlagen desselben Endkunden unterscheiden.

Erhöht sich im Zuge von Lastgangabweichungen der Leistungsbedarf des Unternehmens, besteht die Möglichkeit, die Einspeisung von Anlagen zu reduzieren und zur Deckung des Eigenbedarfs zu nutzen. Dabei fallen neben den Stromgestehungskosten zusätzliche Opportunitätskosten durch den entgangenen Gewinn der Einspeisung an. Kann hingegen die Eigenversorgung reduziert werden, fällt die Einspeisevergütung als zusätzlicher Gewinn an, da die Stromgestehungskosten bereits in den Fixkosten verrechnet sind. Die Gestehungskosten sind neben der Technologie und der Anlage auch von unternehmensspezifischen Größen abhängig, wie z. B. dem Kapitalzinssatz (KONSTANTIN 2013, WESSELAK et al. 2017). Es gelten die Formeln (7) und (8):

$$C_{Eigen,m} = C_{Gestehung,m} + C_{Opportunitaet,m} = C_{Einspeisung,m} \quad (7)$$

$$\text{mit } C_{Opportunitaet,m} = C_{Einspeisung,m} - C_{Gestehung,m} \quad (8)$$

$C_{Eigen,m}$	Preis für zusätzliche Eigenversorgung durch Anlage m
$C_{Gestehung,m}$	Stromgestehungskosten für Anlage m
$C_{Opportunitaet,m}$	Opportunitätskosten durch entgangene Einspeisung von Anlage m
$C_{Einspeisung,m}$	Einspeisevergütung für Anlage m
m	Laufvariable der Anlagen

6.4.3 Kostenmodell

Aus der Betrachtung der einzelnen Kostenkomponenten des Strombezugs ergibt sich im untertägigen Zeithorizont der Produktionssteuerung für jedes Intervall des Fahrplans eine individuelle Kostenfunktion in Abhängigkeit der Lastgangabweichung. Den Zusammenhang zeigen die Formeln (9) und (10):

$$K_{\Delta,i} = C_{Spot,i} \cdot M_{Spot,i} + C_{Ausgleich,i} \cdot M_{Ausgleich,i} + C_{Regel,i} \cdot M_{Regel,i} + C_{Eigen,m} \cdot M_{Eigen,m,i} \quad (9)$$

$$\text{mit } M_{n,i} = \varepsilon_{n,i} \cdot \int_{t_i}^{t_i+\Delta t} P_{Abweichung,i}(t) dt = \varepsilon_{n,i} \cdot LGA_i \cdot \Delta t \quad (10)$$

$K_{\Delta,i}$	Kosten durch Lastgangabweichung im Intervall i
$C_{n,i}$	Preis der Bezugsform n im Intervall i
$M_{n,i}$	Menge durch Bezugsform n im Intervall i
$\varepsilon_{n,i}$	Anteil der Bezugsform n an Bezug im Intervall i
$P_{Abweichung,i}$	Lastgangabweichung im Intervall i
LGA_i	Durchschnittliche Lastgangabweichung im Intervall i
Δt	Dauer eines Intervall
i	Laufvariable der Intervalle
m	Laufvariable der Anlagen
n	Laufvariable der Bezugsformen

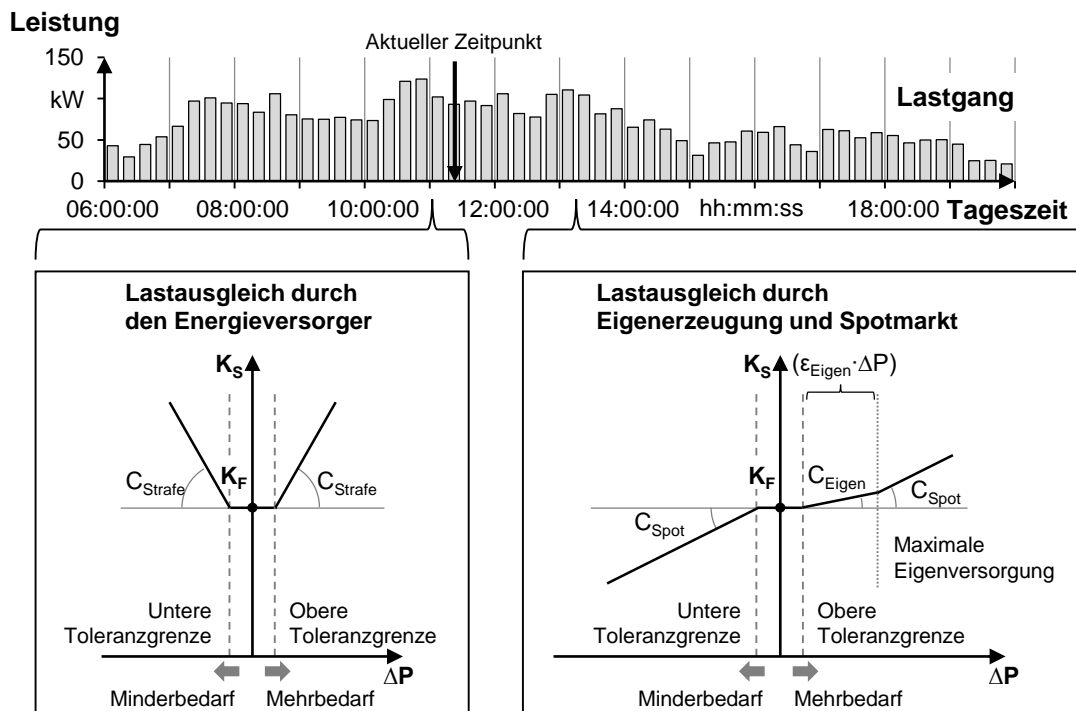
Ausgehend von den Basiskosten können in den Intervallen durch einen Mehr- bzw. Minderverbrauch zusätzliche variable Kosten oder Erlöse entstehen. Deren Ausprägung ist dabei maßgeblich durch die zeitabhängigen Strompreise bedingt. Für die Stromkosten innerhalb eines Intervalls gilt somit Formel (11):

6 Bedarfsüberwachung

$$K_{S,i} = K_{F,i} + K_{\Delta,i} \quad (11)$$

mit $K_{S,i}$ Tatsächliche Stromkosten im Intervall i
 $K_{F,i}$ Fixkosten des Strombezugs im Intervall i
 $K_{\Delta,i}$ Kosten durch Lastgangabweichung im Intervall i

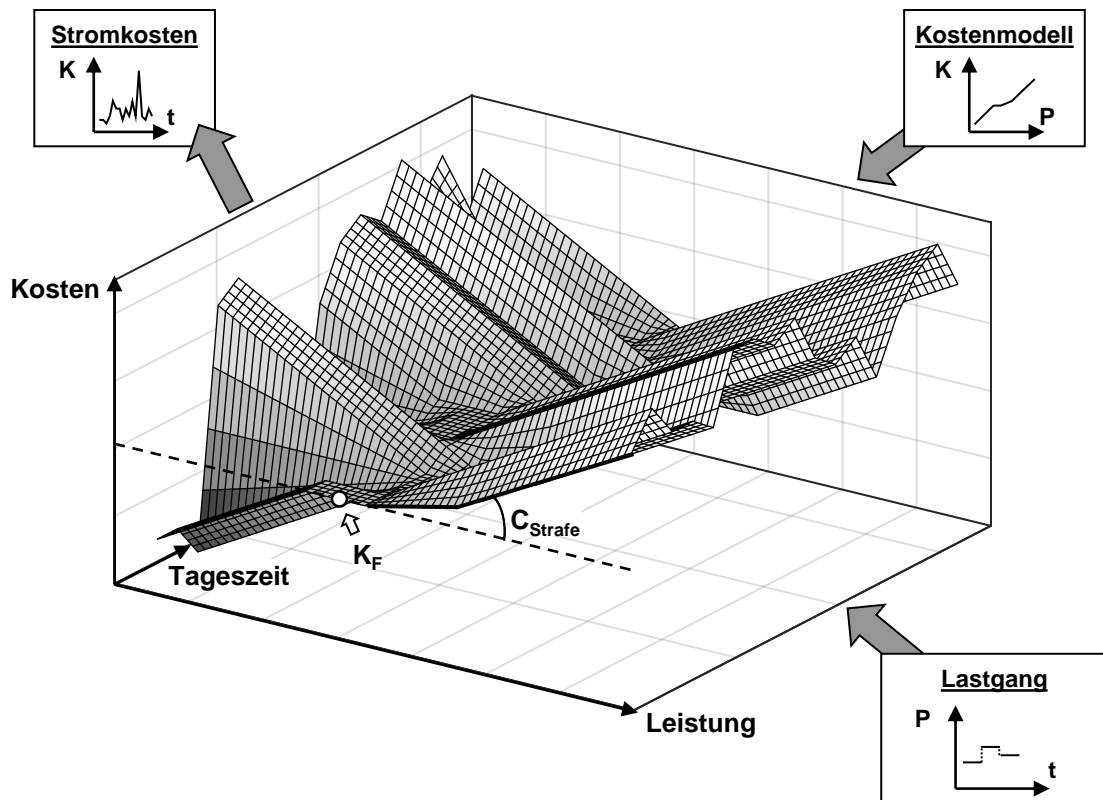
Abbildung 48 zeigt aufgrund der dargelegten Annahmen zwei exemplarische Kostenverläufe für Zeitintervalle desselben Tages. Zu beachten ist dabei insbesondere, dass aus theoretischer Sicht eine nachträgliche Senkung der Gesamtstromkosten gegenüber dem Fahrplan durch untertägigen Spotmarkthandel oder die Vergütung eines Mehrbedarfs durch negative Strompreise möglich ist. Bei einem ausreichenden zeitlichen Vorlauf kann überschüssiger Strom zu positiven Preisen gehandelt werden. Der spezifizierte Toleranzbereich kann ohne zusätzliche Kosten ausgenutzt werden. Abweichungen, die die Toleranzgrenzen überschreiten werden im Nachhinein in der Regel durch den Energieversorger unter Berechnung von Strafkosten ausgeglichen und erhöhen somit die Gesamtkosten.



Legende: K_S : Stromkosten
 ΔP : Lastgangabweichung
 ϵ : Anteil an Lastausgleich
 C_{strafe} : Variable Kosten für Strafen
 C_{Spot} : Variable Kosten für Spotmarkt
 C_{Eigen} : Variable Kosten für Eigenerzeugung

Abbildung 48: Alternative Kostenverläufe infolge von Lastgangabweichungen

Aus der Aufstellung des Stromkostenmodells für jede einzelne Zeitscheibe des Tages, beispielsweise für alle 15-Min.-Intervalle, resultiert ein Kostengebirge in Abhängigkeit der Tageszeit und der erforderlichen Leistung (vgl. Abbildung 49). Das entwickelte Stromkostenmodell entspricht der Perspektive *Leistung-Kosten*, während der Fahrplan bzw. der Lastgang in der Ansicht *Tageszeit-Leistung* abgebildet ist. Definitionsgemäß entspricht der Pfad entlang des Kostenplateaus genau dem Fahrplan. Treten im Ist-Lastgang gegenüber dem Fahrplan Abweichungen auf, folgt daraus in der *Tageszeit-Kosten*-Ansicht ein veränderter Stromkostenverlauf. Das Ziel der energieorientierten Produktionssteuerung liegt somit darin, unter Berücksichtigung der Abweichungen den kostengünstigsten Pfad durch das Stromkostengebirge zu realisieren.



Legende: K_F : Fixkosten C_{Strafe} : Strafkosten

Abbildung 49: Mehrdimensionaler Zusammenhang zwischen Tageszeit, Leistungsbedarf und Stromkosten

Durch Anwendung des Modells für die Strombezugskosten auf die einzelnen Intervalle ist eine Abschätzung der Kosten möglich, die durch die Lastgangabweichungen verursacht werden. Zusätzlich zu den stetigen Kosten lässt sich in diesem Modell auch die höchste Jahreslastspitze abbilden, die maßgeblich für die

Bildung des Leistungspreises ist. An der Position der aktuellen mittleren Jahreslastspitze auf der Leistungsachse kann dazu ein überproportional hoher Preisanstieg, d. h. im Grenzfall sogar $+\infty$, modelliert werden, um eine Überschreitung dieses Mittelwerts zu verhindern. Auf diese Weise wird auch das Spitzenlastmanagement in die energieorientierte Produktionssteuerung integriert. Die Bewertung der Abweichungen anhand der Kosten legt somit den Handlungsrahmen für die Produktionssteuerung fest. Da das Maßnahmenportfolio für die Lastanpassung in der Regel limitiert ist, gilt es, Abweichungen, die hohe Kosten verursachen, prioritär zu kompensieren. Abweichungen innerhalb des Toleranzbereichs erfordern hingegen keinen steuernden Eingriff.

6.5 Fazit

Das Systemelement der Bedarfsüberwachung dient der Identifikation und Bewertung der Lastgangabweichungen infolge unausweichlicher Produktionsstörungen. In diesem Kapitel sind die Auswirkungen von Produktionsstörungen auf den Lastgang zunächst im Allgemeinen analysiert und kategorisiert worden (vgl. Abschnitt 6.2). Als zentrales Beschreibungselement zur Abbildung lastgangrelevanter Störungen ist der Belegungsplan identifiziert worden. Weiterhin ist in diesem Kapitel dargestellt worden, wie die Erfassung und Auswertung von Betriebsdaten dazu genutzt werden kann, den Belegungsplan zu aktualisieren und an die derzeitige Produktionssituation anzupassen (vgl. Abschnitt 6.3.2).

In Kombination mit einer zustandsbasierten Energiebedarfsmodellierung ist in Abschnitt 6.3.5 ein Vorgehen zur Ableitung einer Lastgangprognose in der Produktionssteuerung entwickelt worden. Zusätzlich ist aufgezeigt worden, wie auf dieser Basis der Lastgang für unterschiedliche Klassen von Betriebsmitteln prognostiziert werden kann (vgl. Abschnitt 6.3.4).

Durch eine Gegenüberstellung der Lastgangprognose und des Fahrplans werden zu erwartende Lastgangabweichungen vorab abgeschätzt. Um den Schwankungen der Strompreise Rechnung zu tragen, ist in Abschnitt 6.4.2 ein Modell für die Abbildung der fixen und der variablen untertägigen Stromkosten aufgestellt worden. Anhand des entwickelten Gesamtmodells wird eine Bewertung der prognostizierten Abweichungen und somit eine Priorisierung des Kompensationsbedarfs sowie des bewussten Spotmarkthandels verfügbarer Energiemengen durch die zu entwickelnden Steuerungsverfahren ermöglicht (vgl. Kapitel 7).

7 Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung

7.1 Konfiguration der Produktionssteuerung

Die Entwicklung der Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung als drittes Systemelement folgt der Motivation, den betrachteten Anteil der Energiekosten unter Wahrung der übrigen logistischen Zielgrößen (vgl. Abschnitt 2.4.2) zu minimieren. Dabei bauen die Verfahren auf den zuvor dargestellten Systemelementen auf, die einerseits die informationstechnische Grundlage bilden und andererseits den Bedarf für laststeuernde Eingriffe identifizieren.

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Produktionssteuerung zielt darauf ab, den untertägigen Lastgang eines produzierenden Unternehmens unter Berücksichtigung des aktuellen Produktionszustandes so einzustellen, dass Abweichungen vom Plan-Lastgang vermieden und auf diese Weise die Energiekosten reduziert werden können. Folglich lässt sich das von LÖDDING (2008) aufgestellte Modell der Produktionssteuerung (vgl. Abschnitt 2.4.4), wie in Abbildung 50 aufgezeigt, um die Energiekosten als Zielgröße sowie die Lastgangabweichung als Regelgröße erweitern. Da die Energiekosten im Konflikt mit dem bestehenden logistischen Zielsystem (vgl. Abschnitt 2.4.2) stehen, müssen in der Produktionssteuerung die Wechselwirkungen zwischen den Zielgrößen berücksichtigt werden. Vor diesem Hintergrund ist eine Anpassung der klassischen Aufgaben der Produktionssteuerung, d. h. der Auftragsfreigabe, der Reihenfolgebildung und der Kapazitätssteuerung, erforderlich, um die zusätzliche Regelgröße gezielt steuern zu können.

Innerhalb eines kurzfristigen Zeithorizonts, in dem die energieorientierte Produktionssteuerung agiert, sind zur Kapazitätssteuerung lediglich die Anpassung der Arbeitszeit (Überstunden) und Arbeitsgeschwindigkeit relevant. Weitere Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung, wie z. B. die Fremdvergabe oder die Bereitstellung zusätzlicher Fertigungsmittel, werden in dieser Zeitspanne nicht betrachtet (GOTTSCHALK 2005, LÖDDING 2008). Da Überstunden definitionsgemäß kein Bestandteil des ursprünglichen Produktionsplans sind und somit auch nicht zum Fahrplan zählen, gehen diese immer mit ungeplantem Leistungsbedarf einher und sind nicht geeignet, Lastgangabweichungen zu reduzieren. In diesem Fall ist lediglich eine Berücksichtigung der kurzfristigen

7 Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung

Strompreise bei der zeitlichen Einplanung der Arbeitszeitanpassung denkbar, um die Gesamtkosten zu reduzieren, wie beispielsweise von WILLEKE et al. (2015c) vorgeschlagen wird. Infolgedessen fokussiert sich die Entwicklung der energieorientierten Verfahren auf die Auftragsfreigabe und die Reihenfolgebildung.

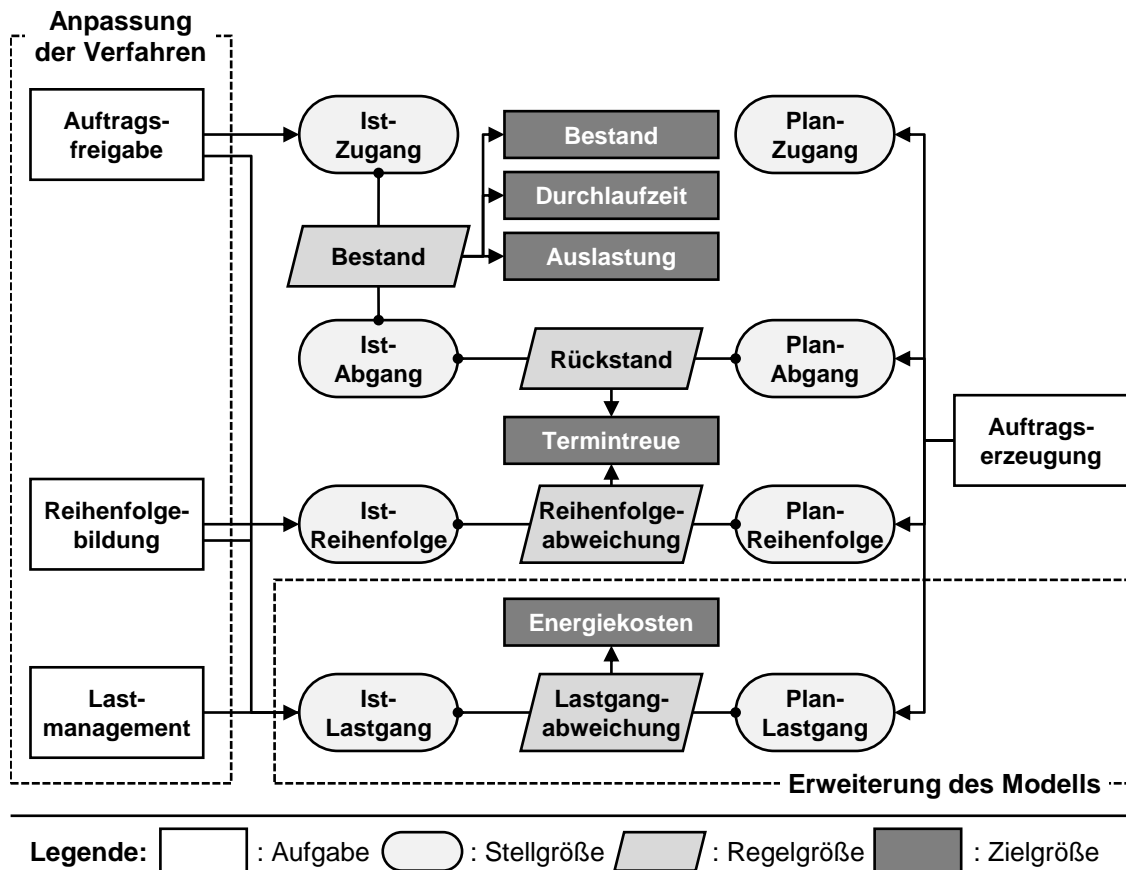


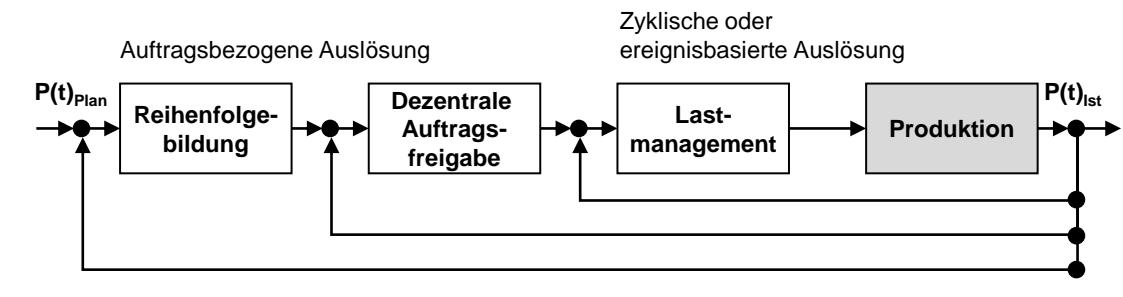
Abbildung 50: Erweiterung des Modells der Produktionssteuerung nach LÖDDING (2008) um Energiekosten in Anlehnung an SCHULTZ et al. (2016b)

Die Verfahren der energieorientierten Auftragsfreigabe und Reihenfolgebildung greifen direkt in die Abwicklung von Fertigungsaufträgen ein, um Lastgangabweichungen zu minimieren. Die Auslösung erfolgt in beiden Fällen bei der Auswahl des als nächsten zu bearbeitenden Auftrags. Folglich ist während der eigentlichen Auftragsbearbeitung anhand dieser Verfahren kein lastausgleichender Eingriff möglich. Somit sind vor allem bei Aufträgen mit langen Durchführungszeiten die Eingriffsmöglichkeiten begrenzt. Weiterhin sind die Verfahren definitionsgemäß nicht imstande, prozessperiphere Verbraucher zu adressieren, die nicht über Aufträge gesteuert werden (vgl. Abschnitt 2.2.2). Aus diesem Grund bietet sich eine Ergänzung der Auftragsfreigabe und Reihenfolgebildung um ein

7.1 Konfiguration der Produktionssteuerung

zusätzliches Lastmanagementverfahren an, das zur Steuerung des Lastgangs während der Auftragsbearbeitung eingesetzt wird.

Aus diesen Erwägungen resultiert die in Abbildung 51 dargestellte Aufteilung und Kaskadierung der Steuerungsverfahren entlang der Prozessebenen. Die Auftragsfreigabe und die Reihenfolgebildung wirken über die Produktionsaufträge direkt auf den Materialfluss und stehen daher in Wechselwirkung mit diesem bzw. der Ausbringungsmenge der Produktion. Da die Auslösung nur nach Beendigung eines Auftrags erfolgt, sind diese Verfahren am Anfang der Steuerungskaskade zu verorten. Das Lastmanagement wirkt hingegen auf die Prozessperipherie, die den Materialfluss nicht unmittelbar beeinträchtigt. Die Auslösung des Lastmanagements kann entweder in kurzen Zyklen oder ereignisbasiert durch die Identifikation kritischer Abweichungen erfolgen.



Legende: $P(t)_{\text{Plan}}$: Geplanter Lastgang bzw. Fahrplan

$P(t)_{\text{Ist}}$: Tatsächlicher Lastgang

Abbildung 51: Konfiguration der Steuerungsverfahren als Kaskade

Die in Abschnitt 7.2 vorgestellte *energieorientierte Reihenfolgebildung* steuert die tatsächliche Bearbeitungssequenz der Aufträge an den einzelnen Fertigungsmitteln derart, dass Lastgangabweichungen minimiert werden. Ergänzend werden im Zuge der *hybriden energieorientierten Auftragsfreigabe* (vgl. Abschnitt 7.3) die genauen Starttermine der Aufträge für die Produktion unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit elektrischer Energie festgelegt. Dabei wird innerhalb des durch die Liefertermine definierten Zeitfensters eine zeitliche Synchronisation zwischen dem Auftragsstart und dem Lastgang erreicht, um somit Lastgangabweichungen zu reduzieren.

Dem Lastmanagement (vgl. Abschnitt 7.4) wird insbesondere die Steuerung der Arbeitsintensität der Betriebsmittel zur Lastganganpassung zugeordnet. Folglich wird die Kapazitätssteuerung in der vorliegenden Arbeit mit dem Lastmanagement gleichgesetzt. Durch die Berücksichtigung des aktuellen Produktionszu-

7 Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung

stands wird ein *situatives Lastmanagement* entwickelt, das gezielt auf jenen Fabrikbereich beschränkt wird, der keine Auswirkungen auf den Ist-Abgang der Produktion hat. So wird verhindert, dass Einsparungen der Energiekosten durch anderweitige Mehrkosten, wie beispielsweise Konventionalstrafen, aufgewogen werden (SCHULTZ et al. 2015b).

7.2 Energieorientierte Reihenfolgebildung

7.2.1 Allgemeines

Mit der energieorientierten Reihenfolgebildung wird das Ziel verfolgt, eine Priorisierung der Aufträge in Abhängigkeit des auftragsspezifischen Leistungsbedarfs vorzunehmen. Als Ergebnis stellt die energieorientierte Reihenfolgebildung für jedes Fertigungsmittel eine nach Priorität sortierte Auftragsliste bereit, die bei Einhaltung der vorgegebenen Sequenz die Abweichungen vom Soll-Lastgang, wie in Abbildung 52 dargestellt, minimiert (SCHULTZ et al. 2016c).

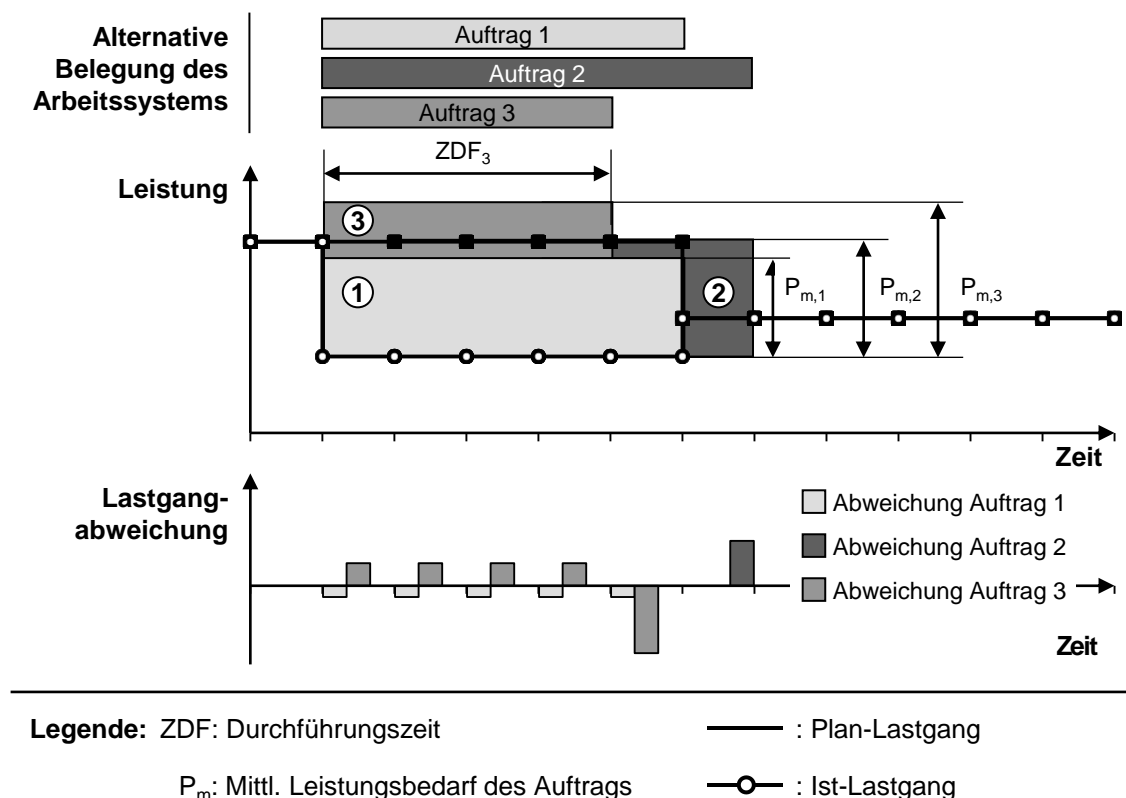


Abbildung 52: Wirkungsweise der energieorientierten Reihenfolgebildung

7.2 Energieorientierte Reihenfolgebildung

Um die Einhaltung des untertägigen Lastgangs gewährleisten zu können, ist es erforderlich, dass die energieorientierte Produktionssteuerung innerhalb eines kurzen Zeithorizontes in den Produktionsablauf eingreift. Um die Flexibilität der Produktionssteuerung zu erhöhen, liegt es daher nahe, die Reihenfolgebildung nicht – wie vielfach üblich – nur an dem ersten Fertigungsmittel eines Auftragsnetzes durchzuführen, sondern an jeder einzelnen Station des Auftrags erneut vorzunehmen. Die Sequenzierung geht somit der dezentralen Auftragsfreigabestufe innerhalb der Warteschlange eines einzelnen Fertigungsmittels voraus (SCHULTZ et al. 2017). Auf diese Weise nimmt zwar die Wahrscheinlichkeit von Reihenfolgevertauschungen zu, was wiederum in einer höheren Streuung der Durchlaufzeiten einzelner Aufträge resultiert, jedoch wird dies im Hinblick auf das Zielsystem der energieorientierten Produktionssteuerung in Kauf genommen, sofern die Termintreue der Aufträge nicht gefährdet wird.

Entsprechend der Gesamtzielsetzung der zu entwickelnden energieorientierten Produktionssteuerung (vgl. Abschnitt 3.6) gilt für die Reihenfolgebildung, dass die Termintreue das bestimmende Kriterium bei der Verfahrensauslegung darstellt. Insofern bietet es sich an, die Entwicklung einer energieorientierten Reihenfolgebildung auf Grundlage eines Sequenzierungsansatzes durchzuführen, welcher der Einhaltung oder der Steigerung der Termintreue dient (vgl. Abbildung 53).

Verfahren zur Reihenfolgebildung	Primäre adressierte Zielgröße
First-in-First-Out (FIFO)	
Frühester Plan-Starttermin (FPS)	Termintreue
Frühester Plan-Endtermin (FPE)	
Geringster Restschlupf	
Extended Work in Next Queue (XWINQ)	Leistung
Rüstzeitoptimierte Reihenfolgebildung	
Kürzeste Operationszeit (KOZ)	Bestand/Durchlaufzeit

*Abbildung 53: Übersicht über Verfahren der Reihenfolgebildung
in Anlehnung an LÖDDING (2008)*

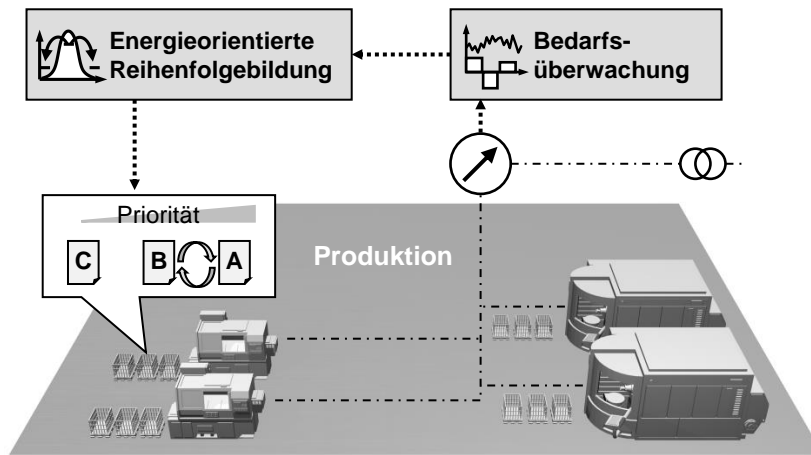
7 Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung

Als Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung ist die in der Literatur umfassend beschriebene *Schlupfzeitregel* (*geringster Restschlupf*) ausgewählt worden, bei der ein Auftrag umso höher priorisiert wird, je geringer die verbleibende Zeit bis zu dessen Liefertermin ist. Einen vergleichbaren Ansatz wählen auch WILLEKE et al. (2015b & 2016), deren Reihenfolgeregel jedoch weiterentwickelt werden muss, um sich in das Gesamtsystem der energieorientierten Produktionssteuerung einzufügen. Die Priorisierung gemäß dem geringsten Restschlupf zielt nicht auf eine exakte Umsetzung des Produktionsplans, sondern folgt der Prämisse, dass Verzögerungen bei einem einzelnen Auftrag eher zur Lieferverspätungen führen, wenn dessen verbleibende Schlupfzeit gering ist. Im Gegensatz zu anderen Verfahren, wie beispielsweise einer Priorisierung nach dem First-in-First-out-Prinzip (FIFO) oder nach dem frühesten Plan-Starttermin, erlaubt die Schlupfzeitregel während der Produktion eine reaktive Reihenfolgevertauschung infolge äußerer Ereignisse. Aus diesem Grund bietet sie die geeignete Grundlage für eine energieorientierte Erweiterung der Sequenzierung.

7.2.2 Verfahren zur energieorientierten Reihenfolgebildung

Zur Festlegung der Bearbeitungssequenz wird anhand zu definierender und mathematisch zu modellierender Kriterien für jeden Auftrag eine Prioritätszahl *PZ* errechnet und die Aufträge entsprechend dieses Kennwertes sortiert. Anschließend werden zunächst Aufträge mit einem hohen Prioritätskennwert für die Bearbeitung freigegeben (SCHULTZ et al. 2016c). Wird am Fertigungsmittel die Fertigstellung des letzten Auftrags gemeldet, so erfolgt auf Basis des aktuellen Produktionszustands eine Neuberechnung der Prioritäten.

Die Grundidee der energieorientierten Reihenfolgeregel sieht an dieser Stelle vor, bei der Auftragspriorisierung neben der Termintreue, d. h. dem Liefertermin, auch die Lastgangabweichungen als Zielgröße zu berücksichtigen (vgl. Abbildung 54). Dazu setzt die Reihenfolgeregel auf der informationstechnischen Basis der in Abschnitt 5.2 dargelegten Referenzarchitektur auf. Entsprechende werden für jeden Auftrag dessen Plan-Liefertermin, mittlerer Leistungsbedarf sowie Plan-Durchführungszeit zur Anwendung des Verfahrens vorausgesetzt.



Legende: $\cdots\rightarrow$: Information $\cdots\cdots$: Elektrische Energie \longrightarrow : Material
 \odot : Energiezähler $\circ\circ$: Energieversorgung \square : Auftrag

Abbildung 54: Energieorientierte Reihenfolgebildung

Zur Ermittlung des Prioritätskennwerts eines Auftrags erfolgt bei der energieorientierten Reihenfolgeregel eine Erweiterung der in der Literatur beschriebenen Schlupfzeitregel um einen zusätzlichen Term, der die Abweichungen vom Soll-Lastgang bewertet. Die Priorität eines Auftrags setzt sich somit aus einem Anteil gemäß des verbleibenden Restschlupfs sowie einem Anteil gemäß der zu erwartenden Lastgangabweichung bei Freigabe des Auftrags zusammen. Beide sind über einen Gewichtungsfaktor miteinander verknüpft (SCHULTZ et al. 2016c). Es gilt der Zusammenhang in Formel (12):

$$PZ_k = (1 - \alpha) * PZ_{Schlupf,k} + \alpha * PZ_{Last,k} \quad (12)$$

mit	PZ_k	Prioritätskennwert des Auftrags k
	$\alpha \in [0;1]$	Gewichtungsfaktor
	$PZ_{Schlupf,k}$	Prioritätskennwert des Auftrags k gemäß der verbleibenden Schlupfzeit
	$PZ_{Last,k}$	Prioritätskennwert des Auftrags k gemäß der zu erwartenden Lastgangabweichung

WILLEKE et al. (2016) schlagen einen Gewichtungsfaktor α zur logistischen Positionierung zwischen den klassischen Zielgrößen und den Energiezielen vor, der die jeweilige Präferenz des Unternehmens abbildet. Je höher der Gewichtungsfaktor gewählt wird, desto signifikanter ist der Einfluss von Lastgangabweichungen auf die Auftragspriorisierung. Wird der Faktor α dagegen zu Null gewählt, geht die energieorientierte Reihenfolgeregel in die einfache Schlupfzeitregel über.

7 Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung

Nach LÖDDING (2008) errechnet sich die verbleibende Schlupfzeit eines Auftrags gemäß Formel (13):

$$SZ = TAE_{Plan} - TP_0 - \sum_{j=AktAVO+1}^{AnzAVO} ZDF_j - \sum_{j=AktAVO+1}^{AnzAVO} ZUE_{min,j} \quad (13)$$

mit	SZ	Schlupfzeit
	TAE_{Plan}	Plan-Bearbeitungsende des Auftrags
	TP_0	Planungszeitpunkt
	ZDF_j	Durchführungszeit des Arbeitsvorgangs j
	$ZUE_{min,j}$	Mindestübergangszeit des Arbeitsvorgangs j
	$AktAVO$	Index des aktuellen Arbeitsvorgangs
	$AnzAVO$	Anzahl der Arbeitsvorgänge des Auftrags

Um die Vergleichbarkeit zwischen beiden Anteilen der Prioritätszahl zu gewährleisten, erfolgt jeweils eine Normierung der Kriterien. Die Schlupfzeit eines einzelnen Auftrags wird dazu anhand der maximalen auftretenden Schlupfzeit innerhalb dieser Warteschlange normiert (SCHULTZ et al. 2017). Folglich resultiert für den einzelnen Auftrag aus einem verhältnismäßig hohen verbleibenden Restschlupf ein geringer Prioritätswert. Entsprechend gilt für den Schlupfzeitanteil die Formel (14):

$$PZ_{Schlupf,k} = \left(1 - \frac{SZ_k}{|SZ_{max}|}\right) \quad (14)$$

mit	SZ_k	Schlupfzeit des Auftrags k
	SZ_{max}	Maximale Schlupfzeit eines Auftrags innerhalb der Warteschlange

Demgegenüber ist für den zweiten Anteil der Prioritätsbewertung die Lastgangabweichung maßgeblich, die der Bearbeitungsstart des Auftrags unter Berücksichtigung des aktuellen Produktionsstatus verursachen würde. Der Lastgang wird zu diesem Zweck stückweise in Prognoseintervallen der Länge t_{Basis} betrachtet (vgl. Abschnitt 7.3.3). Für jeden einzelnen Auftrag in der Warteschlange werden alle Prognoseintervalle, in denen der Auftrag bearbeitet wird, auf Lastgangabweichungen hin untersucht und bewertet. Dabei ist es möglich, eine Bewertung entweder auf Basis der absoluten Lastgangabweichungen oder auf Basis der abweichungsbedingten Mehrkosten anhand des in Abschnitt 6.4.3 entwickelten Kostenmodells vorzunehmen.

Die *Auftragspriorisierung anhand absoluter Lastgangabweichungen* sieht vor, den Betrag der Abweichungen eines Auftrags vom Soll-Lastgang über alle Prognoseintervalle aufzusummieren und anhand der größten auftretenden Gesamtabweichung zu normieren (SCHULTZ et al. 2016c). Für jedes Prognoseintervall wird durch die Aufsummierung des auftragspezifischen Leistungsbedarfs auf den durch die Maschinenbelegung reservierten Lastgang (vgl. Abschnitt 6.4.1) die Erwartung des Gesamtleistungsbedarfs aktualisiert und dessen Abweichung vom Soll-Lastgang ermittelt. Es gilt die Formel (15):

$$LGA_i = LG_i + P_{m,k,i} - SLG_i \quad (15)$$

mit	LGA_i	Lastgangabweichung im Intervall i
	LG_i	Lastgang im Intervall i
	$P_{m,k,i}$	Leistungsbedarf des Auftrags k im Intervall i
	SLG_i	Soll-Lastgang im Intervall i

Da das Kostenmodell für die abweichungsbedingten Mehrkosten in vielen Fällen spiegelsymmetrisch um den Planungspunkt ist (vgl. Abschnitt 6.4.3), werden positive und negative Lastgangabweichungen gleich bewertet. Dazu ist es erforderlich, dass die Prognoseintervalle wie vorgeschlagen mit den Abrechnungsintervallen des Energieversorgers zusammenfallen.

Die Summation aller Einzelabweichungen hat zur Folge, dass bei Aufträgen mit langen Durchführungszeiten auch dann hohe Gesamtabweichungen ermittelt werden, wenn die Einzelabweichungen in den Intervallen vergleichsweise gering sind. Um diese unverhältnismäßige Bestrafung langer Durchführungszeiten zu vermeiden, wird die Gesamtabweichung eines Auftrags auf dessen Gesamtdurchlaufzeit bezogen. Darüber hinaus besteht infolge der Diskretisierung in einzelne Prognoseintervalle die Wahrscheinlichkeit, dass ein Auftrag zum Bearbeitungsbeginn oder -ende zwar anteilig, jedoch nicht vollständig in einem der Intervalle ausgeführt wird. Um daher eine Überbewertung von Abweichungen in einzelnen Intervallen zu verhindern, wird nur der tatsächliche Durchführungszeitanteil innerhalb des Intervalls gewertet. Aufgrund dieser Abwägungen gelten für die Berechnung der Prioritätszahl anhand absoluter Lastgangabweichungen die Zusammenhänge der Formeln (16) und (17):

7 Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung

$$PZ_{Last,1,k} = \frac{\sum_{i=1}^j \left(|LGA_i| * \frac{ZDF_{k,i}}{ZDF_{k,ges}} \right)}{|LGA_{max}|} \quad (16)$$

$$\text{mit } LGA_{max} = \max \left(\sum_{i=1}^j \left(|LGA_i| * \frac{ZDF_{k,i}}{ZDF_{k,ges}} \right) \right) \quad (17)$$

$PZ_{Last,1,k}$	Prioritätskennwert des Auftrags k gemäß der absoluten Lastgangabweichungen
LGA_i	Lastgangabweichung im Intervall i
LGA_{max}	Maximale Gesamtlastgangabweichung eines Auftrags in der Warteschlange
$ZDF_{k,i}$	Durchführungszeit des Auftrags k im Intervall i
$ZDF_{k,ges}$	Gesamtdurchführungszeit des Auftrags k

Alternativ ist eine *Auftragspriorisierung anhand abweichungsbedingter Mehrkosten* möglich, bei der die absoluten Lastgangabweichungen für jedes Prognoseintervall über die jeweilige Kostenfunktion bewertet werden. Daher stellt der Ansatz eine Erweiterung des vorhergehenden Priorisierungsverfahrens dar. Dabei gelten dieselben Einschränkungen bezüglich der anteiligen und der gesamten Durchführungszeit wie zuvor. Sofern mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden kann, wie die Kostenfunktion für Lastgangabweichungen in den einzelnen Prognoseintervallen verläuft, bietet sich der Einsatz des zweiten Priorisierungsansatzes an. Ist dies auf Grund der in Abschnitt 6.4.2 dargelegten Herausforderungen nicht möglich, kann stattdessen auf den vereinfachten Priorisierungsansatz anhand absoluter Lastgangabweichungen zurückgegriffen werden. Für die Berechnung des Prioritätskennwerts anhand abweichungsbedingter Mehrkosten gelten somit die Formeln (18) und (19):

$$PZ_{Last,2,k} = \frac{\sum_{i=1}^j \left(|LGA_i| * K_{\Delta,i}(LGA_i) * \frac{ZDF_{k,i}}{ZDF_{k,ges}} \right)}{|LGA * K_{\Delta,max}|} \quad (18)$$

$$\text{mit } K_{\Delta,max} = \max \left(\sum_{i=1}^j \left(|LGA_i| * K_{\Delta,i}(LGA_i) * \frac{ZDF_{k,i}}{ZDF_{k,ges}} \right) \right) \quad (19)$$

$PZ_{Last,2,k}$	Prioritätskennwert des Auftrags k gemäß der abweichungsbedingten Mehrkosten
LGA_i	Lastgangabweichung im Intervall i
$K_{\Delta,i}(x)$	Funktion der Mehrkosten im Intervall i
$ZDF_{k,i}$	Durchführungszeit des Auftrags k im Intervall i
$ZDF_{k,ges}$	Gesamtdurchführungszeit des Auftrags k
$K_{\Delta,max}$	Maximale abweichungsbedingte Mehrkosten

7.3 Hybride energieorientierte Auftragsfreigabe

7.3.1 Allgemeines

Das Ziel der hybriden energieorientierten Auftragsfreigabe ist es, den Zeitpunkt für den tatsächlichen Produktionsstart eines Auftrags unter Berücksichtigung des aktuellen Lastgangs des Unternehmens zu determinieren. Die elektrische Energie wird dabei als begrenzte Ressource aufgefasst, die, entsprechend des in der Produktionsplanung festgelegten Energiebedarfs, während der Bearbeitung zur Verfügung stehen muss. Die Verfügbarkeit der elektrischen Energie ergibt sich dabei aus der Differenz zwischen dem Fahrplan und der auf Basis aktueller Daten ermittelten Lastgangprognose. Während des Freigabeprozesses wird diese Differenz durch einen zeitlichen Feinabgleich des Starttermins minimiert.

Um eine hohe Flexibilität und somit eine hohe Anpassungsfähigkeit bei der Synchronisation zwischen dem Soll- und dem Ist-Lastgang zu erreichen, erfolgt für jeden einzelnen Arbeitsvorgang die energieorientierte Freigabe dezentral am jeweiligen Fertigungsmittel. Die dezentrale Freigabestufe wird ereignisbasiert durch die Fertigstellung eines Arbeitsvorgangs am betreffenden Fertigungsmittel aktiviert (SCHULTZ et al. 2015a). Das Verfahren weist somit einen hohen Detaillierungsgrad auf (LÖDDING 2008). Da die energieorientierte Freigabe die Umlaufbestände vor den Fertigungsmitteln nicht berücksichtigt, bietet sich der ergänzende Einsatz einer zentralen Freigabestufe an, durch die der Zugang zu den Warteschlangen geregelt und ein unnötiges Aufstauen vermieden wird. Aufgrund dieser Kombination einer zentralen und einer dezentralen Stufe ist das entwickelte Verfahren als hybride Auftragsfreigabe zu charakterisieren (vgl. Abbildung 55).

7 Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung

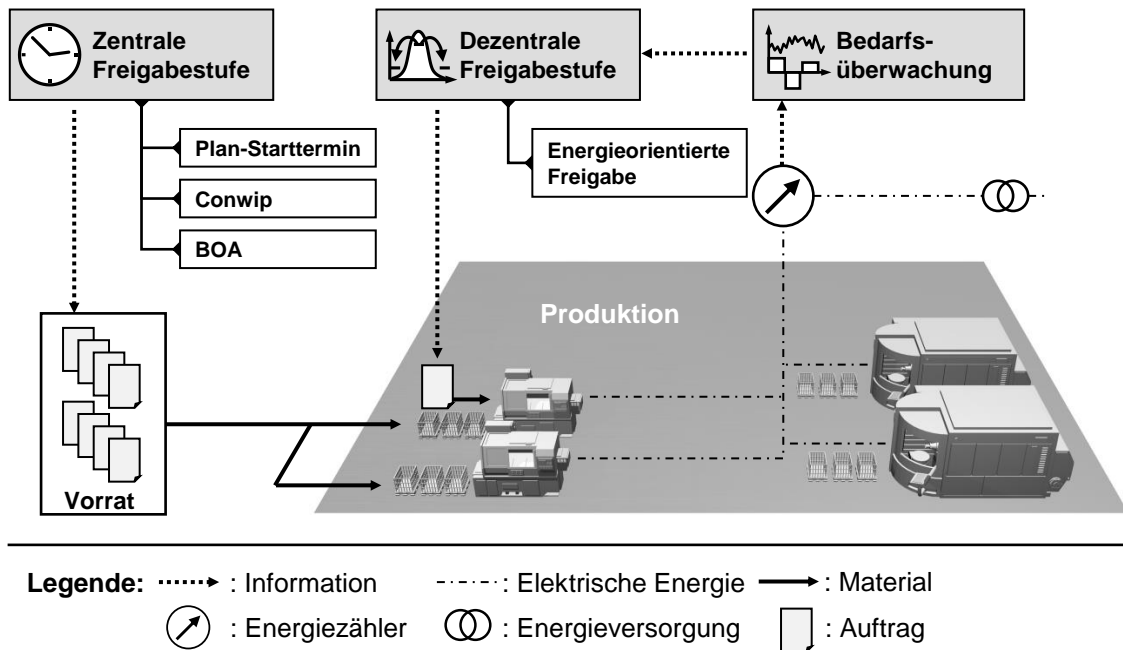


Abbildung 55: Aufbau und Funktion der hybriden energieorientierten Auftragsfreigabe

Zeitlich betrachtet wird zwischen den beiden Freigabestufen die Reihenfolgebildung innerhalb der Warteschlangen vorgenommen (vgl. Abschnitt 7.2), sodass durch die Parametrierung der zentralen Freigabe auch der Lösungsraum für die anschließende Sequenzierung beeinflusst wird (LÖDDING 2008). Eine starke Minimierung der Umlaufbestände reduziert gegebenenfalls die Wirksamkeit der energieorientierten Reihenfolgebildung und sollte bei der Auswahl eines Freigabeverfahrens berücksichtigt werden.

7.3.2 Zentrale Freigabestufe

Die erste Auftragsfreigabestufe erfolgt zentral für den gesamten betrachteten Produktionsbereich und legt fest, wann ein Auftrag aus dem geplanten Zugang (Auftragsvorrat) in die Warteschlange eines Arbeitssystems übergeben wird. Somit nimmt diese Stufe maßgeblichen Einfluss auf den Umlaufbestand in den Warteschlangen. Weiterhin wird mit der zentralen Freigabe das erforderliche Material, nicht jedoch die elektrische Energie, einem einzelnen Auftrag zugeordnet und für diesen reserviert. Als Kriterien für die zentrale Freigabestufe kommen insbesondere die Dringlichkeit des Auftrags, d. h. der Starttermin, oder die Auftragsbestände der Warteschlangen in Betracht.

Die Auslösung der *terminorientierten Auftragsfreigabe* erfolgt, wenn der Plan-Starttermin eines Auftrags bzw. der auftragsspezifische Vorgriffshorizont erreicht oder überschritten ist und zusätzlich die Verfügbarkeit des erforderlichen Materials gegeben ist. Das Verfahren weist in der Praxis eine weite Verbreitung auf, da es einerseits als Standard in den meisten kommerziellen PPS-Systemen implementiert ist und andererseits die Verfahrensregeln einfach umzusetzen sind. Die terminorientierten Auftragsfreigabe reagiert weder auf Störungen noch auf Bestandszuwächse. Grundsätzlich ist das Verfahren in der Praxis jedoch dann anwendbar, wenn eine akkurate Planung der Auftragsstarttermine erfolgt (LÖDDING 2008). Da die Erstellung einer Lastgangprognose im Rahmen der Produktionsplanung eine Feinterminierung der Aufträge erfordert (vgl. Abschnitt 3.2.2 und Abschnitt 3.6), kann diese Voraussetzung als erfüllt betrachtet werden.

Bei *bestandsregelnden Auftragsfreigabeverfahren* richtet sich die Freigabe dagegen nach dem Auftragsabgang aus der Produktion und wird ausgelöst, wenn eine zuvor definierte Bestandsgrenze global oder an einem bestimmten Fertigungsmittel unterschritten ist. Aufträge, deren Plan-Starttermin erreicht oder überschritten ist, werden dann bis zum Erreichen der Bestandsgrenze freigegeben. Da die Bestände somit nicht unkontrolliert anwachsen können, wird eine höhere Robustheit gegenüber Planabweichungen erreicht und Überbelastung von Fertigungsmitteln vermieden. Zu den typischen Verfahren für die zentrale bestandsregelnde Auftragsfreigabe zählen beispielsweise Conwip und die belastungsorientierte Auftragsfreigabe. Weitere Verfahrensvarianten finden sich in der einschlägigen Fachliteratur (HOPP & SPEARMAN 2008, LÖDDING 2008).

Mit dem Conwip-Verfahren (Constant-Work-in-Progress) wird das Ziel verfolgt, den Umlaufbestand in der Produktion konstant zu halten. Sobald der Bestand, der sich beispielsweise in der Anzahl der Teile, der Anzahl der Aufträge oder der Summe der Vorgabestunden bemisst, unter eine zuvor definierte Grenze fällt, werden neue Aufträge freigegeben, sofern deren Plan-Starttermin erreicht ist. In der Praxis lässt sich die Conwip-Steuerung über einfache Conwip-Karten umsetzen, ohne welche die Freigabe eines Auftrags nicht erteilt werden darf. Die Conwip-Karten laufen dabei mit dem Auftrag durch die Produktion und werden erst bei dessen Fertigstellung wieder zurückgeführt. Auf diese Weise wird der Gesamtumlaufbestand der Produktion über die Anzahl der Conwip-Karten begrenzt. Vielfach werden die physischen Conwip-Karten inzwischen durch Softwarelösungen ersetzt. (HOPP & SPEARMAN 2008, LÖDDING 2008)

7 Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung

Dagegen lässt sich eine lokale Bestandsregelung am einzelnen Fertigungsmittel anhand der belastungsorientierten Auftragsfreigabe (BOA) realisieren. Die Freigabe eines Auftrags erfolgt dabei nur dann, wenn an keinem der Fertigungsmittel, die dieser Auftrag durchlaufen muss, die Bestandsgrenze verletzt wird (LÖDDING 2008, NYHUIS & WIENDAHL 2012). Jedem Fertigungsmittel wird dazu ein Bestandskonto zugewiesen, das durch die Buchungsauftragszeit freigegebener Aufträge belastet wird. Als zentrales Element der BOA werden Aufträge, die sich nicht unmittelbar in der Warteschlange eines Fertigungsmittels befinden, sondern zunächst noch vorgelagerte Schritte durchlaufen müssen, anhand eines Abzinsungsfaktors abgewertet. Somit wird die Buchungszeit der jeweiligen Aufträge reduziert. Auf dem Bestandskonto eines Fertigungsmittels werden alle Aufträge des gesamten Umlaufbestandes verbucht, die dort im Zeitverlauf bearbeitet werden (BECHTE 1984). Das Verfahren begrenzt sowohl direkt den Bestand einzelner Fertigungsmittel als auch indirekt den Gesamtbestand der Produktion. Die genaue Konfiguration der BOA und insbesondere des zu verwendenden Abzinsungsfaktors gestaltet sich in der Praxis oftmals schwierig und wird deshalb vielfach lediglich durch Ausprobieren vorgenommen (NYHUIS & WIENDAHL 2012).

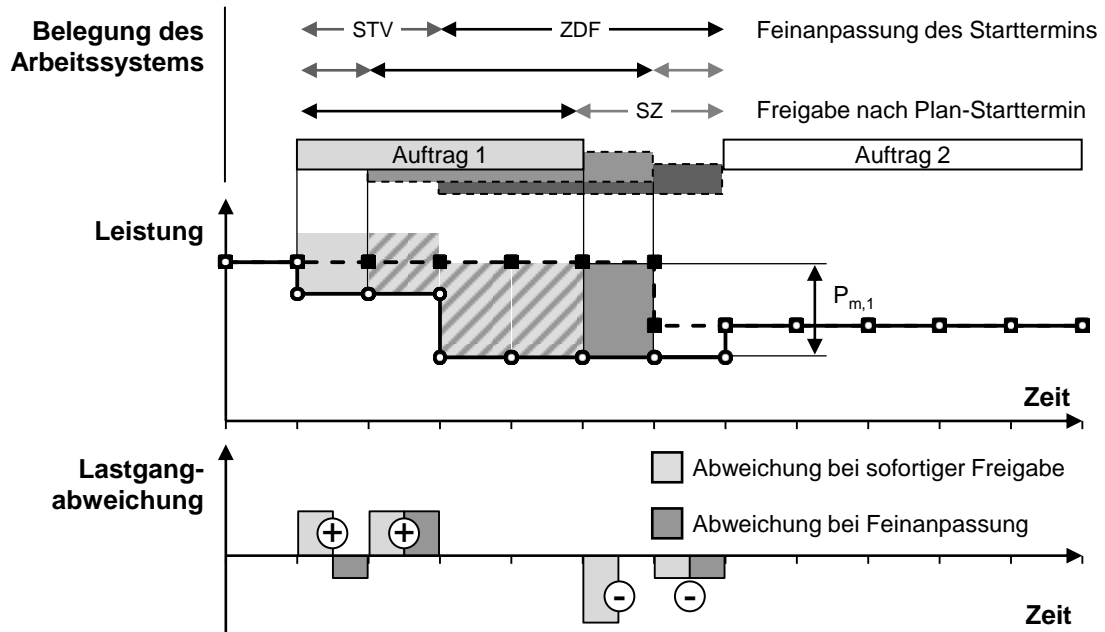
Die Wahl für ein spezifisches Verfahren als zentrale Freigabestufe ist im einzelnen Anwendungsfall von der konkreten logistischen Zielsetzung abhängig (NYHUIS et al. 2010). Für eine Diskussion der Stärken und Schwächen der unterschiedlichen Verfahrensvarianten für die konventionellen Kriterien *Termin* und *Bestand* sei an dieser Stelle auf die weiterführende Literatur verwiesen (z. B. HOPP & SPEARMAN 2008, LÖDDING 2008).

7.3.3 Dezentrale energieorientierte Freigabestufe

7.3.3.1 Allgemeines

Mit der dezentralen Freigabestufe wird die Auftragsfreigabe um das Kriterium der *Energieverfügbarkeit* erweitert. Dabei wird durch die Verschiebung des Auftragsstarttermins ein zeitlicher Feinabgleich zwischen dem spezifizierten Plan-Lastgang und dem erwarteten Ist-Lastgang mit dem vorrangigen Ziel vorgenommen, Lastgangabweichungen zu minimieren (SCHULTZ et al. 2016c). Die energieorientierte Freigabe erfolgt dezentral am einzelnen Fertigungsmittel, nachdem die Reihenfolgebildung innerhalb der Warteschlange stattgefunden hat. Im Zuge der Freigabestufe wird der Auftrag ausgewählt, dem gemäß der Reihen-

folgebildung die höchste Priorität zugewiesen wird. Ferner wird ermittelt, ob der zu erwartende Ist-Lastgang durch den unmittelbaren Bearbeitungsbeginn den Toleranzbereich des Soll-Lastgangs verletzt; gegebenenfalls wird eine Verschiebung des Starttermins initiiert (vgl. Abbildung 56).



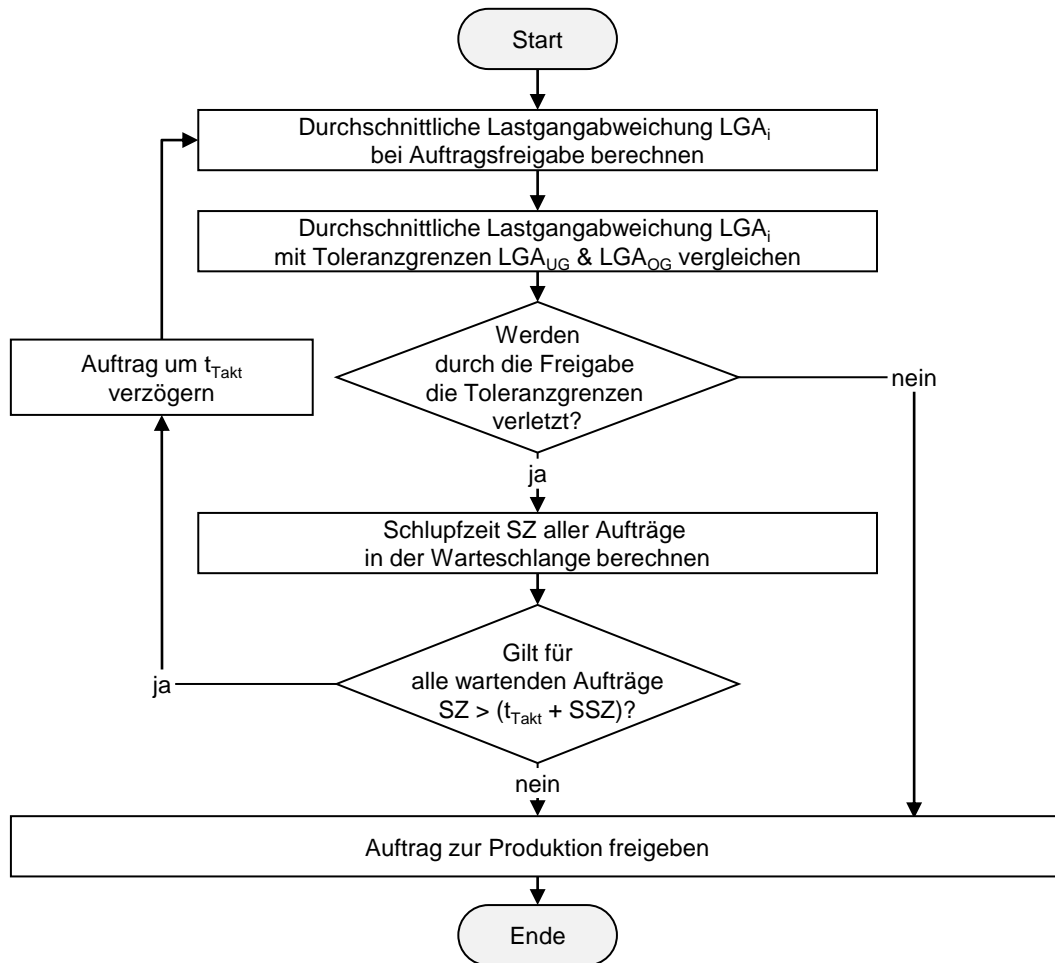
Legende: ZDF : Durchführungszeit - ■ - : Plan-Lastgang
 STV : Startterminverschiebung -○- : Ist-Lastgang
 SZ : Schlupfzeit P_m: Mittl. Leistungsbedarf des Auftrags

Abbildung 56: Wirkungsweise der dezentralen energieorientierten Freigabestufe

7.3.3.2 Beschreibung des Verfahrens

Die energieorientierte Auftragsfreigabe wird durch die Fertigstellung eines Auftrags an einem Fertigungsmittel ausgelöst, vorausgesetzt, in der Warteschlange des betreffenden Systems befindet sich mindestens ein Auftrag. Andernfalls wird der Freigabeprozess durch den Zugang eines neuen Auftrags in die Warteschlange veranlasst. Nach der Auslösung folgt die dezentrale Freigabestufe dem in Abbildung 57 dargestellten Ablauf, der bis zur letzten Freigabe des Auftrags zyklisch durchlaufen wird. Der Betrachtungsgegenstand ist dabei immer der nächste zur Bearbeitung anstehende Produktionsauftrag, der durch die Prioritätsbildung in der vorangestellten Sequenzierung prädisponiert wird.

7 Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung



Legende: : Start/Ende : Operation : Entscheidung

Abbildung 57: Schematischer Ablauf der dezentralen energieorientierten Auftragsfreigabe

Dabei wird ebenso wie bei der Reihenfolgebildung vorausgesetzt, dass auf der Grundlage der aktuell bereits bearbeiteten sowie der geplanten Produktionsaufträge die für den Entscheidungshorizont erforderlichen Energiemengen, z. B. bis zum Ende des Arbeitstages, bekannt sind und in Form einer Lastgangprognose dargestellt werden können (vgl. Abschnitt 6.3). Weiterhin ist eine Abschätzung des mittleren Leistungsbedarfs des betrachteten Auftrags an dem jeweiligen Fertigungsmittel erforderlich. Hierzu muss der auftragspezifische Leistungsbedarf in den Stammdaten hinterlegt sein (vgl. Abschnitt 5.3.3).

Der Verfahrensablauf sieht vor, dass der Auftrag mit der höchsten Priorität innerhalb der Warteschlange herangezogen und anhand der Stammdaten eine Prognose über dessen mittleren Leistungsbedarf während der Durchführungszeit berechnet wird. Die Durchführungszeit wird dazu gemäß der a priori zu

definierenden Länge t_{Basis} eines Prognoseintervalls (vgl. Abschnitt 6.3) in einzelne Zeitscheiben aufgeteilt und ein erwarteter mittlerer Leistungswert $P_{m,i}$ für jede Zeitscheibe ermittelt. Dabei gilt der Zusammenhang in Formel (20):

$$P_{m,k,i} = \frac{\int_{T_{0,i}}^{T_{0,i+1}} P_k(t) dt}{t_{Basis}} \quad (20)$$

mit	$P_{m,k,i}$	Mittlerer Leistungsbedarf des Auftrags k im Intervall i
	$P_k(t)$	Zeitlicher Leistungsbedarf des Auftrags k
	t_{Basis}	Dauer eines Intervalls
	$T_{0,i}$	Startzeitpunkt des Intervalls i
	$T_{0,i+1} = T_{0,i} + t_{Basis}$	Endzeitpunkt des Intervalls i

Ebenso wie für die energieorientierte Reihenfolgebildung wird für jedes Prognoseintervall die zu erwartende Lastgangabweichung nach Formel (15) berechnet (vgl. Abschnitt 7.2.2). Übersteigen die Abweichungen in keinem der Prognoseintervalle die oberen und unteren Toleranzgrenzen ($LGA_{UG,i}$, $LGA_{OG,i}$) des Soll-Lastgangs, erfolgt die unmittelbare Auftragsfreigabe. Liegt hingegen eine Verletzung vor, wird in einem folgenden Schritt die Schlupfzeit der Aufträge überprüft. Weisen alle vor dem Fertigungsmittel wartenden Aufträge eine verbleibende Restschlupfzeit auf, die unter Berücksichtigung einer Sicherheitsschlupfzeit SSZ größer ist als der gewählte Freigabetakt t_{Takt} , so erfolgt einer Verzögerung des Auftragsstarttermins um genau einen Takt und der Verfahrensablauf wird von Neuem begonnen. Andernfalls erfolgt die sofortige Auftragsfreigabe (SCHULTZ et al. 2017). Die Sicherheitsschlupfzeit (SSZ) dient dabei dem Zweck, Unsicherheiten und ungewollte Verzögerungen im weiteren Materialfluss des Auftrags aufzufangen. Dabei bietet sich an, die SSZ umso kleiner zu wählen, je näher der Auftrag seiner Fertigstellung steht. Die Werte für den Freigabetakt sind in Abhängigkeit der Zielsetzung frei parametrierbar (SCHULTZ et al. 2016c). Dabei muss im Einzelfall zwischen dem erhöhten Rechenaufwand, der mit einem kurzen Takt einhergeht, und reduzierte Genauigkeit des Feinabgleichs bei langem Takt abgewogen werden. Für die Verschiebung des Auftragsstarts gilt der Zusammenhang in Formel (21):

7 Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung

$$ST_{akt} = ST + \begin{cases} 0, & \text{wenn } t_{takt} > (SZ_k + SSZ_k) \forall k \in A \\ t_{takt}, & \text{wenn } t_{takt} \leq (SZ_k + SSZ_k) \forall k \in A \end{cases} \quad (21)$$

mit	ST_{akt}	Aktualisierter Starttermin des Auftrags
	ST	Plan-Starttermin des Auftrags
	t_{takt}	Freigabetakt
	SZ_k	Schlupfzeit des Auftrags k
	SSZ_k	Sicherheitsschlupfzeit des Auftrags k
	$k \in A$:	Menge des Auftragsvorrats
	$= \{1, \dots, A^{max}\}$	

Die beschriebenen Verfahren der Auftragsfreigabe und der Reihenfolgebildung sind geeignet, Lastgangabweichungen zu minimieren, indem in den Auftragsdurchlauf eingegriffen wird. Durch die Berücksichtigung der Schlupfzeit in beiden Ansätzen wird dabei vermieden, dass die Termintreue der Aufträge gefährdet wird. Die Auslösung beider Verfahren erfolgt immer ereignisbasiert bei Fertigstellung eines Auftrages. Da während der Bearbeitung anhand der Auftragsfreigabe und Reihenfolgebildung keine Anpassung des Lastgangs möglich ist, wirken sich kurze Durchlaufzeiten der einzelnen Aufträge grundsätzlich positiv auf die Wirksamkeit der Verfahren aus. Laufen dagegen nur wenige oder lange Aufträge durch die Produktion, ist eine zusätzliche Ergänzung um ein Lastmanagement sinnvoll, um unabhängig von der Auftragsbearbeitung Anpassungen des Lastgangs zuzulassen.

7.4 Situatives Lastmanagement

7.4.1 Allgemeines

Das Lastmanagement umfasst die zielgerichtete Steuerung einzelner Lasten zur Beeinflussung des Lastgangs (vgl. Abschnitt 2.3.4). Konkret werden dazu einzelne Betriebsmittel zeitweise in veränderte Betriebszustände, wie z. B. „Stand-by“ oder „Aus“, geschaltet, um somit deren Leistungsbedarf in Abhängigkeit der Lastgangabweichung anzupassen. Im Gegensatz zu den übrigen Verfahren der energieorientierten Produktionssteuerung wirkt das Lastmanagement direkt auf die jeweiligen Lasten und nicht indirekt über die Aufträge. Dabei nutzt das Lastmanagement die kurzfristige Kapazitätsflexibilität der Anlage und kann somit als eine Sonderform der Kapazitätssteuerung betrachtet werden.

Unternehmen, die derzeit ein Lastmanagement implementiert haben, verwenden dieses zumeist in Form statischer Prioritäten. Dazu wird eine feste Auswahl elektrischer Verbraucher getroffen, die bei einer Überschreitung von Eingriffsgrenzen gemäß einer fest definierten Prioritätsliste abgeschaltet werden (vgl. Abschnitt 3.3.2). Abgesehen von den Eingriffsgrenzen des Lastverlaufs können in statischen Lastmanagementsystemen bei der Aktivierung einer Maßnahme keine weiteren Informationen des aktuellen Produktionszustands berücksichtigt werden. Somit ist es möglich, dass aktive Produktionsanlagen von den Schaltvorgängen betroffen sind und zeitweise Unterbrechungen des Materialflusses verursacht werden. Dieses Vorgehen erscheint zur singulären Vermeidung kurzzeitiger hoher Lastspitzen geeignet, bei denen die Strafzahlungen durch multiplikative Effekte im Leistungspreis überproportional hoch liegen können (vgl. Abschnitt 2.3.1). Bei häufigerem Einsatz von statischen Prioritäts-schaltungen, die für eine dynamische Anpassung des Lastgangs erforderlich sind, drohen jedoch Produktionsausfälle, deren Opportunitätskosten wiederum die Einsparungen der Energiekosten übersteigen können. Das situative Lastmanagement ermittelt hingegen zum jeweiligen Zeitpunkt das Potenzial für Lastanpassungen aus dem aktuellen Produktionszustand heraus. Weiterhin wird das Lastmanagement auf Bereiche beschränkt, die zu diesem Zeitpunkt Teil der Prozessperipherie sind, um somit Unterbrechungen des Materialflusses zu vermeiden.

Im Allgemeinen ist das Potenzial für Lastverschiebungen in einem einzelnen Unternehmen stark begrenzt, da nicht jeder elektrische Verbraucher für eine Lastverschiebung geeignet ist. Um Produktionsausfälle und somit Opportunitätskosten zu vermeiden, ist es erforderlich, dass die Eingriffe in den Betriebszustand von Energieverbrauchern den Wertschöpfungsprozess nicht beeinflussen. Folglich darf das Lastmanagement die Termintreue der Produktion nicht herabsetzen (PAULUS & BORGGREFE 2011). Aus diesem Grund ist es erforderlich, das Lastmanagement auf Betriebsmittel zu beschränken, die in irgendeiner Form zur Zwischenspeicherung ihres Produktes fähig sind (DENA 2012, FERNANDEZ et al. 2013). Diese Prämisse limitiert das Lastmanagementpotenzial erheblich. Die Einsatzhäufigkeit der Lastmanagementmaßnahmen ist in der Regel begrenzt, da zwischen zwei aufeinanderfolgenden Aktivierungen derselben Maßnahme oftmals eine Nachholungszeit erforderlich ist, z. B. um den jeweiligen Speicher wieder aufzufüllen (DENA 2012, POPP et al. 2016).

7 Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung

Die Herausforderung des Lastmanagements liegt infolgedessen darin, das endliche Lastverschiebungspotenzial des Unternehmens bestmöglich einzusetzen. Um über den Einsatz einzelner Maßnahmen zu entscheiden, ist es notwendig, eine Prognose über den restlichen Betrachtungszeitraum, wie z. B. eine Schicht oder einen Arbeitstag, durchzuführen, damit das begrenzte Maßnahmenportfolio zielgerichtet zum bestmöglichen Zeitpunkt genutzt wird (vgl. Abschnitt 6.3). Der schematische Ablauf des situativen Lastmanagements ist in Abbildung 58 dargestellt.

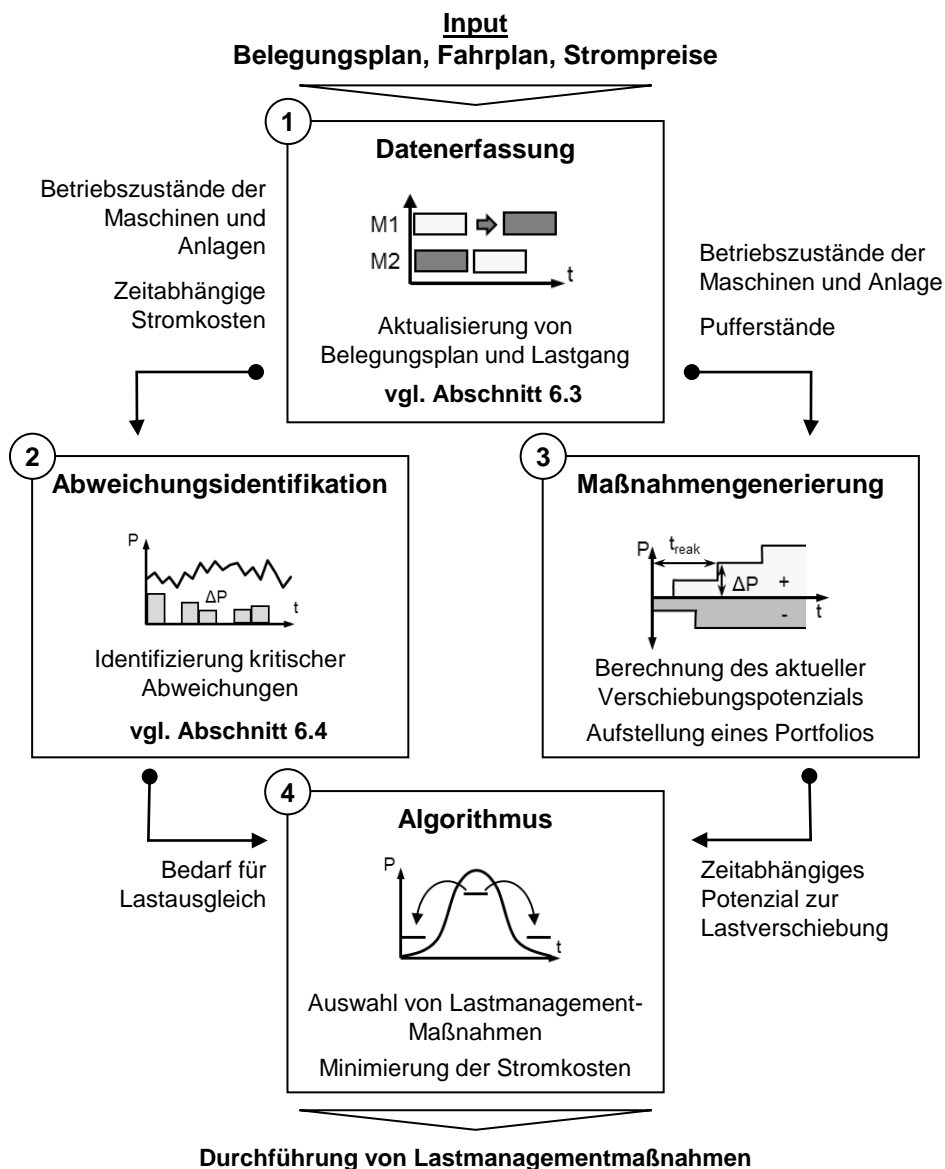


Abbildung 58: Schematischer Ablauf des situativen Lastmanagements

Der situative Lastmanagementansatz sieht vor, an Stelle einer statischen Festlegung der Maßnahmenprioritäten das Lastverschiebungspotenzial dynamisch auf Basis des aktuellen Produktionszustands zu berechnen (*Maßnahmengenerierung*) und anhand der Lastgangprognose über die Auswahl und den Aktivierungszeitpunkt von Maßnahmen zu entscheiden (*Abweichungsidentifikation*). Aufgrund der Vielzahl der zu berücksichtigenden Randbedingungen bietet es sich an, das Lastmanagement mithilfe eines *Algorithmus* umzusetzen.

Die Entwicklung des situativen Lastmanagements erfolgt in drei Schritten. Zunächst werden aus theoretischen Betrachtungen potenzielle laststeuernde Maßnahmen abgeleitet, die in Produktionssystemen zur Verfügung stehen. Darauf aufbauend wird ein Modellierungsansatz für diese Maßnahmen dargelegt und daraus die Berechnung des Maßnahmenportfolios abgeleitet. Abschließend werden die Randbedingungen an den Maßnahmeneinsatz formuliert und ein mathematisches Modell zur algorithmischen Lösung des Lastmanagements entwickelt.

7.4.2 Maßnahmengenerierung

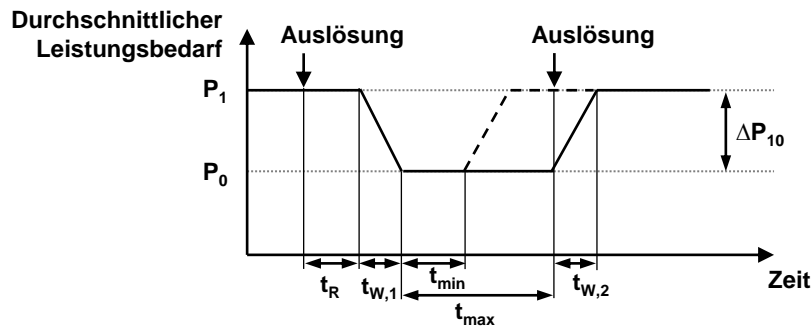
7.4.2.1 Allgemeines

Die Grundlage für einen innerbetrieblichen Lastmanagementansatz ist das Lastverschiebungspotenzial des Produktionsstandortes. Einzelne Betriebsmittel müssen dazu in geeigneter Form schaltbar sein, um ihre jeweilige Leistungsaufnahme erhöhen, senken bzw. zeitlich verschieben zu können (vgl. Abschnitt 3.3). In Anlehnung an die grundlegenden Überlegungen zur Energieflexibilität eines Produktionssystems nach GRAßL (2015) lassen sich Lastmanagementmaßnahmen als Zustandswechsel anhand einer zeitlichen Dimension und einer Leistungsdimension beschreiben (vgl. Abbildung 59).

Die Reaktionszeit bis zur Aktivierung einer Maßnahme unterliegt organisatorischen Randbedingungen. Beispielsweise kann es erforderlich sein, laufende Arbeitsvorgänge des Herstellungsprozesses vor einem Zustandswechsel zunächst zu beenden. Weiterhin treten bei der Informationsübertragung von der Steuerung an das Betriebsmittel im Allgemeinen Latenzzeiten auf (SCHULTZ et al. 2015b). Die Zeitdauer für den Zustandswechsel und die minimale Verweildauer in einem Zustand sind dagegen technisch durch das Betriebsmittel determiniert. Des Weiteren ist die maximale Einsatzdauer entweder abhängig von wirtschaftlichen Faktoren, wenn die Funktion des

7 Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung

Betriebsmittels für den Wertschöpfungsprozess erforderlich ist, oder von organisatorisch-gesetzlichen Faktoren, wenn vorgeschriebene Grenzwerte, z. B. für die Gebäudetemperatur, erreicht werden.



Leistungsdimension		Zeitliche Dimension	
$\Delta P_{i,j}$	Leistungsveränderung durch Wechsel des Betriebszustands von i nach j	t_R	Reaktionszeit
		t_W	Zeitdauer für Zustandswechsel
		t_{min}	Technische minimale Einsatzdauer
		t_{max}	Maximale Einsatzdauer

Abbildung 59: Beschreibungsdimensionen einer Maßnahme

Aus der Perspektive der Produktionssteuerung ergeben sich zu den grundsätzlichen Erwägungen bezüglich des Lastmanagementpotenzials auch konkrete Anforderungen an einzelne Betriebsmittel. Die Erfüllung dieser Anforderungen ist die Voraussetzung zur Integration der jeweiligen Verbraucher in ein Lastmanagementsystem. Diese sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Die Anforderungen A und B sind für ein Betriebsmittel in der Regel unveränderlich und lassen sich bei der Entwicklung eines Lastmanagementsystems einmalig prüfen. Die Schaltbarkeit einer Lastmanagementmaßnahme muss für relevante Betriebsmittel bewusst geschaffen werden, z. B. durch die Umsetzung der dargelegten Referenzarchitektur. Die Anforderungen D bis F sind hingegen vom aktuellen Produktionszustand abhängig. Beispielsweise stehen vollausgelastete Betriebsmittel nicht für eine Lastanpassung zur Verfügung, ohne Opportunitätskosten durch die entgangene Produktionsleistung zu verursachen. Zu einem späteren Zeitpunkt kann dasselbe Betriebsmittel jedoch eine niedrigere Auslastung aufweisen. Die Verfügbarkeit, die Planbarkeit und die Effizienz einer Lastmanagementmaßnahme stehen folglich in Wechselwirkung miteinander. Durch die gezielte Maßnahmengenerierung und -auswahl im Rahmen des situativen Lastmanagements wird diesen Wechselwirkungen im Folgenden Rechnung getragen.

Tabelle 7: Anforderungen an Betriebsmittel im Hinblick auf das Lastmanagement

Anforderungen	
A	Elektrischer Leistungsbedarf
<p>Jedes betrachtete Betriebsmittel muss eine Mindestleistung elektrischer Energie benötigen oder bereitstellen. Dabei ist zunächst unerheblich, ob der Leistungsbedarf für die eigentliche Funktion des Betriebsmittels oder für dessen Hilfsprozesse anfällt.</p>	
B	Steuerbarkeit des Leistungsbedarfs
<p>Die Betriebsmittel müssen mehr als einen Betriebszustand aufweisen. Im einfachsten Fall lassen sich die Betriebsmittel an- und ausschalten. Eine höhere Anzahl von Betriebszuständen wirkt sich jedoch grundsätzlich positiv auf das Lastverschiebungspotenzial aus (GRABL 2015). Das Betriebsmittel lässt sich dabei entweder diskret in einzelne Zustände schalten oder stufenlos regeln (DENA 2012).</p>	
C	Schaltbarkeit der Maßnahme
<p>Die reale Umsetzung einer eingeplanten Lastmanagementmaßnahme erfordert die manuelle oder automatisierte Auslösung eines Schaltvorgangs eines bestimmten Betriebsmittels. Durch das in Abschnitt 5.2 entwickelte Informationsmanagement werden die relevanten automatisiert schaltbaren Betriebsmittel, die vielfach der Gebäudetechnik zuzuordnen sind, der Produktionssteuerung zugänglich gemacht.</p>	
D	Verfügbarkeit der Lastverschiebung
<p>Das theoretische Lastverschiebungspotenzial der Betriebsmittel muss in der momentanen Situation abrufbar sein, um eine Lastganganpassung vorzunehmen. Lastverschiebungen setzen im Allgemeinen eine Form der Zwischenspeicherung bzw. Pufferung voraus (DENA 2012; SCHULTZ et al. 2015b).</p>	
E	Planbarkeit der Lastverschiebung
<p>Um ein zielgerichtetes Lastmanagement betreiben zu können, ist es erforderlich, dass die Höhe der zu erwartenden Lastverschiebung im Vorlauf zur Einleitung des Schaltvorgangs mit hinreichender Genauigkeit bekannt ist. Dies ermöglicht deren genaue Einplanung im zeitlichen Verlauf.</p>	
F	Effizienz der Maßnahme
<p>Der Einsatz der Maßnahme muss kosteneffizient sein, d. h. die Aufwände der Lastganganpassung dürfen die Stromkosteneinsparungen nicht vollständig aufwiegen. Da Produktionsausfälle hohe Opportunitätskosten verursachen, ist es maßgeblich, dass das Lastmanagement den Materialfluss nicht beeinträchtigt.</p>	

7.4.2.2 Modellierung von Lastmanagementmaßnahmen

Wie in Abschnitt 2.2.2 dargestellt, lassen sich die elektrischen Lasten einer Fabrik anhand der peripheren Ordnung nach ihrer funktionalen Nähe zum Produktionsprozess zu kategorisieren. Aktuellen Studien zufolge bieten insbesondere die auch als Querschnittstechnologien bezeichneten Verbraucher der peripheren Bereiche das Potenzial zur Lastverschiebung (KLOBASA 2009, KLOBASA et al. 2013). Für das Lastmanagement sind dabei vorrangig jene

7 Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung

Prozesse interessant, die zur Zwischenspeicherung fähig sind. Dies trifft neben der Prozessperipherie auch auf einzelne Produktionsprozesse zu, sofern diese durch Pufferlager vom unmittelbaren Materialfluss entkoppelt sind. Die Nutzung von Pufferbeständen ermöglicht eine zeitweise Reduktion der Arbeitsintensität eines Betriebsmittels, ohne dass die umgebenden Systeme beeinflusst werden (FERNANDEZ et al. 2013, SCHULTZ et al. 2015b, BEIER et al. 2016a). Aus Sicht des Lastmanagements wird die Periphere Ordnung daher um eine 2. Ordnung der Hauptprozesse erweitert. Die 2. Hauptordnung umfasst dabei alle Fertigungsmittel, die aktuell durch Puffer vom Materialfluss entkoppelt sind, während die Prozesse der 1. Hauptordnung als Engpass gelten (vgl. Abbildung 60).

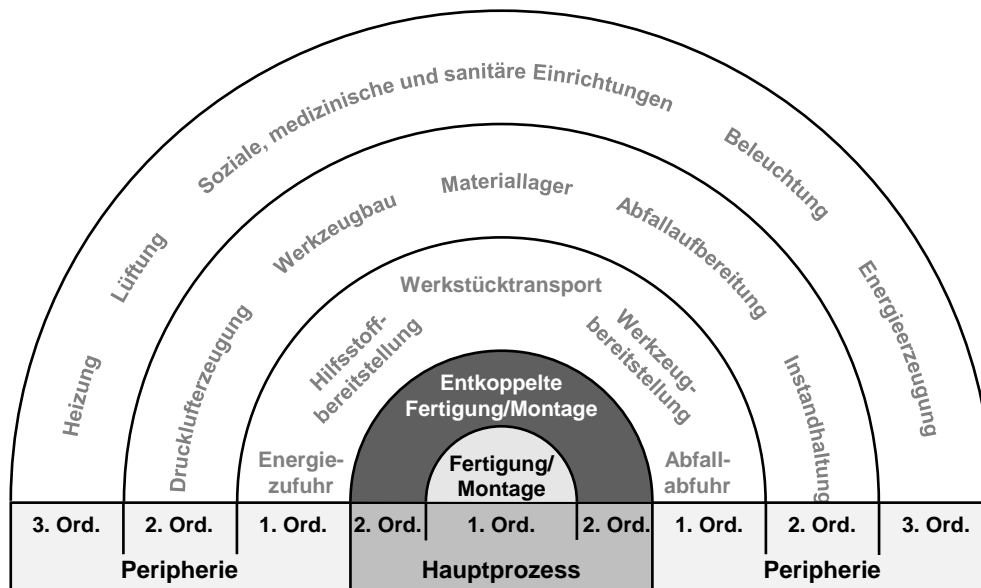
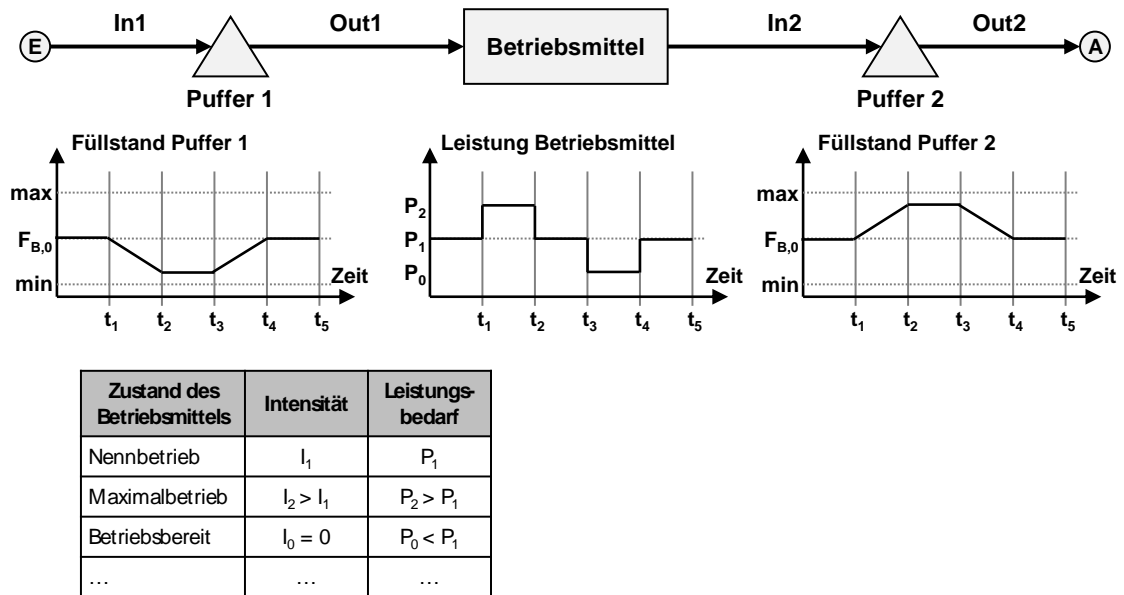


Abbildung 60: Erweiterung der peripheren Ordnung um die 2. Hauptordnung

Das Vorgehen zur Maßnahmengenerierung entspricht folglich einer systematischen Identifikation von Zwischenspeichern in der Produktionsumgebung und deren mathematischer Beschreibung zur Ermittlung des Lastmanagementpotenzials. GOTTSCHALK (2005) hat ein Modell für ein Arbeitssystem zur Beschreibung von Materialpuffern aufgestellt, um daraus die Kapazitätsflexibilität der Produktion zu ermitteln. Dieser Ansatz wird im Folgenden aufgegriffen, auf weitere Betriebsmittel übertragen und um Aspekte des Leistungsbedarfs erweitert (SCHULTZ et al. 2015b). Das resultierende Modell für Betriebsmittel ist in Abbildung 61 dargestellt.



Legende: \longrightarrow : Material-, Energie- oder Stofffluss t : Zeitpunkt
 \textcircled{E} : Eingang von vorhergehendem System P : Leistung
 \textcircled{A} : Ausgang zu nachgelagertem System $F_{B,0}$: Ausgangsfüllstand
 I : Intensität

Abbildung 61: Modell eines Betriebsmittels in Anlehnung an GOTTSCHALK (2005) und SCHULTZ et al. (2015b)

Jedes Betriebsmittel dient im Allgemeinen der Bereitstellung eines Outputs für ein nachfolgendes System. Dieses System kann ein nachgelagerter Prozessschritt oder letztlich auch ein Kunde sein. Zu diesem Zweck wird von außen ein Input zugeführt, der innerhalb des Betriebsmittels unter Aufwendung von beispielsweise elektrischer Energie in den Output umgewandelt wird. Die Geschwindigkeit, in der das Betriebsmittel die Umwandlung des Inputs vornimmt, wird als *Intensität* bezeichnet (FANDEL 2005). Der Fluss des Inputs und Outputs kann dabei sowohl auf der Eingangs- als auch auf der Ausgangsseite des Betriebsmittels durch einen Puffer zwischengespeichert werden. Unabhängig vom Zustand des Betriebsmittels wird der Fluss dabei genau solange nicht blockiert, wie das nachfolgende System aus dem Ausgangspuffer ziehen bzw. das vorgelagerte System in den Eingangspuffer schieben kann (DENA 2012, FERNANDEZ et al. 2013, GRAßL 2015). Folglich steht das Betriebsmittel während dieser Zeit für Lastanpassungen zur Verfügung, ohne dass der Gesamtprozess beeinflusst wird. Die Anpassung des Leistungsbedarfs des Betriebsmittels erfolgt durch einen Wechsel des Betriebszustands, der mit einer Veränderung der Intensität einhergeht.

7 Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung

Gemäß dem Modell lässt sich die Einsatzdauer einer Lastanpassung zu jedem Zeitpunkt situativ aus der Zykluszeit, die das Betriebsmittel zur Produktion einer Einheit benötigt, der Zykluszeit des Zu- und Abgangs sowie der Puffergröße errechnen (FERNANDEZ et al. 2013, SCHULTZ et al. 2015b). Dabei gilt im Allgemeinen die Formel (22):

$$t_{Einsatz,k} = \begin{cases} \min(t_{B,ein,0}, t_{B,aus,max}) & \text{für } ZZ_k > ZZ_{ein} \\ \min(t_{B,ein,max}, t_{B,aus,0}) & \text{für } ZZ_k < ZZ_{aus} \end{cases} \quad (22)$$

mit	$t_{Einsatz,k}$	Einsatzdauer der Maßnahme k
	$t_{B,ein,0}$	Dauer bis zur Leerung des Eingangspuffers
	$t_{B,ein,max}$	Dauer bis zur Füllung des Eingangspuffers
	$t_{B,aus,0}$	Dauer bis zur Leerung des Ausgangspuffers
	$t_{B,aus,max}$	Dauer bis zur Füllung des Ausgangspuffers
	ZZ	Umwandlungsrate des Betriebsmittels
	ZZ_{ein}	Zugangsrate
	ZZ_{aus}	Abgangsrate

Der aktuelle Füllstand eines Puffers errechnet sich aus dem ursprünglichen Füllstand und den bis zu diesem Zeitpunkt zugegangenen Einheiten abzüglich der entnommenen Einheiten. Es gilt dabei die Formel (23):

$$F_B(t) = F_{B,0} + \frac{1}{ZZ_{zu}} \cdot t - \frac{1}{ZZ_{ab}} \cdot t = F_{B,0} + t \cdot \left(\frac{1}{ZZ_{zu}} - \frac{1}{ZZ_{ab}} \right) \quad (23)$$

mit	F_B	Aktueller Füllstand des Puffers
	$F_{B,0}$	Ausgangsfüllstand
	ZZ_{zu}	Rate des Pufferzugangs
	ZZ_{ab}	Rate des Pufferabgangs

Durch Umformung und Auflösung der Formel (23) lassen sich für jeden Puffer die Zeiten bis zur Füllung bzw. Leerung errechnen. Dabei gelten die Formeln (24) und (25):

$$t_{B,0} = F_{B,0} \cdot \left(\frac{1}{ZZ_{ab}} - \frac{1}{ZZ_{zu}} \right)^{-1} \quad \text{für } ZZ_{zu} < ZZ_{ab} \quad (24)$$

$$t_{B,max} = (F_{B,max} - F_{B,0}) \cdot \left(\frac{1}{ZZ_{zu}} - \frac{1}{ZZ_{ab}} \right)^{-1} \quad \text{für } ZZ_{zu} > ZZ_{ab} \quad (25)$$

mit	$t_{B,0}$	Dauer bis zur Leerung des Puffers
	$t_{B,max}$	Dauer bis zur Füllung des Puffers
	$F_{B,max}$	Maximaler Füllstand des Puffers

Lastmanagementmaßnahmen stellen einen bewussten Wechsel des Betriebszustands eines Verbrauchers dar. Die Leistungsdimension der Maßnahme resultiert aus der Differenz des Leistungsbedarfs der jeweiligen Zustände (vgl. Abbildung 59). Dabei gilt:

$$\Delta P_k = \emptyset P_0 - \emptyset P_k \quad (26)$$

mit	ΔP_k	Leistungsveränderung durch Maßnahme k
	$\emptyset P_0$	Leistungsaufnahme des Ausgangszustands
	$\emptyset P_k$	Leistungsaufnahme des veränderten Zustands

7.4.2.3 Methode zur Maßnahmengenerierung

Aus dem Modell eines Betriebsmittels und den abgeleiteten Berechnungen lässt sich eine Methode zur Generierung von Lastmanagementmaßnahmen mit insgesamt sechs Schritten ableiten. Der Gesamtprozess ist in Abbildung 62 dargestellt.

Für die systematische Maßnahmengenerierung erfolgt zunächst eine Einteilung aller betrachteten Verbraucher des Produktionssystems gemäß der peripheren Ordnung. Durch die Kategorisierung in die 1. und 2. Hauptordnung werden dabei die Produktionsprozesse festgelegt, die im Rahmen des Lastmanagements berücksichtigt werden. Anschließend werden die Material-, Stoff-, und Energieströme der Verbraucher mit dem Ziel analysiert, potenzielle Puffer zu identifizieren. Für Betriebsmittel, die in einer Form zur Zwischenspeicherung fähig sind, werden alle möglichen Betriebszustände aufgenommen und die jeweilige Intensität sowie die Leistungsaufnahme ermittelt.

Anhand dieser Eingangsinformationen erfolgt im Anschluss die situative Berechnung der Pufferkapazitäten und -füllstände. Dabei werden insbesondere aktuelle Betriebsdaten, z. B. hinsichtlich der aktuellen Umlaufbestände, ausgewertet. Unter Verwendung der in den Formeln (22) bis (26) dargelegten Zusammenhänge lassen sich daraus wiederum die zeitliche Dimension und die Leistungsdimension der aktuell verfügbaren Lastmanagementmaßnahmen ableiten.

7 Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung

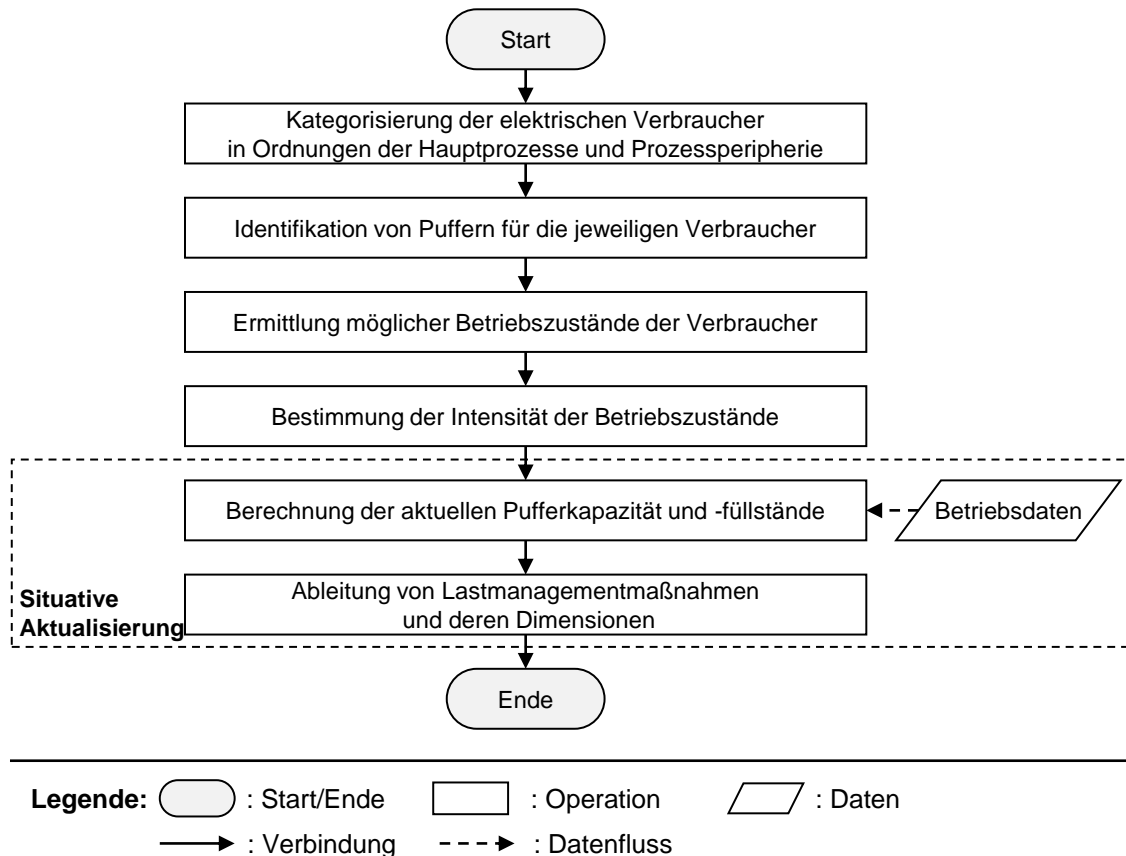


Abbildung 62: Methode zur Generierung von Lastmanagementmaßnahmen

Die ersten vier Schritte zur Kategorisierung der Verbraucher und zur Erhebung der Eingangsinformationen für die Berechnung müssen für jedes Betriebsmittel eines Unternehmens nur einmalig durchgeführt werden und können als allgemeiner Maßnahmenkatalog dokumentiert werden. Die letzten beiden Schritte zur Berechnung der Pufferkapazität und zur Dimensionierung der Lastmanagementmaßnahmen erfolgen dagegen situativ und werden daher bei jeder Veränderungen der Produktionssituation wiederholt. Auf diese Weise wird dem aktuellen Zustand der Produktion bei der Quantifizierung des Lastmanagementpotenzials Rechnung getragen und sichergestellt, dass eine Beeinflussung des Materialflusses durch mögliche Schaltvorgänge vermieden wird.

Die Methode zur Maßnahmengenerierung lässt sich unmittelbar auf Fertigungsmittel mit Materialpuffern, d. h. Hauptprozesse der 2. Ordnung, anwenden. Insbesondere ist eine Kombination des Modells mit etablierten Methoden der Materialflussanalyse, wie z. B. der Wertstromanalyse, möglich (SCHULTZ et al. 2015b). Darüber hinaus ist unter der Voraussetzung, dass entsprechende Puffer identifiziert werden können, eine Übertragung der Methode auf zahlreiche Betriebsmittel der Prozessperipherie möglich (vgl. Tabelle 8).

Betriebsmittel, die keine Möglichkeit der Zwischenspeicherung bieten, z. B. die Beleuchtung, sind für ein Lastmanagement dagegen nicht geeignet. Zur Verdeutlichung der Übertragung sind im Anhang Beispiele für die einzelnen Peripherien dargestellt (vgl. Abschnitt 11.1).

Tabelle 8: Beispiele für die Anwendung des Modells auf die periphere Ordnung

Ordnung	Betriebsmittel	Fluss	Puffer
2. Hauptordnung	Arbeitssystem	Materialfluss	Materialpuffer
1. Peripherie	Maschinenkühlung	Wärmefluss	Wärmekapazität der Maschine
	Werkstücktransport	Materialfluss	Förderstrecke

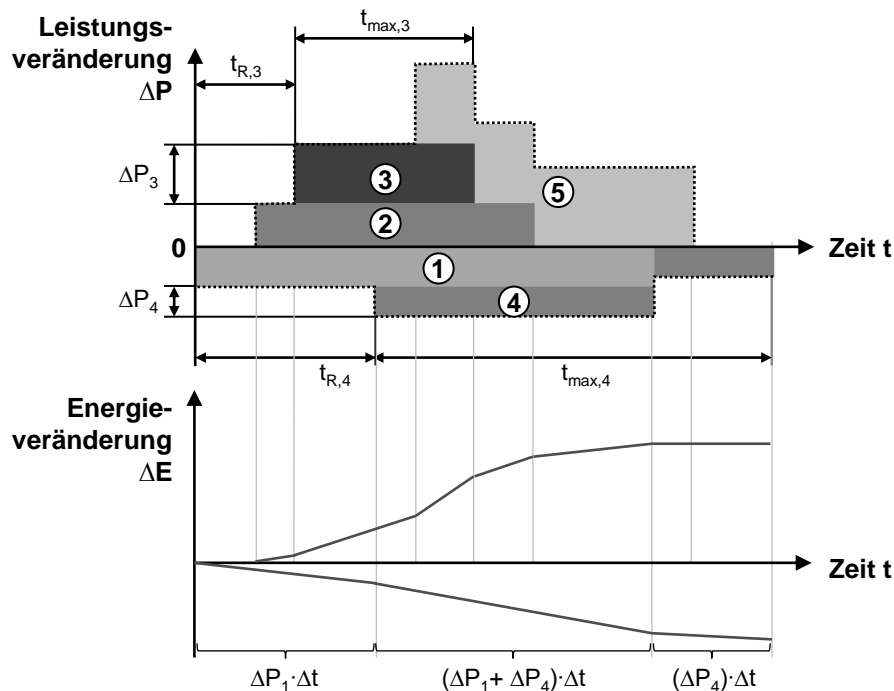
2. Peripherie	Drucklufterzeugung	Druckluftdurchfluss	Systemdruck und Tanks
	Stickstoffherzeugung	Gasdurchfluss	Systemdruck und Tanks

3. Peripherie	Gebäudelüftung	Luftdurchfluss	Raumluft der Fabrikhalle
	Gebäudekühlung	Luftdurchfluss	Wärmekapazität der Raumluft

7.4.2.4 Darstellung eines Lastmanagementprofils

Unter Vernachlässigung der Zustandswechselfdauer lassen sich Lastmanagementmaßnahmen vereinfacht als sprunghafte Änderung des Betriebszustands nach einer Reaktionszeit mit einer einhergehenden Leistungsveränderung beschreiben. In Analogie zur Kapazitätssteuerung der Produktion lässt sich aus der Menge der verfügbaren Maßnahmen das zeitabhängige Potenzial zur Lastverschiebung ermitteln und als Flexibilitätsprofil darstellen. Zur Entwicklung eines Lastmanagementprofils werden dazu die einzelnen Maßnahmen grafisch in einem Diagramm aufgetragen, das die potenzielle Leistungsveränderung über dem zeitlichen Verlauf darstellt (vgl. Abbildung 63). Die Hüllkurve des Profils repräsentiert zu einem gegebenen Zeitpunkt die maximale positive und negative Lastanpassung des Systems (SCHULTZ et al. 2016b). Auf diese Weise kann visualisiert werden, wie sich durch die Auswahl einer konkreten Maßnahme, das Lastverschiebungspotenzial und somit die Fläche des Profils verändert.

7 Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung



Maßnahme	Reaktionszeit t_R	Maximale Einsatzdauer t_{max}	Leistungsveränderung ΔP
Stromspeicher entleeren	0	$t_{max,1}$	ΔP_1
Betriebsmittelintensität steigern	$t_{R,2}$	$t_{max,2}$	ΔP_2
Stickstoffherzeugung einschalten	$t_{R,3}$	$t_{max,3}$	ΔP_3
Lüftung ausschalten	$t_{R,4}$	$t_{max,4}$	ΔP_4
Klimaanlage anschalten	$t_{R,5}$	$t_{max,5}$	ΔP_5

Legende: : Lastmanagement-Hüllkurve
 ① ... ⑤ : Lastmanagementmaßnahmen

Abbildung 63: Darstellung eines beispielhaften Lastmanagementprofils in Anlehnung an (SCHULTZ et al. 2016b)

Anhand dieser grafischen Darstellungsform des Lastmanagementprofils kann insbesondere die Entscheidungsfindung zur Lastanpassung durch einen Produktionsverantwortlichen unterstützt werden. Dem menschlichen Entscheidenden wird zunächst dessen derzeitiger Handlungsspielraum aufgezeigt. Weiterhin wird dargestellt, wie sich das Lastmanagementprofil und somit der zukünftige Handlungsspielraum infolge der Auswahl einer Maßnahme verändert auch.

7.4.3 Algorithmus für das situative Lastmanagement

Aufgrund der Vielzahl der Entscheidungsvariablen, die bei der Anpassung des Lastgangs in allen 15-Min-Intervallen des Betrachtungshorizonts betrachtet werden müssen, bietet sich zur weiteren Unterstützung eines Produktionsverantwortlichen eine Automatisierung des situativen Lastmanagements an. Es ergibt sich dabei das mathematische Problem, für einzelne Maßnahmen, deren Einsatzdauer und -häufigkeit zeitlich begrenzt ist, in Abhängigkeit der aus Lastgangabweichungen resultierenden Stromkosten eine bestmögliche Allokation vorzunehmen (vgl. Abbildung 64).

Algorithmus für das Lastmanagement	
<p>Zielfunktion: Minimierung der Gesamtstromkosten unter Berücksichtigung von Strafkosten, Spotmarkthandel und Kosten der Maßnahmen</p>	<p>Nebenbedingungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einhaltung der Energiegleichung • Vorgegebene Ausbringungsmenge • Zeitvariable Pufferbestände • Strafkosten für Lastgangabweichungen • Zeitvariable Strompreise
<p>Entscheidungsvariablen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Variierung von Zeitpunkt und Dauer der Maßnahmen • Variierung der Aktivierungshäufigkeit der Maßnahmen • Kurzfristiger Strommarkthandel 	

Abbildung 64: Übersicht über den Lastmanagement-Algorithmus

Durch die Verwendung des Algorithmus sollen die Gesamtkosten, die sich aus den Kosten für Strafzahlungen, Stromhandel sowie dem Einsatz von Maßnahmen zusammensetzen, minimiert werden. Folglich stellt sich die Zielfunktion des Problems gemäß Formel (27) dar:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } K_{\text{Gesamt}} = & \sum_{i \in T} LGA_i^+ \cdot c_{\text{Ausgleich}}^+ + \sum_{i \in T} LGA_i^- \cdot c_{\text{Ausgleich}}^- \\
 & + \sum_{i \in T} e_{\text{Handel},i} \cdot c_{\text{Handel},i} + \sum_{i \in T} K_{\text{Maßnahmen},i}
 \end{aligned} \tag{27}$$

mit $i \in T$: Menge der Abrechnungsintervalle
 $= \{1, \dots, T^{\text{max}}\}$
 $+/-$ Index für positive bzw. negative Abweichungen

Entscheidungsvariablen:
 $LGA_i^+ \geq 0$ Positive Lastgangabweichung im Intervall i
 $LGA_i^- \geq 0$ Negative Lastgangabweichung im Intervall i
 $e_{\text{Handel},i}$ Gehandelte Energiemenge im Intervall i

7 Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung

mit Parametern:

$c_{Ausgleich}$	Preis für Ausgleich durch Energieversorger
$c_{Handel,i}$	Preis für Zukauf und Verkauf am Spotmarkt im Intervall i
$K_{Maßnahmen,i}$	Kosten für den Einsatz von Lastmanagementmaßnahmen

Da für die betriebliche Leistungserbringung zwingend elektrische Energie erforderlich ist, muss dem Energiebedarf der Fabrik zu jedem Zeitpunkt eine ebenso große Energieversorgung gegenüberstehen. Somit gilt die folgende Energiegleichung (28) als Nebenbedingung des Problems:

$$\sum_{m \in M} \sum_{z \in Z} \gamma_{m,z,i} \cdot P_{m,z} \cdot t_i + e_{Handel,i}^- + LGA_i^- \quad (28)$$

$$= SLG_i + e_{Handel,i}^+ + LGA_i^+ \quad \forall i \in T$$

mit $i \in T:$	Menge der Abrechnungsintervalle
$= \{1, \dots, T^{max}\}$	
$m \in M:$	Menge der Betriebsmittel
$= \{1, \dots, M^{max}\}$	
$z \in Z:$	Menge der Betriebszustände
$= \{1, \dots, Z^{max}\}$	
+/-	Index für positive bzw. negative Abweichungen

Entscheidungsvariablen:

$\gamma_{m,z,i}$	Zeitlicher Anteil des Betriebszustands z der Maschine m im Intervall i
$e_{Handel,i}$	Gehandelte Energiemenge im Intervall i
$LGA_i^+ \geq 0$	Positive Lastgangabweichung im Intervall i
$LGA_i^- \geq 0$	Negativer Lastgangabweichung im Intervall i

Parameter:

$P_{m,z}$	Leistungsbedarf des Betriebsmittels m im Betriebszustand z
t_i	Dauer des Intervalls i
SLG_i	Soll-Lastgang im Intervall i

Wie zuvor beschrieben, werden die Lastmanagementmaßnahmen aus Puffern in Material-, Energie- oder Stoffflüssen ermittelt. Die Berechnung der zeitabhängigen

gen Füllstände wird anhand der Formeln (22) bis (25) vorgenommen (vgl. Abschnitt 7.4.2.2). Der Füllstand eines Puffers darf einerseits keine negativen Werte annehmen und wird andererseits durch die Kapazität des Puffers begrenzt. Es gilt demnach die Bedingung nach Formel (29):

$$0 \leq F_{b,i} \leq C_b \quad \forall i \in T \quad (29)$$

mit $i \in T$: Menge der Abrechnungsintervalle

$$= \{1, \dots, T^{max}\}$$

$b \in B$: Menge der Puffer

$$= \{1, \dots, B^{max}\}$$

Entscheidungsvariablen:

$F_{b,i}$ Füllstand des Puffers b im Intervall i

Parameter:

C_b Kapazität des Puffers b

Weiterhin müssen alle Betriebsmittel innerhalb jedes einzelnen Intervalls definierte Betriebszustände annehmen, sodass die folgende Bedingung (30) gilt. Durch häufiges Zu- und Abschalten von Betriebsmitteln wächst das Risiko, diese zu beschädigen. Aus diesem Grund wird die Anzahl der Schaltvorgänge limitiert und daher angenommen, dass jedes Betriebsmittel nur einen Zustand innerhalb eines Intervalls einnehmen kann. Somit gilt zusätzlich die Formel (31):

$$\sum_{z \in Z} \gamma_{m,z,i} = 1 \quad \forall i \in T, \forall m \in M, \forall z \in Z \quad (30)$$

$$\gamma_{m,z} \in \{0,1\} \quad \forall i \in T, \forall m \in M, \forall z \in Z \quad (31)$$

mit $i \in T$: Menge der Abrechnungsintervalle

$$= \{1, \dots, T^{max}\}$$

$m \in M$: Menge der Betriebsmittel

$$= \{1, \dots, M^{max}\}$$

$z \in Z$: Menge der Betriebszustände

$$= \{1, \dots, Z^{max}\}$$

Entscheidungsvariablen:

$\gamma_{m,z,i}$ Zeitlicher Anteil des Betriebszustands z der Maschine m im Intervall i

Wie die Formeln (27) bis (31) zeigen, sind sowohl die Zielfunktion als auch die Nebenbedingungen linear formuliert. Da in der Formulierung teilweise Binär-

7 Verfahren zur energieorientierten Produktionssteuerung

variablen auftreten, handelt es sich um ein Problem der gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung (engl.: Mixed integer linear programming (MILP)). Eine Lösung für diese Art der Problemstellung lässt sich durch die Verwendung von Optimierungsverfahren finden, wie sie beispielsweise für Maschinenbelegungsprobleme bekannt sind (ZÄPFEL & BRAUNE 2005, HARJUNKOSKI et al. 2014).

Grundsätzlich können dabei exakte und heuristische Lösungsverfahren unterschieden werden. Durch die Verwendung mathematisch exakter Verfahren, wie beispielsweise der vollständigen Enumeration, wird gewährleistet, dass die optimale Lösung des Problems ermittelt wird (ROTHLAUF 2011). Da komplexe Probleme mit vielen Ressourcen und Randbedingungen, wie diese in der Praxis vielfach auftreten, durch exakte Optimierungsverfahren nicht in akzeptabler Rechenzeit gelöst werden können, bietet sich in diesen Fällen die Verwendung von Heuristiken an (ZÄPFEL & BRAUNE 2005, ROTHLAUF 2011). Nach ZÄPFEL & BRAUNE (2005) sind Heuristiken dadurch gekennzeichnet, dass sie durch eine eindeutig definierte Reihenfolge von Verfahrensschritten (Rechenoperationen) die Lösung einer komplexen Aufgabe ermitteln. Auf diese Weise wird eine gute Lösung der Aufgabe in akzeptabler Rechenzeit gefunden. Es ist jedoch nicht garantiert, dass es sich dabei um die optimale Lösung handelt. Zu den Heuristiken zählen insbesondere die auch als Meta-Heuristik bezeichneten allgemeinen Suchverfahren, wie Simulated Annealing, Tabu-Suche, Ameisenalgorithmen oder evolutionäre Algorithmen, deren Verfahrensregeln sich oftmals an Vorgänge aus der Natur anlehnen (GASS & FU 2001, ZÄPFEL & BRAUNE 2005, ROTHLAUF 2011, HARJUNKOSKI et al. 2014).

Insbesondere für Problemformulierungen anhand von MILP haben sich Lösungsverfahren nach dem Branch-and-Bound-Prinzip etabliert (GASS & FU 2001, HARJUNKOSKI et al. 2014). Bei der Anwendung des Branch-and-Bound-Prinzips wird das mathematische Problems iterativ in eine Menge von Teilproblemen aufgeteilt und somit ein Entscheidungsbaum (*Branch*) aufgebaut. Anschließend werden die Teilprobleme relaxiert, indem Binärvariablen durch reelle Variablen ersetzt werden, und deren obere und untere Schranken (*Bound*) berechnet. Anhand der Schranken wird bewertet, ob das gesuchte Optimum innerhalb eines Teilproblems zu finden ist (GASS & FU 2001, ROTHLAUF 2011). Durch die Kombination mit Schnittebenenverfahren (*Branch-and-Cut*) können einzelne Äste frühzeitig abgetrennt werden, um die Effizienz des Verfahrens zu steigern. Zusätzlich sind in aktuellen Solvern Heuristiken integriert, die eine effizientere Bestimmung der Schranken ermöglichen (HARJUNKOSKI et al. 2014). Für eine detaillierte Beschreibung sei an dieser

Stelle auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen (z. B. GASS & FU 2001, ZÄPFEL & BRAUNE 2005, ROTHLAUF 2011, HARJUNKOSKI et al. 2014)

Da der Schwerpunkt der vorliegenden Betrachtung auf der Formulierung des Optimierungsproblems und dessen möglichst einfacher Integration in das Gesamtsystem der Produktionssteuerung liegt, wird aus den folgenden Gründen ein Branch-and-Bound-Ansatz gewählt:

- Als exakte Optimierungsverfahren liefern Branch-and-Bound-Methoden Lösungen von höchster Güte (ROTHLAUF 2011). Folglich wird ein Produktionsverantwortlicher bei der Validierung der gefundenen Lösung entlastet.
- Branch-and-Bound-Verfahren sind zur Lösung von MILP-Formulierungen etabliert und sind fortlaufend Gegenstand umfassender Entwicklungen, um deren Effektivität und Anwendungsbereich zu steigern. Infolgedessen sind die Verfahren zwischenzeitlich geeignet, auch komplexe Probleme aus der Praxis zu lösen (HARJUNKOSKI et al. 2014).
- Zur Implementierung von Branch-and-Bound-Verfahren sind eine Anzahl kommerzieller Solver verfügbar. Die Leistungsfähigkeit der Optimierung wird unter anderem von der Effizienz der Programmierung beeinflusst. Durch die Verwendung kommerzieller Solver kann dieser Einfluss minimiert und eine effiziente Berechnung sichergestellt werden (HARJUNKOSKI et al. 2014).

Zusammengefasst lässt sich das situative Lastmanagement folglich als gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem formulieren, dessen Lösung durch Varianten des Branch-and-Bound-Algorithmus gefunden werden kann. Eine Implementierung der Optimierung anhand eines Branch-and-Bound-Ansatzes wird in Abschnitt 8.3.4 vorgenommen.

7.5 Fazit

Als drittes Systemelement sind in diesem Kapitel die energieorientierten Steuerungsverfahren entwickelt worden, die den Kern der vorliegenden Arbeit darstellen. Die Verfahren bauen auf dem Informationsmanagement sowie der daraus abgeleiteten Bedarfsüberwachung auf und ermöglichen letztlich die gezielte Lastanpassung zur Einhaltung eines Lastgangs. Auf diese Weise tragen die Verfahren zur Minimierung der Gesamtstromkosten bei.

Bei der Entwicklung hat zunächst die Konfiguration der energieorientierten Produktionssteuerung im Fokus gestanden, die sich aus mehreren ineinandergreifenden Verfahren zusammensetzt. Ausgehend von einer Erweiterung des klassischen Modells der Produktionssteuerung ist eine Steuerungskaskade aus Reihenfolgebildung, Auftragsfreigabe und Lastmanagement definiert worden (vgl. Abschnitt 7.1). Anhand dieser Steuerungskaskade sind Lastanpassungen sowohl durch Eingriffe in die Abwicklung von Fertigungsaufträgen als auch in periphere Prozesse möglich. Für jeden Bestandteil der Kaskade sind adaptierte Steuerungsverfahren entwickelt worden, die neben der Lastgangabweichung auch die Termintreue der Produktion berücksichtigen. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass sich die energetischen Ziele mit dem Gesamtzielsystem der Produktionssteuerung in Einklang bringen lassen.

Die entwickelten Steuerungsverfahren umfassen zunächst eine energieorientierte Reihenfolgebildung und eine hybride energieorientierte Auftragsfreigabe. Durch diese Verfahren werden sowohl die Bearbeitungsreihenfolge als auch die genauen Starttermine der Bearbeitung unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Energiekosten und der Termintreue angepasst. (vgl. Abschnitt 7.2 und 7.3). Zur Steuerung der peripheren Verbraucher ist weiterhin ein situatives Lastmanagement entwickelt und dessen algorithmischer Umsetzung mathematisch formuliert worden ist (vgl. Abschnitt 7.4). Im Rahmen des Lastmanagements wird auf Basis des aktuellen Produktionszustands ermittelt, welche Betriebsmittel derzeit durch Puffer von ihrem jeweiligen Material-, Stoff- oder Energiefluss entkoppelt sind. Anhand der algorithmischen Umsetzung kann anschließend der zeitliche Verlauf der Betriebszustände dieser entkoppelten Verbraucher im Hinblick auf eine Lastanpassung optimiert werden (vgl. Abschnitt 7.4.3). Im folgenden Kapitel wird die Implementierung und Validierung dieser Steuerungsverfahren anhand eines Anwendungsbeispiels vorgenommen.

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

8.1 Übersicht

Das vorliegende Kapitel dient dem Zweck, die Umsetzbarkeit des entwickelten energieorientierten Steuerungssystems aufzuzeigen, dessen Nutzen zu validieren und dessen Wirtschaftlichkeit darzustellen. Hierzu beschreibt Abschnitt 8.2 zunächst die technische Umsetzung des Steuerungssystems am Beispiel einer kommerziellen Softwarelösung auf Basis von SAP Manufacturing Execution (SAP ME). Anschließend wird eine simulationstechnische Umsetzung der Steuerungsverfahren vorgenommen und deren Wirksamkeit anhand zweier Beispiele aufgezeigt (vgl. Abschnitt 8.3). Abschließend wird die energieorientierte Steuerung den in Abschnitt 3.6 aufgestellten funktionellen Anforderungen gegenübergestellt (vgl. Abschnitt 8.4.1) und eine Kosten-Nutzen-Analyse zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit durchgeführt (vgl. Abschnitt 8.4.2).

8.2 Technische Umsetzung

8.2.1 Allgemeines

Zur technischen Umsetzung der entwickelten energieorientierten Produktionssteuerung wird eine prototypische Integration in eine kommerzielle Softwareumgebung auf Grundlage von SAP ME vorgenommen. Den Schwerpunkt der Umsetzung bildet die Abbildung der energieorientierten Referenzarchitektur (vgl. Abschnitt 5.2.1) und die Bereitstellung laststeuernder Verfahren für einen Produktionsverantwortlichen. Dies erfolgt vorrangig am Beispiel des im Abschnitt 7.4 vorgestellten situativen Lastmanagements. Der Softwareprototyp wird in die Softwareumgebung der Lernfabrik für vernetzte Produktion (LVP) an der Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik integriert und mit realen Fertigungsmitteln vernetzt. Zur Informationsbereitstellung werden grafische Benutzeroberflächen entwickelt, anhand derer der verantwortliche Mitarbeiter situative Lastanpassungen vornehmen kann.

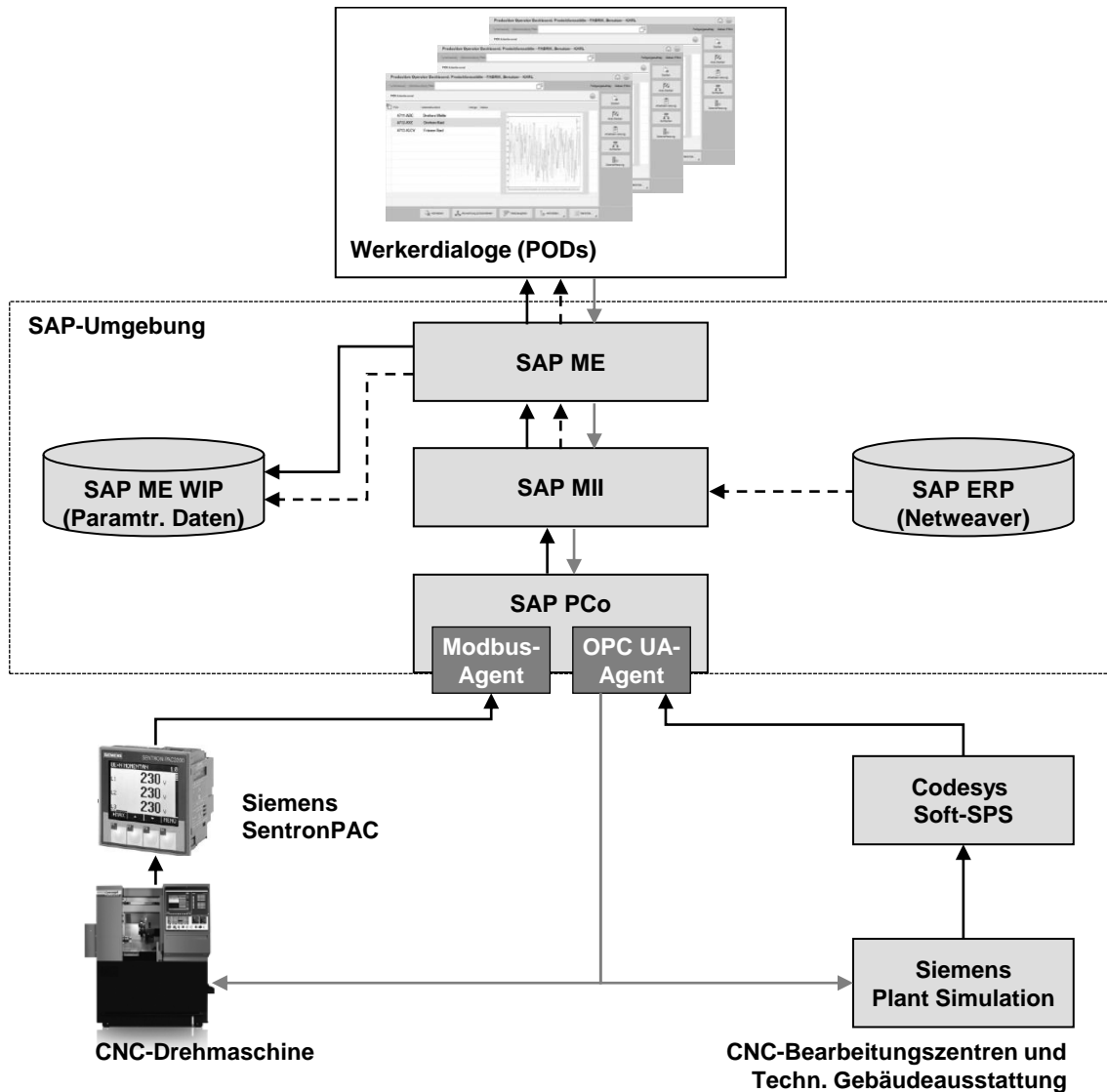
8.2.2 Umsetzung am Beispiel von SAP ME

Das zentrale Element der Umsetzung bildet die Software SAP ME, die einem Bediener mit den sog. *Production Operator Dashboards* (POD) grafische Werkerdialoge zur Steuerung der Produktion zur Verfügung stellt. SAP ME ist dabei Bestandteil eines engmaschigen Softwaresetzes, dessen Anpassung zur Befähigung einer energieorientierten Steuerung erforderlich ist (vgl. Abbildung 65). Insbesondere erfolgt in diesem Zuge die Implementierung der in Abschnitt 5.2 dargelegten Referenzarchitektur und die Erweiterung des Datenmodells, das der Software zugrunde liegt (vgl. Abschnitt 5.3).

Die Kommunikation mit der Feldebene erfolgt über das Modul *SAP Plant Connectivity* (PCo), das je nach verwendetem Protokoll unterschiedliche Agenten für die Kommunikation verwaltet. Die Feldebene umfasst im Anwendungsbeispiel zunächst eine Drehmaschine vom Typ Emco Concept Turn 250, die mit einem Siemens SentronPAC 3200 als Strommessgerät ausgestattet ist. Weitere Verbraucher sind anhand eines Modells in Siemens Plant Simulation abgebildet, das über den OPC UA-Server einer Codesys-Soft-SPS angebunden ist. Die Integration des Strommessgeräts erfolgt über einen standardisierten Modbus-Agenten, wohingegen zur Vernetzung des Simulationsmodells ein OPC UA-Agent programmiert wird.

Die vom SAP PCo erfassten Ist-Daten hinsichtlich der Leistungsaufnahme und des Auftragsfortschritts werden innerhalb der SAP-Umgebung vom Modul Manufacturing Integration & Intelligence (SAP MII) verarbeitet und mit den Plan-Daten, die in der SAP ERP-Datenbank (SAP Netweaver) hinterlegt sind, korreliert. Das Modul wird insbesondere zur Verdichtung der Daten, z. B. durch Mittelwertbildung der Energieverbrauchswerte, verwendet.

Das SAP ME bedient sich schließlich der vom SAP MII bereitgestellten Daten, indem diese einerseits als Abbild in die SAP ME Work In Process-Datenbank (WIP) geschrieben und andererseits über vom Benutzer frei konfigurierbare PODs repräsentiert werden. Die PODs bieten neben der reinen Darstellung auch die Möglichkeit, Schaltflächen und Auswahllisten, beispielsweise für den nächsten Auftrag, zu integrieren. Die Benutzereingaben werden im umgesetzten Anwendungsfall auf dem umgekehrten Pfad entlang der SAP-Umgebung übertragen und über das OPC UA-Protokoll an die Arbeitsplätze weitergegeben.



Legende: SAP ME: SAP Manufacturing Execution
 SAP MII: SAP Manufacturing Integration & Intelligence
 SAP PCo: SAP Plant Connectivity
 SAP ERP: SAP Enterprise Resource Planning
 SAP ME WIP: SAP Manufacturing Execution Work in Process

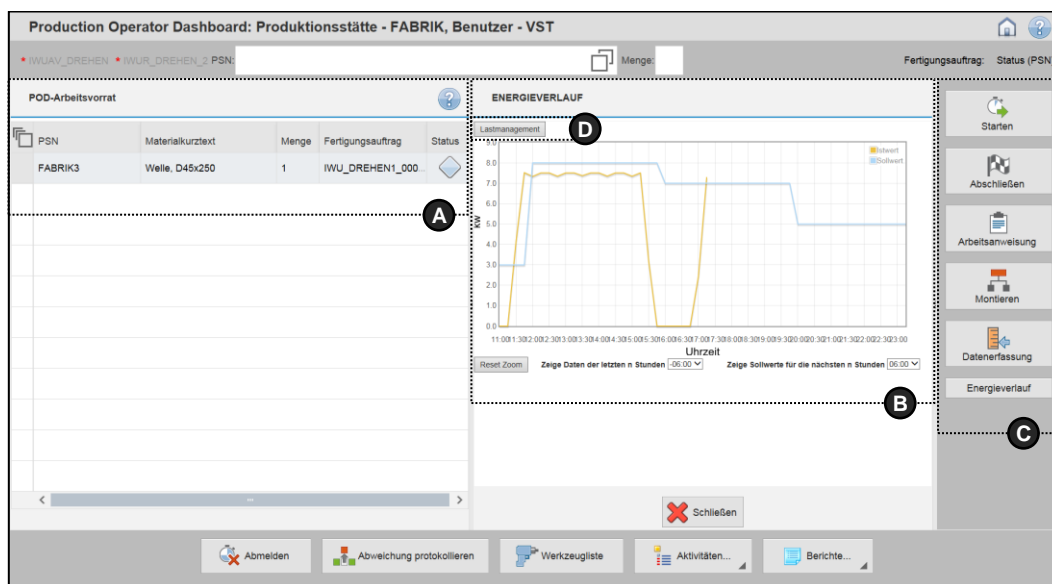
→ : Ist-Daten
 - -> : Plan-Daten
 → : Benutzervorgaben

Abbildung 65: Schematische Darstellung der technische Umsetzung auf Basis von SAP

Auf dieser informationstechnischen Basis können innerhalb des SAP ME energieorientierte Steuerungsfunktionalitäten umgesetzt werden, die in diesem konkreten Anwendungsfall einerseits einen erweiterten Werkerdialog und andererseits die Integration des Lastmanagements in die Produktionssteuerung umfassen.

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

Der erweiterte Werkerdialog bildet für einen einzelnen Arbeitsplatz die Mensch-Maschine-Schnittstelle zum Fertigungsleitsystem und bietet als solche zum einen die Möglichkeit, Informationen bereitzustellen und zum anderen, Rückmeldungen an das System zu geben (BDE). Im Zuge der Erweiterung können über diesen Dialog mit Start eines Auftrags Leistungsbedarfsmessungen an der jeweiligen Ressource ausgelöst und visuell einem geplanten Soll-Wert gegenübergestellt werden (vgl. Abbildung 66). Die Ergebnisse der Bedarfsmessung können einerseits zur Ermittlung bzw. Anpassung der Stammdaten und andererseits zur Diagnose des Produktionsverlaufs durch den Werker genutzt werden. Unerwartete Abweichungen vom geplanten Lastverlauf können auf Produktionsstörungen hinweisen und einen Eingriff durch den Werker erfordern (EMEC et al. 2016). Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, zur Reaktion auf Abweichungen auf das betriebsweite Lastmanagement zuzugreifen.

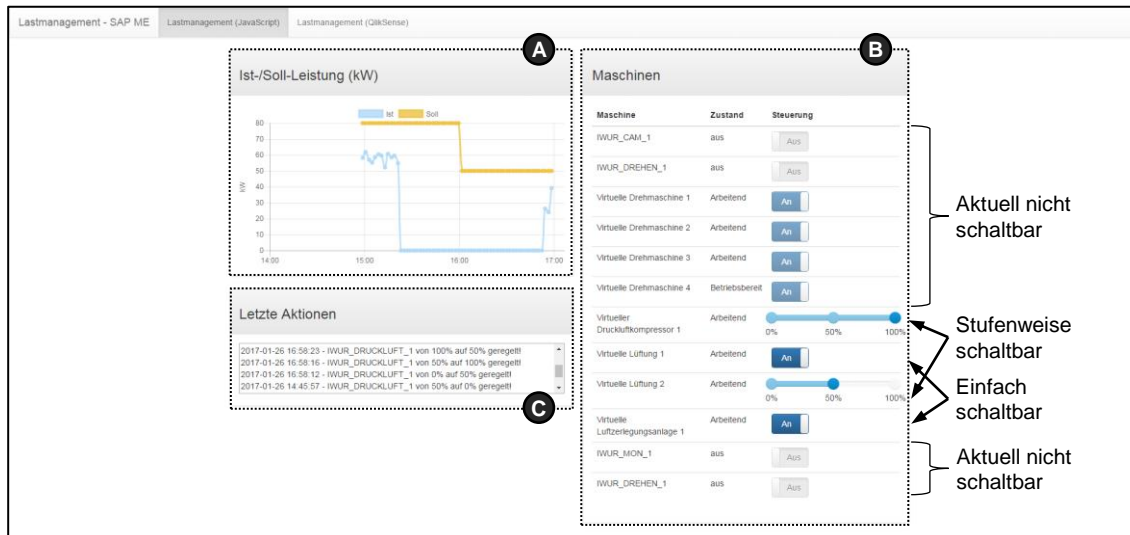


- Legende:**
- A** : Vorratsliste aktiver Aufträge
 - B** : Soll- und Ist-Lastkurve des ausgewählten Auftrags
 - C** : Erweiterte Schaltfläche für Werker zur Darstellung der Lastkurve
 - D** : Zugang zur GUI für das innerbetriebliche Lastmanagement

Abbildung 66: Umsetzung des erweiterten Werkerdialogs in SAP ME

Das Lastmanagement wird nicht an einzelnen Fertigungsmitteln, sondern unter Berücksichtigung des gesamten Produktionsbereichs inklusive der prozessperipheren Verbraucher durchgeführt. Zu diesem Zweck werden in einem separaten Dialogfenster der Soll-Lastgang der Fabrik (Fahrplan) und der tatsächliche Lastgang grafisch dargestellt und bei drohenden Abweichungen Warnungen

an den Bediener ausgegeben (vgl. Abbildung 67). Dem Verantwortlichen werden in diesem Dialog eine Liste aller aktiven und prinzipiell für ein Lastmanagement verfügbaren Betriebsmittel und deren jeweilige Schaltmöglichkeiten bereitgestellt. Dabei wird auf Grundlage der aktuellen Produktionssituation zwischen Betriebsmitteln unterschieden, die aktuell nicht schaltbar, nur einfach schaltbar oder stufenweise schaltbar sind. Die Schaltvorgaben werden über die OPC UA-Schnittstelle direkt an die jeweiligen Betriebsmittel kommuniziert.



- Legende:**
- A** : Darstellung des Gesamt-Soll- und Ist-Lastgangs der Fabrik
 - B** : Liste aktiver Verbraucher
 - C** : Historie der Lastmanagementmaßnahmen

Abbildung 67: Umsetzung des Lastmanagement-Dialogs auf Basis von SAP ME

Die prototypische Umsetzung der Referenzarchitektur in SAP ME zeigt, dass sich die erforderlichen informationstechnischen Grundlagen sowie die Aspekte der energieorientierten Steuerungsverfahren in einer Produktionsumgebung umsetzen lassen. Der Prototyp zeigt insbesondere die Bereitstellung und Auswertung der auftragsabhängigen Leistungsbedarfsdaten auf, die als notwendige Voraussetzung für die weiteren Steuerungsverfahren gelten. Die Umsetzung des erweiterten Werkerdialogs und des Lastmanagement-Dialogs ermöglichen steuernde Eingriffe zur Anpassung des Gesamtlastgangs durch menschliche Bedienende. Der Lastmanagement-Dialog basiert dabei auf dem situativen Lastmanagement und bietet eine Ergänzung zur algorithmischen Steuerung des Lastgangs (vgl. Abschnitt 7.4.3).

8.3 Simulationstechnische Validierung

8.3.1 Allgemeines

In Abschnitt 8.2 sind die technische Machbarkeit und die Anwendbarkeit der entwickelten Systemelemente aus informationstechnischer Sicht aufgezeigt worden. Ergänzend wird im Folgenden eine simulationstechnische Umsetzung der Steuerungsverfahren aus Kapitel 7 vorgenommen. Auf dieser Grundlage werden quantitative Aussagen zur Leistungsfähigkeit und zur Effizienz der Steuerungsverfahren gewonnen. Als Simulation gilt dabei nach der VDI-Richtlinie 3633 „(...) *das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind*“ (VDI 3633). Während der Simulationsstudien werden in unterschiedlichen Szenarien relevante Kennzahlen, wie z. B. die Termintreue, die Lastgangabweichungen oder die Energiekosten, erhoben und miteinander verglichen, um die Tauglichkeit der entwickelten Steuerungsverfahren bewerten und validieren zu können.

Die simulationstechnische Umsetzung umfasst im ersten Schritt ein Ablaufsimulationsmodell zur Validierung der hybriden energieorientierten Auftragsfreigabe sowie der energieorientierten Reihenfolgebildung und im zweiten Schritt ein Optimierungsmodul für die algorithmische Implementierung des situativen Lastmanagements. Der Aufbau der Ablaufsimulation erfolgt in der proprietären Software Siemens Plant Simulation, wohingegen das Optimierungsmodul mithilfe von IBM ILOG CPLEX umgesetzt wird.

8.3.2 Beschreibung des simulierten Produktionssystems

Als Grundlage des Simulationsmodells ist eine Produktionsumgebung in Anlehnung an das bereits für die Umsetzung genutzte Szenario der Lernfabrik für vernetzte Produktion gewählt worden. Dazu wird die Produktion eines einstufigen Stirnradgetriebes modelliert, dessen Komponenten und Struktur in Abbildung 68 dargestellt sind. Die Variation der Getriebebaugröße, der Gehäuseausführung sowie der Welle-Nabe-Verbindung erlaubt die Herstellung von insgesamt 72 Varianten des Produktes, die sich hinsichtlich der zur Fertigung erforderlichen Durchführungszeiten und des Leistungsbedarfs unterscheiden.

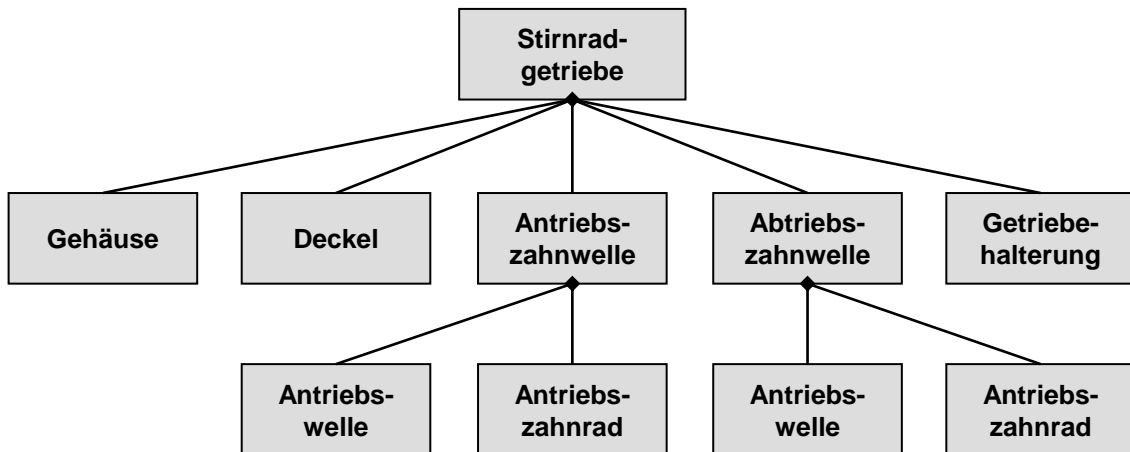
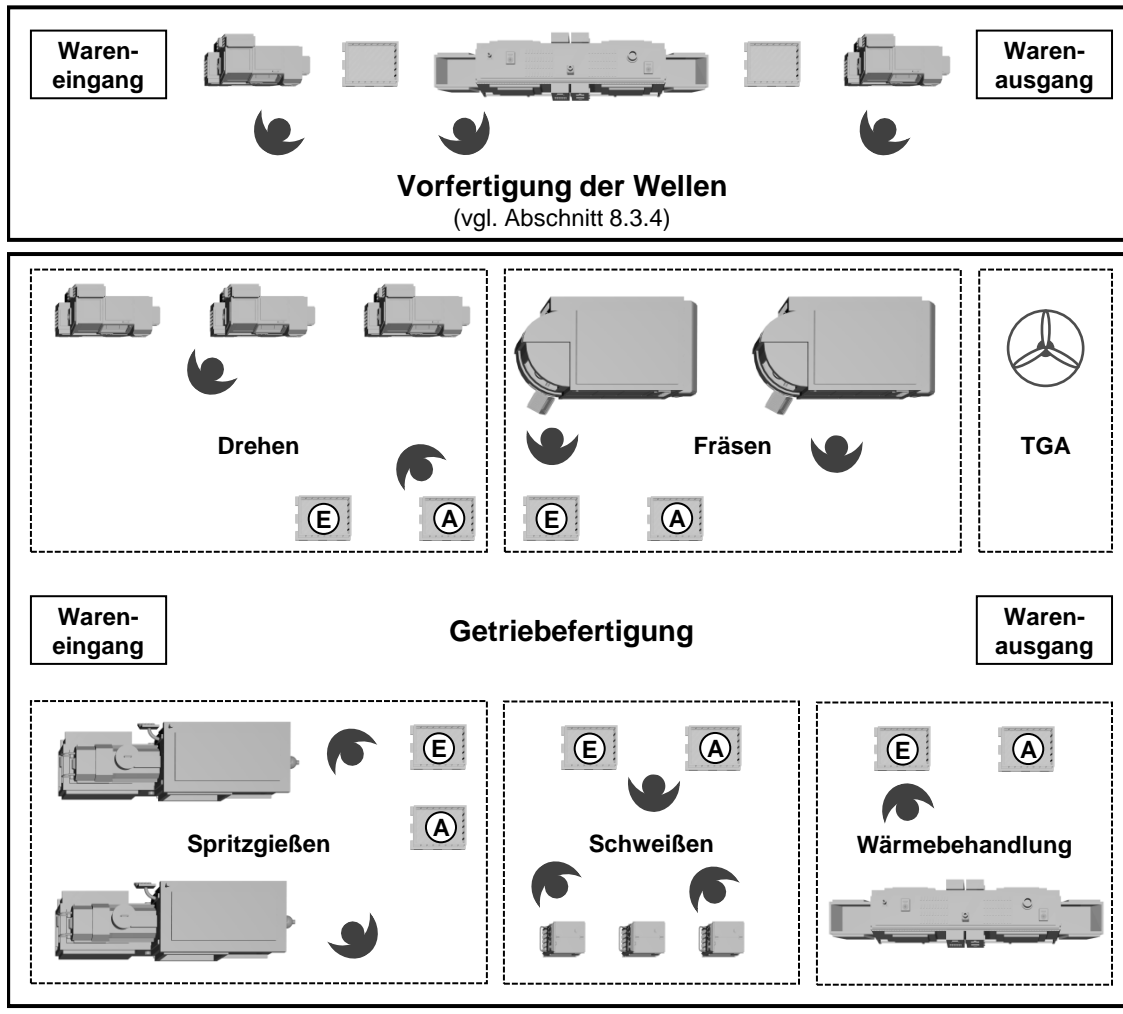


Abbildung 68: Darstellung der Erzeugnisstruktur des Beispielproduktes

Die im Simulationsmodell abgebildete Fertigung ist in insgesamt fünf Werkstätten aufgeteilt, in denen gleichartige Fertigungsmittel nach dem Verrichtungsprinzip (Werkstattfertigung) zusammengefasst sind. Jede der einzelnen Werkstätten verfügt über ein eigenes Ein- und Ausgangslager als Puffer. In der Dreherei erfolgt die mechanische Bearbeitung der Rohwellen, die anschließend optional die Fräserei zur Einbringung von Nuten durchlaufen. Je nach gewählter Variante der Welle-Nabe-Verbindung werden die Zahnräder an die Wellen angeschweißt und wärmebehandelt. Stählerne Gehäusekomponenten sowie die optionalen Getriebehalterungen werden in der Fräserei aus zugekauften Rohteilen spanend bearbeitet. Dahingegen werden dieselben Komponenten aus Kunststoff in eigenen Spritzgussanlagen hergestellt. Die Fertigstellung der Endprodukte erfolgt letztlich in einem Montagebereich. Da die vorrangig manuellen Montage-tätigkeiten jedoch nur einen untergeordneten Einfluss auf den Lastgang haben, wird dieser Bereich im Rahmen der Untersuchung nicht näher betrachtet. Folglich ergibt sich das in Abbildung 69 dargestellte Produktionssystem.

Ein zweiter Bereich des Produktionssystems bildet die Vorfertigung der Getriebewellen ab und ist der Getriebefertigung vorangestellt. Die Vorfertigung besteht aus einer einfachen Produktionslinie, die intern dem Bereich der Getriebefertigung zuliefert. Eine genaue Beschreibung erfolgt in Abschnitt 8.3.4. Des Weiteren werden insbesondere für die Umsetzung des Lastmanagements auch Komponenten der TGA betrachtet.

8 Prototypische Umsetzung und Validierung



Legende: (E) : Eingangslager (A) : Ausgangslager TGA: Technische Gebäudeausrüstung

Abbildung 69: Schematische Darstellung des Umsetzungsszenarios

Nach LÖDDING (2008) kann ein Produktionssystem anhand zentraler steuerungsrelevanter Merkmale charakterisiert werden. Die Ausprägung dieser Merkmale sind für das simulierte Produktionssystem in Abbildung 70 zusammengefasst. Da die zu durchlaufenden Prozessschritte für alle Varianten ähnlich sind und weiterhin keine Rückflüsse zwischen den Werkstätten auftreten, liegt eine niedrige Materialflusskomplexität vor. Der Teilefluss zwischen den Werkstätten erfolgt immer als vollständiges Los. Nachfrageschwankungen gleichen sich zwischen den einzelnen Varianten aus, sodass folglich auch die Kapazitätsschwankungen niedrig sind. Die Stückzahlen und Wiederholhäufigkeiten entsprechen dabei einer Einzel- bis Kleinserienfertigung. Die Fertigung weist eine hohe Kapazitätsflexibilität auf, da maschinenseitig in den Werkstätten jeweils alternative Fertigungsmittel zur Verfügung stehen und personenseitig Überstunden eingesteuert werden können, um Rückstände abzarbeiten.

Kriterium	Ausprägung				
Fertigungsprinzip	Werkbank- prinzip	Baustellen- prinzip	Werkstätten- prinzip	Inselprinzip	Fließprinzip
Fertigungsart	Einmal- fertigung	Einzel- und Kleinserien- fertigung		Serien- fertigung	Massen- fertigung
Teilefluss	Chargen- fertigung	Losweiser Transport		Überlappte Fertigung	One-Piece- Flow
Variantenanzahl	Sehr niedrig	Niedrig	Mittel	Hoch	Sehr hoch
Materialflusskomplexität	Sehr niedrig	Niedrig	Mittel	Hoch	Sehr hoch
Schwankung des Kapazitätsbedarfs	Sehr niedrig	Niedrig	Mittel	Hoch	Sehr hoch
Kapazitätsflexibilität	Sehr niedrig	Niedrig	Mittel	Hoch	Sehr hoch

Abbildung 70: Steuerungsrelevante Kriterien des simulierten Produktionssystems

8.3.3 Anwendung der energieorientierten Steuerungsverfahren

8.3.3.1 Aufbau des Simulationsmodells

Zur Validierung der hybriden energieorientierten Auftragsfreigabe sowie der energieorientierten Reihenfolgebildung wird das beschriebene Produktionssystem als Ablaufsimulationsmodell umgesetzt. Der Modellierung liegen dabei die folgenden Vereinfachungen zugrunde:

- Fertigungsmittel- wie auch Personalausfälle werden statistisch über die Verfügbarkeit der Fertigungsmittel sowie die Mean-time-to-repair abgebildet. Es erfolgt keine Betrachtung einzelner Mitarbeiter.
- Der Transport zwischen den Fertigungsmitteln wird vernachlässigt.
- Alle Fertigungsmittel produzieren stets fehlerfreie Produkte.
- Der Leistungsbedarf eines Betriebszustands wird konstant angenommen und Übergangszeiten zwischen Zuständen vernachlässigt.
- Da die energieorientierte Produktionssteuerung vorrangig auf die 15-Min.-Mittelwerte der Leistungsaufnahme abzielt, werden Anfahrvorgänge und kurzfristige Lastspitzen vernachlässigt.

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

Für einen Simulationszeitraum von 43 Werktagen werden von der Produktionsplanung insgesamt 1235 Fertigungsaufträge generiert, die sich über alle 72 Produktvarianten erstrecken und anhand der verfügbaren Kapazitäten terminiert werden. Die Bearbeitungszeit sowie der Leistungsbedarf während der Bearbeitung sind variantenspezifisch hinterlegt. Da eine energieorientierte Produktionsplanung nicht im Fokus dieser Arbeit liegt, wird der Fahrplan, d. h. der Soll-Lastgang der Fertigung, im Nachhinein aus der Produktionsplanung abgeleitet. Zu diesem Zweck wird während jeder einzelnen Studie zunächst ein störungsfreier Simulationslauf nach Plan-Startterminen durchgeführt und der resultierende Lastgang als Fahrplan gespeichert. In den anschließenden störungsbehafteten Simulationsläufen werden die aus der Steuerungsstrategie resultierenden Abweichungen vom Fahrplan ermittelt und anhand eines exemplarischen Kostenverlaufs des Spotmarktes bewertet. Störungen werden dazu stochastisch über Mean Time Between Failure und Mean Time To Repair simuliert.

8.3.3.2 Aufbau der Simulationsstudie

Um die Leistungsfähigkeit der entwickelten Steuerungsverfahren bewerten zu können, werden für das dargelegte Produktionssystem insgesamt sieben Simulationsszenarien mit unterschiedlichen Steuerungskonfigurationen aufgestellt (vgl. Tabelle 9). Alle Szenarien werden hinsichtlich ihrer logistischen Zielerreichung und die Wirksamkeit der einzelnen Steuerungskomponenten bewertet.

Tabelle 9: Szenarien der Simulationsstudie

Legende:	Szenario						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
● : Kriterium erfüllt							
Verfahren der zentralen Auftragsfreigabe							
Plan-Starttermin	●	●	●	●	●	●	●
Verfahren der Reihenfolgebildung							
FIFO	●						
Geringste Schlupfzeit		●	●				
Energieorientierte Reihenfolgebildung ($\alpha = 0,5$)				●	●		
Energieorientierte Reihenfolgebildung ($\alpha = 1$)						●	●
Dezentrale Auftragsfreigabe							
Energieorientierte Auftragsfreigabe			●		●		●

Im Szenario I erfolgen ausschließlich eine zentrale Auftragsfreigabe nach Plan-Starttermin und die Reihenfolgebildung nach dem First-In-First-Out-Prinzip (FIFO). Die Verfahren verursachen keine Reihenfolgevertauschung, sondern weisen eine hohe Treue zum Produktionsplan auf. Beide Verfahren finden in der Praxis häufig Anwendung und werden aus diesem Grund als Vergleichsszenario betrachtet.

Bei den Szenarien II und III wird die Reihenfolgebildung anhand des geringsten Restschlupfes vorgenommen. Durch Reihenfolgevertauschungen soll auf Planabweichungen reagiert und Terminverzug vermieden werden. Dies entspricht einer energieorientierten Reihenfolgebildung mit dem Faktor $\alpha = 0$. In Szenario III kommt zusätzlich die in Abschnitt 7.3.3 vorgestellte dezentrale Freigabestufe zum Einsatz.

Für die weiteren Szenarien IV bis VII wird der Faktor der energieorientierten Reihenfolgebildung stufenweise erst auf $\alpha = 0,5$ und schließlich auf $\alpha = 1$ erhöht. Diese Extrempunkte werden gewählt, um die Auswirkungen der Energieorientierung zu untersuchen. Die Reihenfolgebildung wird wechselweise mit der dezentralen Freigabestufe kombiniert. Szenario VII entspricht folglich der vollständigen Ausprägung der energieorientierten Steuerungsverfahren.

8.3.3.3 Ergebnisse der Simulationsstudie

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der simulationstechnischen Umsetzung der Auftragsfreigabe- und Reihenfolgebildungsverfahren zusammengefasst. Dabei zeigt sich, dass die Termintreue des Produktionssystems als wichtigste Kenngröße von ursprünglich 87,13 % durch die Anwendung der Schlupfzeitregel auf 88,42 % oder der energieorientierten Reihenfolgebildung ($\alpha = 0,5$) auf 89,88 % gesteigert werden kann. Erst die Erhöhung des Faktors α auf 1 zeigt deutlich negative Auswirkungen auf die Termintreue von bis zu -1,87 %. Die dezentrale Freigabestufe wirkt sich im Rahmen der Studie in allen Fällen minimal negativ auf die Termintreue (ca. -0,5 %) und auf die Auslastung der Fertigungsmittel (ca. -1,0 %) aus, reduziert die Mehrkosten für den Lastausgleich in Kombination mit der energieorientierten Reihenfolgebildung jedoch deutlich.

Infolge der Reihenfolgevertauschungen, die mit Ausnahme von Szenario 1 in allen Szenarien entstehen, nimmt die mittlere Durchlaufzeit gegenüber dem FIFO-Prinzip zu. Eine Ausnahme bildet hier lediglich Szenario VI. Insbesondere die dezentrale Auftragsfreigabe verlängert durch die bewusste Verzögerung des

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

Starttermins einzelner Arbeitsvorgänge eine höhere Durchlaufzeit der Aufträge. Da die Konfiguration der Simulationsstudie keine Bestandsregelung vorsieht, steigen die Umlaufbestände gemessen in der Anzahl der Bauteile, die sich aktuell in der Fertigung befinden, im Vergleich zum Referenzszenario I deutlich an. Insgesamt nimmt der mittlere Umlaufbestand in allen Szenarien, in denen die Schlupfzeit in die Reihenfolgebildung eingeht (Szenario II bis V), gegenüber dem Referenzwert deutlich zu (zwischen 14 und 27 %). Dies liegt vorrangig in der niedrigen Priorisierung von Aufträgen begründet, die deutlich vor ihrem Plan-Liefertermin freigegeben werden und folglich eine hohe Schlupfzeit aufweisen. Die Aufträge liegen über eine verhältnismäßig lange Zeit unbearbeitet als Bestand in der Fertigung. Eine bestandsregelnde zentrale Freigabestufe würde diesem Effekt entgegenwirken.

Tabelle 10: Ergebnisse der Simulationsstudie

		Szenario						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
Gesamt-Termtreue	[%]	87,13	88,42	88,42	89,88	89,47	85,26	84,78
Mittlere Durchlaufzeit	[hh:mm]	[05:59]	[06:19]	[07:01]	[06:05]	[06:51]	[05:59]	[06:38]
Mittlerer Bestand	[# Teile]	52	64	66	59	60	54	51
Gesamt-Verbrauch	[kWh]	96.395	96.391	96.361	96.390	96.373	96.387	96.371
Gesamt-Lastgangabweichung	[kWh]	16.033	13.628	13.449	12.999	12.024	13.052	12.372
Mehrkosten durch Abweichungen	[€]	572,22	477,82	480,85	461,56	428,92	464,79	437,49

Da die Steuerungsverfahren lediglich eine Anpassung der Durchführungszeiten und der Bearbeitungsreihenfolge vornehmen, sind die Einflüsse auf den Gesamtenergieverbrauch der Produktion erwartungsgemäß gering. Durch die erweiterten Steuerungsverfahren wird keine nennenswerte Verbrauchsreduktion, sondern eine Flexibilisierung des Energiebedarfs erreicht.

Die Mehrkosten infolge von Lastgangabweichungen können durch die vorgestellten Steuerungsverfahren gegenüber dem Standardszenario I hingegen deutlich reduziert werden. Abbildung 71 stellt die beiden zentralen Kenngrößen *Mehrkosten* und *Lastgangabweichungen* für alle Szenarien grafisch gegenüber. Vor dem Hintergrund der Gesamtzielsetzung zeigt die Kombination der energieorientierten Reihenfolgebildung ($\alpha = 0,5$) mit der hybriden energieorientierten Auftragsfreigabe (Szenario V) die besten Ergebnisse, da einerseits die Kosten um 25 % reduziert und andererseits die Termintreue um 3 % gesteigert werden kann.

Dies entspricht ebenfalls einer Verbesserung gegenüber der Schlupfzeitregel von rund 10 %. Aus einer weiteren Erhöhung des Faktors α scheint dagegen keine weitere Verbesserung der Zielerreichung zu resultieren.

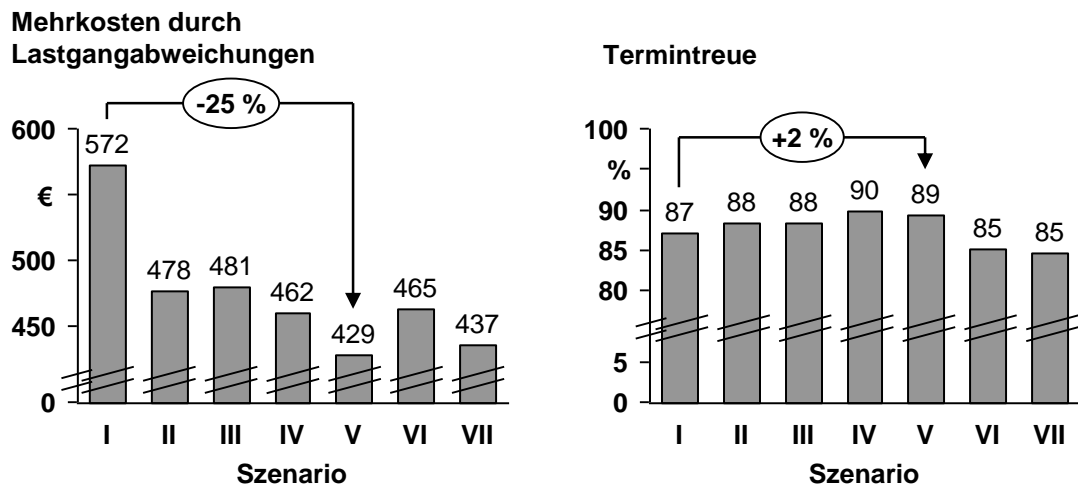


Abbildung 71: Ergebnisse der Simulationsstudie hinsichtlich der Mehrkosten (links) und der Termintreue (rechts)

8.3.4 Anwendung des situativen Lastmanagements

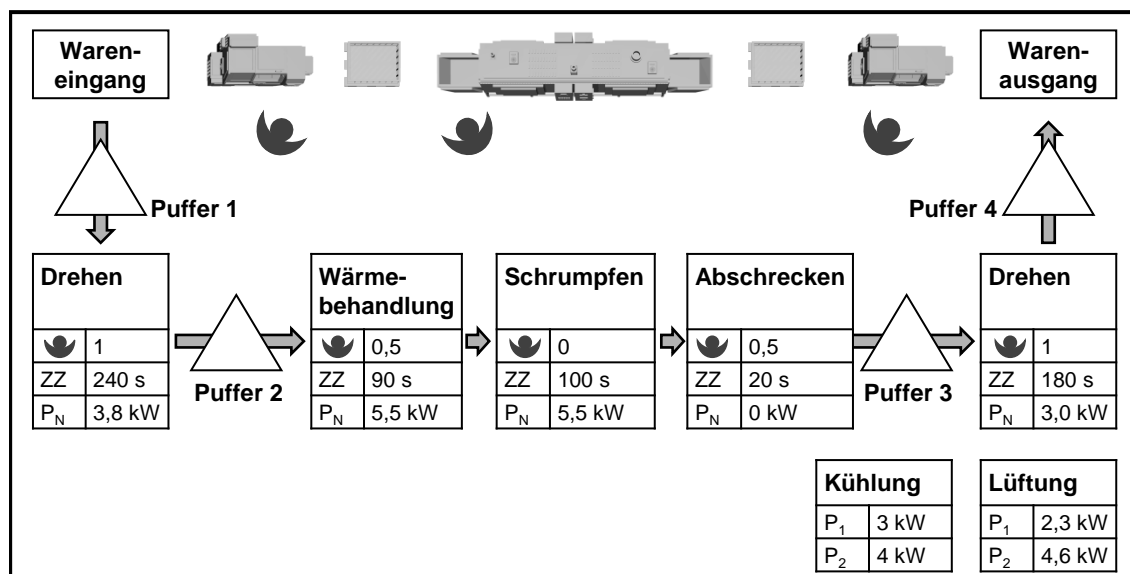
8.3.4.1 Aufbau des Simulationsmodells

Im Weiteren wird eine Anwendung und Validierung des in Abschnitt 7.4.3 entwickelten Lastmanagement-Algorithmus vorgenommen. Zu diesem Zweck wird der Algorithmus mit Hilfe des kommerziellen Solvers IBM ILOG CPLEX für einen beispielhaften Produktionsbereich implementiert. Das situative Lastmanagement beschränkt sich auf die Peripherie des Hauptprozesses. Aus diesem Grund wird für die Validierung des Verfahrens in Ergänzung zum bereits dargestellten Szenario eine Vorfertigung von Zahnwellen als zusätzlicher Produktionsprozess betrachtet. Die Wellen werden nach dem in Abbildung 72 dargestellten Materialfluss gefertigt, der eine mechanische Vorbearbeitung, eine Wärmebehandlung mit anschließendem Aufschumpfen der Zahnräder sowie eine mechanische Endbearbeitung umfasst. Weiterhin werden die Gebäudekühlung und -lüftung als Bestandteil der TGA mitbetrachtet. Die Fertigung erfolgt im Zweischichtbetrieb (16 Stunden) und wird in 64 Perioden von jeweils 15 Minuten aufgeteilt. Da der Materialfluss weiterer Produktionsbereiche (vgl. Abschnitt 8.3.2) vom Lastmanagement unberührt bleibt, wird deren Anteil

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

am Lastgang als fixiert angenommen. Demnach gelten folgende Annahmen für die Umsetzung:

- Die Energieverfügbarkeit setzt sich zusammen aus dem Fahrplan der Vorfertigung und den Lastgangabweichungen der übrigen Bereiche.
- Es wird eine Minimierung der Gesamtstromkosten innerhalb eines Tages gemäß der Zielfunktion nach Formel (27) vorgenommen.
- Die Kostenfunktion (vgl. Abschnitt 6.4.3) umfasst dabei einerseits zeitvariable Spotmarktpreise und andererseits Pönalen für einen nicht erfolgten Lastausgleich.
- Zur Lastanpassung stehen als Maßnahmen die Variation der Arbeitsintensität der Fertigungsprozesse (Produzierend, Stand-by) sowie der TGA (Aus, Stufe 1, Stufe 2) zur Verfügung.
- Die Ausbringungsmenge der Vorfertigung muss aufrechterhalten werden, um Opportunitätskosten zu vermeiden.



Legende: \Rightarrow : Materialfluss \triangle : Puffer ZZ: Zykluszeit P_N : Nennleistung

Abbildung 72: Produktionsszenario für das situative Lastmanagement

Um die Leistungsfähigkeit des Lastmanagement-Algorithmus zu erproben, werden im Rahmen einer Simulationsstudie die Eingangsparameter variiert und auf diese Weise Szenarien gebildet. Da der kurzfristige Stromhandel eine zentrale Maßnahme des Algorithmus darstellt, wird aufbauend auf dem Referenzszenario II untersucht, welchen Einfluss die Spotmarktpreise auf das Ergebnis haben. In den Szenarien I und III werden daher die Spotmarktpreise

exemplarisch um 50 % reduziert bzw. erhöht. Die übrigen Parameter bleiben unverändert (*ceteris paribus*). Weiterhin wird die Auswirkung der Puffergröße analysiert, indem die Puffer in Szenario IV auf die Hälfte reduziert werden. Die Steuerung der produktionsfernen Verbraucher der Gebäudetechnik stellt eine weitere Stellgröße des Algorithmus dar. In den Szenarien V und VI wird daher untersucht, wie sich das Ergebnis des Lastmanagements darstellt, wenn die Gebäudetechnik in Relation zu den Produktionsanlagen einen deutlich geringen Energiebedarf aufweist. Die Szenarien sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Szenarien für die Simulationsstudie des Lastmanagements

	Szenario					
	I	II	III	IV	V	VI
Spotmarktpreis / Pönale						
Multiplikator	1	0,5	1,5	1	1	1
Pufferkapazität						
Multiplikator	1	1	1	0,5	1	1
Leistungsbedarf der Gebäudetechnik						
Multiplikator	1	1	1	1	0,25	0,5

Als Benchmark für das Lastmanagement dient eine vereinfachte Steuerungsstrategie ohne Energiebetrachtungen, deren Ziel in der Minimierung von Umlaufbeständen liegt. Im Vergleichsszenario werden alle Abweichungen über Pönalen ausgeglichen.

8.3.4.2 Ergebnisse der Simulationsstudie

In Abbildung 73 sind grafische Auswertungen für das Szenario II dargestellt, welche die Wirkungsweise des Lastmanagement-Algorithmus verdeutlichen. Unter Ausnutzung der verfügbaren Puffer werden die Zustände der Betriebsmittel dynamisch angepasst, um einen Ausgleich des Lastgangs vorzunehmen. Die obere Hälfte des Lastgangs zeigt den Energiebedarf des betrachteten Produktionsbereichs, wohingegen die untere Hälfte das Energieangebot darstellt. Das Angebot setzt sich zusammen aus dem Fahrplan, den Energieüberschuss anderer Produktionsbereiche (Lastgangabweichungen) und dem kurzfristigen Spotmarkthandel zusammen. Beide Hälften des Lastganges sind deckungsgleich, sodass folglich keine Lastgangabweichung verbleibt. Das Residuum, das nicht über die Schaltung der Betriebsmittel kompensiert werden kann, wird über den Spotmarkt gedeckt, um die Gesamtkosten zu minimieren. Der Algorithmus nutzt

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

die ihm zur Verfügung gestellte Flexibilität des Produktionsbereiches vollständig aus. Es zeigt sich, wie die Pufferbestände zwischen ihren Grenzwerten schwanken, ohne diese zu verletzen. Insbesondere für die TGA werden zahlreiche Schaltvorgänge vorgenommen. Infolge niedrigerer Spotmarktpreise reduzieren sich die Schaltungen für die späteren Perioden.

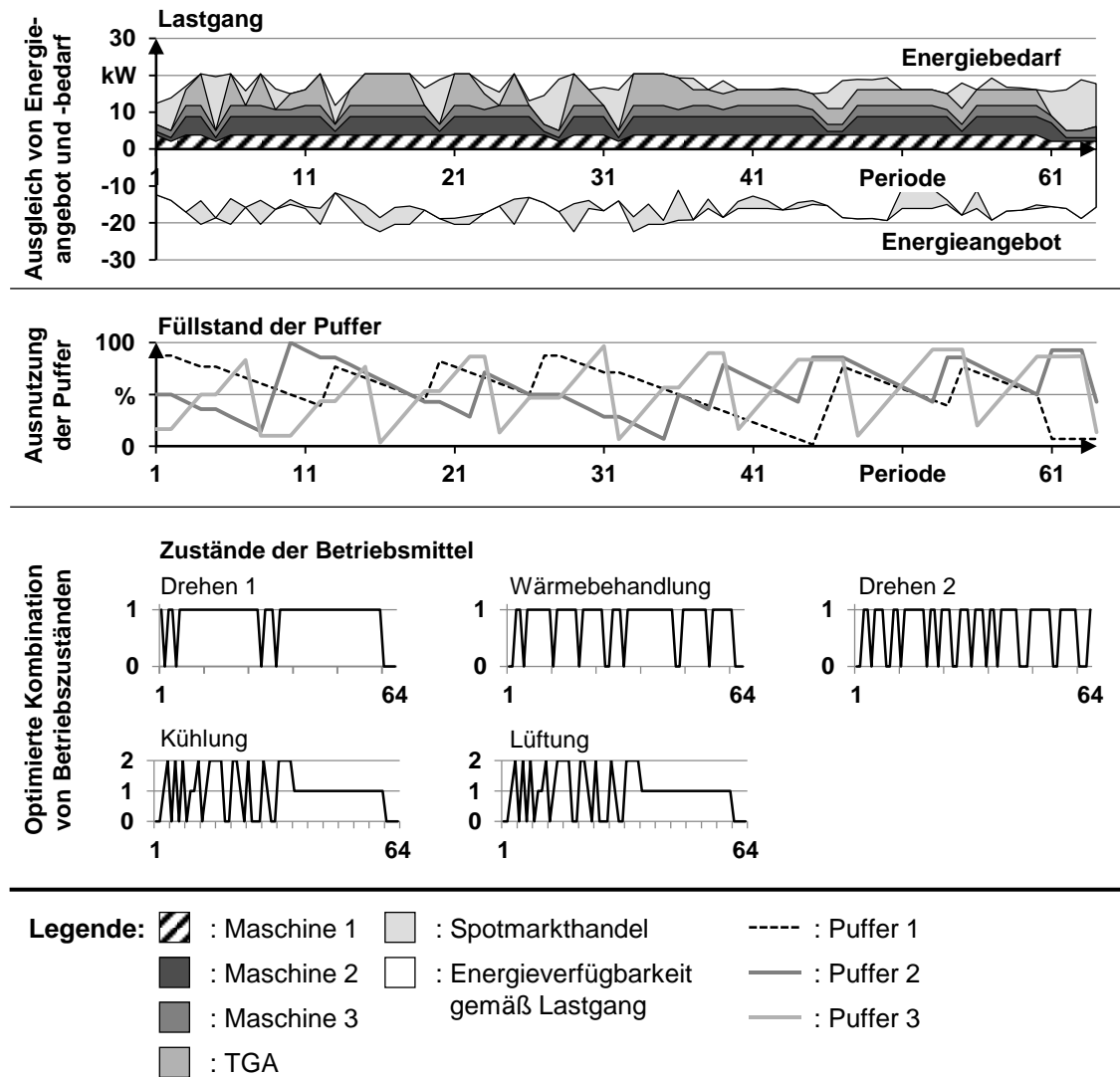
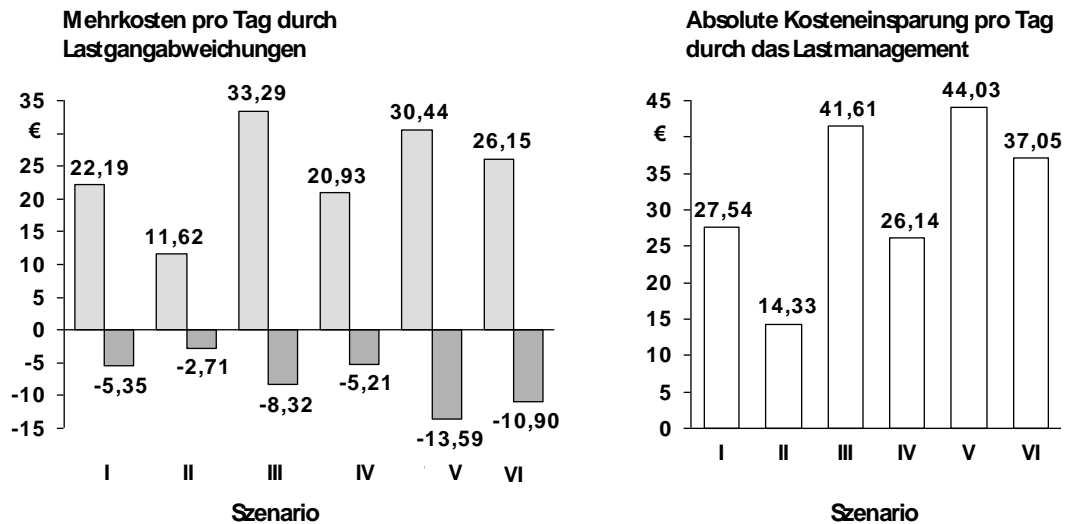


Abbildung 73: Ergebnisse des Lastmanagement-Algorithmus für Szenario II

Insgesamt zeigt der Lastmanagement-Algorithmus die Tendenz, den Spotmarkthandel zu optimieren. Zu diesem Zweck werden in einzelnen Perioden, beispielsweise zwischen Periode 25 und 35, zahlreiche Betriebsmittel heruntergefahren, um größere Energiemengen am Spotmarkt handeln zu können. Dieses Verhalten zeigt sich auch im Vergleich der Szenarien. In den untersuchten Szenarien erreicht der Lastmanagement-Algorithmus in allen Fällen negative Mehrkosten, d. h. Erlöse, durch den Spotmarkthandel (vgl. Abbildung 74).

Gegenüber der Bestandsregelung können die Mehrkosten pro Tag um etwa 14 € bis 44 € reduziert werden. Wie Szenario I bis III zeigen, skalieren die Einsparungen dabei erwartungsgemäß stark mit den Preisen für Lastgangabweichungen.



Legende: □ : Bestandsregelung ■ : Lastmanagement

Abbildung 74: Ergebnisse der Simulationsstudie hinsichtlich der Mehrkosten

Demgegenüber steht ein Anstieg des mittleren Pufferfüllstands von rund 15 % im Referenzszenario auf 45 % durch das Lastmanagement. Im direkten Vergleich der Szenarien I und IV zeigt sich, dass die Einsparungen durch den Algorithmus im untersuchten Anwendungsfall trotz reduzierter Puffergröße stabil bleiben. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass der Algorithmus Fehlmengen oder Überschüsse, die nicht durch die Flexibilität des Produktionssystems kompensiert werden können, rechtzeitig auf dem Spotmarkt ausgleichen kann. Der Gesamtenergiebedarf bleibt auch bei Anwendung des Lastmanagements unverändert bei etwa 113 kWh. Weiterhin zeigt sich, dass durch die Reduzierung des Energiebedarfs der Gebäudetechnik die handelbare Energiemenge zunimmt und somit höhere Einsparungen realisiert werden können.

In einer zweiten Simulationsstudie werden die in Tabelle 11 beschriebenen Szenarien erneut bei einer um 30 % reduzierten Energieverfügbarkeit durchlaufen. Dabei bestätigen sich die grundlegende Tendenz der Ergebnisse und die Minimierung der Stromkosten. In diesem Fall steht die Energie nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung, um durch den Spotmarkthandel Erlöse zu realisieren. Die Mehrkosten nehmen daher auch bei Einsatz des situativen Lastmanagements positive Werte an. Dennoch liegen auch in dieser Studie gegenüber der Bestandsregelung durchschnittliche Einsparungen von 28,35 € pro Tag vor.

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

Hinsichtlich der praktischen Anwendbarkeit des Algorithmus kommt der erforderlichen Rechenzeit hohe Bedeutung zu. Um Lastanpassungen innerhalb eines 15.-Min.-Intervalls vornehmen zu können, sollte binnen weniger Minuten eine Lösung gefunden werden. In den meisten Szenarien beträgt die Rechenzeit in etwa 30 Sekunden²⁶. In einzelnen Szenarien war es dem Algorithmus nicht möglich, die optimale Lösung innerhalb von 10 Minuten zu finden. Jedoch zeigt Abbildung 75, dass in allen Fällen bereits nach maximal 12 Sekunden eine sehr gute Lösung gefunden wurde, die sich im Laufe der Zeit nur noch wenig verbessert hat²⁷. Die Güte der Lösung wird dabei anhand des Gap bewertet, d. h. des relativen Abstands zwischen der nach Branch-and-Bound berechneten oberen und unteren Schranke einer Teillösung. Der Gap liegt in allen Fällen nach wenigen Sekunden kleiner als 5 %, sodass die Rechenzeit des Verfahrens hinreichend kurz ist.

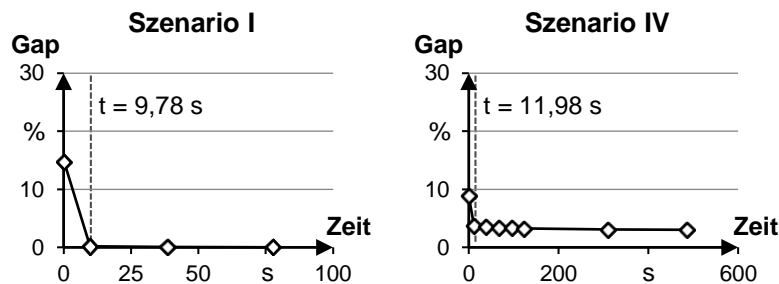


Abbildung 75: Gegenüberstellung der Rechenzeit und der Güte der Lösung

Die Zeitspanne skaliert prinzipiell mit der Größe des Problems und der Anzahl der Maßnahmen. Falls infolge der Vielzahl von Lastmanagementmaßnahmen innerhalb von 10 Minuten keine akzeptable Lösung gefunden werden kann, besteht die Möglichkeit, den Betrachtungshorizont zu verkürzen und beide Schichten separat zu berechnen. Insgesamt zeigt sich als Resultat der Simulationsstudie, dass durch den Algorithmus des situativen Lastmanagements eine deutliche Reduzierung der untertägigen Stromkosten möglich ist. Der Algorithmus erreicht dabei innerhalb sehr kurzer Rechenzeiten bereits gute Lösungen und ist folglich auch für die Optimierung innerhalb von 15-Min.-Intervallen geeignet.

²⁶ Die Berechnung erfolgte mit einem Zwei-Kern-Prozessor vom Typ Intel Core i5 mit einer Taktung von 2,50 Gigahertz und 4 Gigabyte Arbeitsspeicher.

²⁷ Es ist davon auszugehen, dass das Verfahren auch bei deutlich längeren Rechenzeiten keine optimale, sondern lediglich eine gute Lösung gefunden hätte.

8.4 Technisch-Wirtschaftliche Bewertung

8.4.1 Anforderungsbezogene technische Bewertung

Die abschließende Bewertung des Systems zur energieorientierten Produktionssteuerung erfolgt zunächst auf Basis der in Abschnitt 3.6 definierten Anforderungen. Der Erfüllungsgrad der Anforderungen gibt Aufschluss über die technische Effektivität des Verfahrens.

Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt wurde, werden Lastgangabweichungen durch den Einsatz der energieorientierten Steuerungsverfahren deutlich reduziert. Somit ist die Produktionssteuerung in der Lage, Einsparungen, die mit einer höheren Lastgangtreue einhergehen, zu realisieren und trägt folglich zur *Minimierung der betrieblichen Stromkosten* bei. Die elektrische Energie wird dabei als begrenzte Ressource dargestellt, um steuernde Eingriffe vorzunehmen. Durch die Rückführung der aktuellen Produktionssituation im Zuge der Bedarfsüberwachung werden *unerwartete Ereignisse in der Steuerungsreaktion berücksichtigt*. Die *Strombedarfsprognose* bildet dabei einen zentralen Bestandteil der Bedarfsüberwachung und ermöglicht eine Ausweitung des Zeithorizonts der Steuerungsreaktion.

Weiterhin folgt die Einleitung von steuernden Maßnahmen nicht allein den Energiezielen, sondern auch den klassischen Zielgrößen. Wie die Validierung zeigt, kann insbesondere die Termintreue, welche die vorrangige Zielgröße vieler Unternehmen darstellt, trotz Verwendung der energieorientierten Steuerung weiterhin eingehalten werden. Der Anforderung der *ganzheitlichen logistischen Zielerfüllung* konnte somit nachgekommen werden. Durch die Einbeziehung des Lastmanagements in die Produktionssteuerung werden auch Betriebsmittel der *Produktionsperipherie* adressiert. Da die produktionsfernen Verbraucher keinen oder nur geringen Einfluss auf den Materialfluss nehmen, können Lastanpassungen vorgenommen werden, ohne dass der Produktionsfluss gefährdet wird. Die energieorientierten Steuerungsverfahren – insbesondere das situative Lastmanagement – sind prinzipiell nicht an spezielle Formen des Materialflusses gebunden und sind somit *universell*. Jedoch lag der Schwerpunkt der Betrachtung auf einer Produktion nach dem Verrichtungsprinzip. Entscheidend ist, dass die Möglichkeit besteht, zwischen den einzelnen Fertigungsschritten Entscheidungen und Sortierungen vorzunehmen. Für getaktete Fließfertigungen ist der Handlungsspielraum einer Auftragsfreigabe oder einer Reihenfolgebildung folglich eingeschränkt.

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

Die Entwicklung des Informationsmanagements ist in engem Bezug zu bestehenden Normen und Richtlinien erfolgt. Die beschriebenen Funktionen und Datenmodelle richten sich dabei nach allgemeinen Softwarestandards, nicht jedoch nach den Strukturen eines einzelnen Produktes. Folglich hat das *Informationsmanagement einen Referenzcharakter*, der sich auf konkrete Softwarelösungen übertragen lässt.

Unabhängig von der Effektivität des entwickelten Systems stellt die energieorientierte Produktionssteuerung darüber hinaus zu deren Umsetzung eine Reihe von Anforderungen an ein Unternehmen. Dazu zählen insbesondere die folgenden Voraussetzungen:

- Die Anwendung der Verfahren der hybriden energieorientierten Auftragsfreigabe sowie der energieorientierten Reihenfolgebildung sind auf Unternehmen der diskreten Fertigung beschränkt, da sie in den Ablauf einzelner Aufträge eingreifen.
- Die Energiebedarfe der einzelnen Aufträge müssen sich dazu voneinander unterscheiden.
- Weiterhin ist es erforderlich, dass der Energie- bzw. Leistungsbedarf der einzelnen Aufträge bekannt ist oder zumindest ermittelt werden kann.
- Die Bedarfsüberwachung setzt BDE-Prozesse voraus, die eine zeitnahe Rückmeldung von Produktionsereignissen ermöglichen, um ein Abbild der aktuellen Produktionssituation ermitteln zu können.
- Aufgrund der Vielzahl der zu verarbeitenden Informationen ist zur Umsetzung der Steuerung ein Softwaresystem für die Aufgaben der Fertigungsleitebene, beispielsweise ein MES, erforderlich.

8.4.2 Wirtschaftliche Bewertung

In Ergänzung zur technischen Bewertung wird im Folgenden auch eine Abschätzung des monetären Nutzens der energieorientierten Produktionssteuerung und somit eine Bewertung der Effizienz des entwickelten Systems vorgenommen. Zu diesem Zweck wird anhand einer statischen Investitionsrechnung die Amortisationszeit des Steuerungssystems ermittelt. Dies entspricht der Zeitspanne, die erforderlich ist, bis das zur Implementierung aufgewandte Kapital durch Kosteneinsparungen zurückgewonnen wird (VOEGELE & SOMMER 2012, POGGENSEE 2015). Dabei wird die in den Abschnitten 8.3.3 und 8.3.4 untersuchte Produktionsumgebung zugrunde gelegt. Die Beschränkung dieser Produktion auf vorrangig konventionelle Bearbeitungsmaschinen lässt in

8.4 Technisch-Wirtschaftliche Bewertung

gewissem Maße eine Übertragbarkeit der folgenden Betrachtungen auf weitere Maschinenbauunternehmen zu. Es gilt jedoch zu beachten, dass die zur Anwendung der Verfahren erforderliche Flexibilität unter anderem von den Umlaufbeständen und den Auftragsdurchlaufzeiten abhängt. Unternehmen, die ihre Umlaufbestände minimiert haben oder bei denen die Durchführung einzelner Arbeitsschritte mehrere Stunden oder sogar Schichten in Anspruch nimmt, weisen geringere Flexibilität auf. Folglich wird das wirtschaftliche Potenzial in diesen Fällen geringer ausfallen. Eine Allgemeingültigkeit dieser wirtschaftlichen Bewertung kann somit nicht vorausgesetzt werden.

Die zur Implementierung erforderlichen Investitionskosten teilen sich einerseits in die Sachkosten zur Anschaffung von Standardlösungen und andererseits in die zur Softwareanpassung erforderlichen Personalkosten auf (vgl. Tabelle 12). Da es sich bei der entwickelten energieorientierten Produktionssteuerung um ein reines Softwaresystem handelt, sind keine Investitionen in Hardware erforderlich. Sachkosten fallen somit lediglich zur Lizenzierung des Optimierungssolvers (S1) an.

Tabelle 12: Kosten zur Implementierung der energieorientierten Steuerung

Einmalige Investitionskosten				
Sachkosten				
Position	Art	Menge	Stückkosten in EUR	Kosten in EUR
S1	Lizenz Optimierungssolver	1	6.000,00 €	6.000,00 €
Summe der Sachkosten				6.000,00 €
Personalkosten				
Position	Art	Personentage	Tagessatz in EUR	Kosten in EUR
P1	Datenmodell und Schnittstellen	20	800,00 €	16.000,00 €
P2	Bedarfsüberwachung	15	800,00 €	12.000,00 €
P3	Werkerdialoge	10	800,00 €	8.000,00 €
P4	Steuerungsfunktionen	20	800,00 €	16.000,00 €
P5	Mitarbeiterschulung	10	500,00 €	5.000,00 €
P6	Energiedatenerhebung	30	500,00 €	15.000,00 €
Summe der Personalkosten				72.000,00 €
Investitionskosten				78.000,00 €

Zur Implementierung der Softwarefunktionen sind zusätzliche Entwicklungsaufwände notwendig, die auf Basis von Erfahrungen mit vergleichbaren Projekten in

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

Form von Personentagen quantifiziert werden (vgl. Tabelle 12). Die Aufwände setzen sich aus der Anpassung der Datenbank zur Umsetzung der Referenzarchitektur (P1), der Prognosefunktionen zur Bedarfsüberwachung (P2), der Erweiterung der Werkerdialoge (P3) sowie der automatisierten Steuerungsfunktionalitäten (P4) zusammen. Zudem müssen intern Schulungen (P5) sowie die Erhebung der Energiedatenbasis für die Bauteile (P6) durchgeführt werden.

Zur Umsetzung wird für einen Softwareentwickler ein marktüblicher Tagessatz von 800,00 € angenommen. Die Schulung sowie die Datenerhebung werden hingegen mit einem reduzierten Tagessatz von 500,00 € verrechnet, da diese Arbeitsinhalte nicht von Softwarespezialisten durchgeführt werden müssen. Folglich ergibt sich für die Abschätzung der Investitionskosten²⁸ die Summe aus Sach- und Personalkosten zu 78.000,00 €.

Zusätzlich werden die laufenden Betriebskosten betrachtet, die jedes Jahr für die Wartung und Pflege des Softwaresystems entrichtet werden müssen. Wie in der Praxis üblich, werden die Betriebskosten für eine eigenentwickelte Lösung als Prozentsatz des zugrunde liegenden Entwicklungsaufwands definiert. In diesem Fall werden die jährlichen Wartungskosten als 10 % des Auftragswerts angenommen. Der Entwicklungsaufwand setzt sich aus den Positionen P1 bis P4 der Tabelle 12 zusammen und liegt somit bei 52.000,00 €. Folglich resultieren daraus Betriebskosten (B1) von 5.200,00 € pro Jahr (vgl. Tabelle 13).

Tabelle 13: Jährliche Betriebskosten der energieorientierten Steuerung

Jährliche Betriebskosten				
Position	Art	Menge	Stückkosten in EUR	Kosten in EUR
B1	Wartung und Pflege des Steuerungssystem	1	5.200,00	5.200,00 €
Summe der Betriebskosten				5.200,00 €

Die Amortisationszeit des Steuerungssystems ergibt sich aus dem Quotienten der Investitionskosten und der jährlichen Netto-Einsparung, d. h. der Einsparung abzüglich der Betriebskosten. Folglich ist zunächst eine differenzierte Abschätzung der Einsparung erforderlich. Da die energieorientierte Produktionssteuerung die logistischen Zielgrößen, insbesondere die Termintreue, nur wenig beeinflusst,

²⁸ Die Abschätzung setzt voraus, dass bereits ein Softwaresystem für die Fertigungsleitebene, z. B. ein MES, vorhanden ist. Die Investitionskosten in eine solche Software übersteigen in der Regel die Größenordnung von 300.000,00 € und sind durch einen einzelnen Anwendungsfall kaum zu amortisieren.

werden diese bei der Berechnung nicht näher betrachtet. Die Einsparungen setzen sich insgesamt folglich zusammen aus den direkten Einsparung durch die Verwendung der energieorientierten Steuerungsverfahren und indirekten Einsparungen durch eine gesteigerte Fahrplantreue.

Die direkten Einsparungen werden anhand der Umsetzungsbeispiele in den Abschnitten 8.3.3 und 8.3.4 abgeschätzt. Als Ausgangsbasis für die Amortisationsrechnung dient das erste Szenario²⁹ des Umsetzungsbeispiels (vgl. Abschnitt 8.3.3.2), das aufgrund seiner Verbreitung und praktischen Relevanz als Vergleichsszenario definiert wurde. Demgegenüber wird im Hinblick auf die energieorientierte Auftragsfreigabe und Reihenfolgebildung das Szenario V und im Hinblick auf das Lastmanagement das Szenario I analysiert. Die in den Simulationsstudien ermittelten Einsparungen von 143,30 € für einen Zeitraum von 43 Tagen (vgl. Abschnitt 8.3.3.3) und 27,54 € für einen Tag (vgl. Abschnitt 8.3.4.2) werden für die Amortisationsrechnung auf einen Betrachtungszeitraum von 250 Tagen extrapoliert. Es ergeben sich daraus in Summe pro Jahr direkte Stromkosteneinsparungen von rund 7.716,40 € für das Umsetzungsbeispiel.

Weiterhin ergeben sich aus der resultierenden Steigerung der Fahrplantreue sekundäre Einsparpotenziale, welche die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zusätzlich steigern. Durch die Einhaltung des Fahrplans wird die Verhandlungssituation gegenüber dem Energieversorger beim langfristigen Strombezug verbessert, sodass die Möglichkeit auf Rabattierung des Strompreises besteht (MÜLLER et al. 2013). Zur Kalkulation dieser indirekten Einsparung ist zunächst eine Abschätzung des jährlichen Gesamtenergiebedarfs des Umsetzungsbeispiels erforderlich. Gemäß den in den Abschnitten 8.3.3.3 und 8.3.4.2 aufgezeigten Ergebnissen liegt der Energiebedarf der Produktion im ersten Umsetzungsbeispiel bei 96.373 kWh für 43 Tage und im zweiten Beispiel bei 113 kWh pro Tag. Dies entspricht einem Gesamtenergiebedarf der Produktion von rund 588.558 kWh pro Jahr. Wird davon ausgegangen, dass die Produktion die Hälfte des Gesamtstromverbrauchs der Fabrik ausmacht (vgl. Abschnitt 2.2.2), folgt daraus für die Umsetzungsbeispiele ein Jahresverbrauch von circa 1,2 GWh.

Um das Umsetzungsbeispiel auf die Größe eines mittleren Unternehmens zu skalieren, wird der Gesamtverbrauch mit dem Faktor 2 auf 2,4 GWh multipliziert. Diese Skalierung wird auch für die direkten Einsparungen vorgenommen, die sich somit zu 14.432,80 € pro Jahr ergeben. Werden die Strombezugskosten

²⁹ In diesem Szenario erfolgen die Auftragsfreigabe nach dem Plan-Starttermin und die Reihenfolgebildung nach dem FIFO-Prinzip.

8 Prototypische Umsetzung und Validierung

eines produzierenden Unternehmens von 24,40 ct pro kWh³⁰ angenommen, resultieren daraus Stromkosten von ungefähr 585.600,00 €. Unter der Annahme, dass durch die erhöhte Fahrplantreue beim Energieerzeuger beispielsweise eine Reduzierung des Strompreises von 2 %³¹ erwirkt werden kann, entspricht dies einer jährlichen indirekten Einsparung von 11.712,00 € pro Jahr.

Für die Amortisationsdauer gilt nach VOEGELE & SOMMER (2012) die Formel (32):

$$\begin{aligned} t_{Amortisation} &= \frac{\text{Investitionskosten (€)}}{\text{durchschn. jaehrl. Nutzen (€/Jahr)}} \\ &= \frac{78.000,00 \text{ €}}{20.944,80 \text{ € pro Jahr}} = 3,72 \text{ Jahre} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \text{mit } \text{Nutzen} &= \text{dir. Einsparung} + \text{ind. Einsparung} - \text{Betriebskosten} \\ &= 14.432,80 \text{ €} + 11.712,00 \text{ €} - 5200,00 \text{ €} = 20.944,80 \text{ €} \end{aligned}$$

Die Nutzungsdauer allgemeiner Betriebsausstattung wird in der Regel mit acht Jahren angegeben (BMF 2000). Da die durchschnittliche Nutzungsdauer die Amortisationszeit von 3,72 Jahren übersteigt, ist für dieses Umsetzungsbeispiel eine Amortisation des Steuerungsverfahrens innerhalb eines nach betriebswirtschaftlichen Kriterien akzeptablen Zeitraums möglich. Darüber hinaus ermöglicht die Fahrplantreue eine stärkere Integration der Eigenerzeugung und somit einen höheren Eigenverbrauchsanteil, der in ähnlicher Weise zu einer Reduzierung des durchschnittlichen Strompreises führt.

8.5 Fazit

Im Rahmen der technischen Umsetzung (vgl. Abschnitt 8.2) sowie der simulationstechnischen Validierung (vgl. Abschnitt 8.3) konnte gezeigt werden, dass das entwickelte System der energieorientierten Produktionssteuerung technisch in der Lage ist, die zuvor definierten Anforderungen zu erfüllen. Durch die Anwendung der ineinandergreifenden Steuerungsverfahren können signifikante Reduktionen der Lastgangabweichungen erreicht werden, ohne dass die Ausbringung und die Termintreue der Produktion gefährdet werden (vgl. Abschnitt 8.3.3.3). Durch die Integration des Spotmarkthandels in das Lastmanagement sind zusätzliche Potenziale zur Kosteneinsparung erschlossen worden.

³⁰ Hierbei handelt es sich um die Angabe eines repräsentativen Unternehmens.

³¹ Es handelt sich um eine Expertenschätzung.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des Systems hat sich gezeigt, dass dessen Amortisation in einem exemplarischen Anwendungsfall bereits für mittlere Unternehmen innerhalb einer akzeptablen Zeitspanne möglich ist (vgl. Abschnitt 8.4.2). Für größere Unternehmen liegt Einsparungspotenzial der Verfahren noch einmal höher.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Bedeutung der Nachhaltigkeit agieren produzierende Unternehmen heutzutage unter veränderten Randbedingungen. Infolge der Energiewende, die in Deutschland und auch weltweit vorangetrieben wird, nehmen erneuerbare Energien einen immer höheren Stellenwert in der Energieversorgung ein, verursachen dabei jedoch eine gesteigerte Volatilität des Stromangebots. Den Ungleichgewichten zwischen Erzeugung und Verbrauch begegnen die Energieversorger zunehmend durch Demand Side Management, z. B. in Form zeitvariabler Stromtarife. Vor diesem Hintergrund bieten sich industriellen Energieverbrauchern, die in der Lage sind, ihren Bedarf dynamisch an das Angebot anzupassen und somit energieflexibel zu reagieren, zusätzliche Vergütungs- und Ersparnispotenziale in Bezug auf deren Stromkosten. Die elektrische Energie wird in diesem Zusammenhang nicht weiter als unbegrenzte Ressource verstanden, sondern ist in Zeiträumen mit hohen Strompreisen nur limitiert verfügbar. Da die Stromkosten dabei in unmittelbarer Konkurrenz zu den übrigen logistischen Zielen eines Unternehmens (z. B. der Termintreue) stehen, wird die Verfügbarkeit der elektrischen Energie somit zu einer Planungsgröße, die im Rahmen der PPS einer gezielten Disposition unterliegt. Zur Minimierung der betrieblichen Stromkosten wird in der Produktionsplanung in Abstimmung mit den unterschiedlichen Strombezugsformen eine Vorfestlegung des Energiebedarfs vorgenommen. Infolge dieser Planvorgaben steht der Produktionssteuerung zur Durchsetzung der geplanten Fertigungsaufträge nur ein limitiertes Angebot an Energie in Form eines Soll-Lastgangs zur Verfügung.

Ausgehend von dieser Motivation ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit der Stand der Technik im Hinblick auf die Abbildung der Stromkosten in der PPS und insbesondere die Umsetzung in kommerziell verfügbaren Softwaresystemen untersucht worden. Weiterhin ist eine Analyse bestehender Ansätze zur Modellierung produktionsbedingter Energiebedarfe mit dem Ziel vorgenommen worden, deren Integration in eine Produktionssteuerung zu bewerten. Darauf aufbauend konnte der sich ergebende Handlungsbedarf abgeleitet und in konkreten Anforderungen an eine energieorientierte Produktionssteuerung zusammengefasst werden. Zu deren Erfüllung ist im Verlauf der weiteren Arbeit ein Steuerungssystem entwickelt worden, das sich im Gesamtüberblick aus den

Systemelementen *Energieorientiertes Informationsmanagement*, *Bedarfsüberwachung* sowie *Energieorientierte Steuerungsverfahren* zusammensetzt. Das vorrangige Ziel dieses Steuerungssystems ist es, im engen Zusammenspiel mit der Produktionsplanung durch eine Minimierung von Lastgangabweichungen zu einer Reduktion der Gesamtstromkosten beizutragen.

Das *energieorientierte Informationsmanagement* bildet unabhängig von einer konkreten Softwareimplementierung die informationstechnische Basis des Steuerungssystems. Zu diesem Zweck ist zunächst aus der Analyse des zugrundeliegenden Strommarktes eine funktionale Aufteilung innerhalb der energieorientierten PPS vorgenommen worden, wonach die Produktionssteuerung auf den Zeithorizont eines Produktionstages fokussiert wird. Darauf aufbauend ist der Informationsaustausch zwischen der Planungs- und der Steuerungsebene anhand von Belegungsplänen und Fahrplänen sowie der Austausch mit dem Energieversorger dargelegt worden. Die dabei entwickelten Datenstrukturen und Schnittstellen erlauben eine Umsetzung der Referenzarchitektur in Softwaresystemen der PPS.

Auf der Grundlage der somit verfügbaren Informationen schafft die *Bedarfsüberwachung* während des Betriebsablaufs ein aktuelles Abbild der Produktionssituation und nimmt eine Prognose des resultierenden Lastgangs vor. In diesem Zusammenhang kommt insbesondere der Rückführung der Betriebsdaten in die Produktionssteuerung eine gewichtige Bedeutung zu. Durch den Abgleich der Lastgangprognose mit dem Fahrplan aus der Produktionsplanung lassen sich Erwartungen zu den Lastgangabweichungen ermitteln. Da die Strombezugskosten im Rahmen der energieorientierten PPS zeitlich variabel sind, folgt daraus, dass auch Abweichungen im Zeitverlauf nicht gleichwertig sein müssen. Dementsprechend ist unter Berücksichtigung externer und interner Energieversorger ein Kostenmodell für die untertägige Produktionssteuerung definiert worden, anhand dessen sich die Lastgangabweichungen monetär bewerten lassen, um eine Priorisierung bei deren Behandlung vorzunehmen.

Als drittes Systemelement sind energieorientierte Steuerungsverfahren entwickelt worden, deren Aufgabe es ist, diese kritischen Lastgangabweichungen zu adressieren und einen Lastausgleich vorzunehmen. Durch die flexible Lastanpassung wird die Fahrplantreue der Produktion erhöht und somit werden Mehrkosten infolge von Abweichungen vermieden. Zu diesem Zweck sind die sich ergänzenden Verfahren der *energieorientierten Reihenfolgebildung*, der *hybriden energieorientierten Auftragsfreigabe* sowie des *situativen Lastmanagements*

definiert und in einer Steuerungskaskade konfiguriert worden. Anhand dieser Verfahren lässt sich unter Berücksichtigung der aktuellen Verfügbarkeit elektrischer Energie ein Feinabgleich der Auftragsreihenfolge und der jeweiligen Starttermine sowie eine gezielte Ansteuerung prozessperipherer Verbraucher vornehmen.

Im Zuge einer prototypischen Umsetzung der Referenzarchitektur in einer produktionstechnischen Lernfabrik konnte zunächst die technische Machbarkeit des entwickelten Steuerungssystems auf Basis der Softwarelösung SAP ME aufgezeigt werden. Darüber hinaus konnte in einer Reihe simulationstechnischer Experimente die Leistungsfähigkeit der energieorientierten Produktionssteuerung im Vergleich zu konventionellen Verfahren aufgezeigt werden. Dabei hat sich gezeigt, dass die entwickelten Steuerungsverfahren zu einer deutlichen Reduzierung der Lastgangabweichungen und somit der Stromkosten beitragen. Die daraus resultierende monetäre Einsparung und somit die Wirtschaftlichkeit des Systems sind zum Abschluss dieser Arbeit umfassend diskutiert worden. Die energieorientierte Produktionssteuerung trägt signifikant zur Einsparung betrieblicher Stromkosten bei und amortisiert sich bereits nach wenigen Jahren.

9.2 Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist die Abbildung und gezielte Steuerung der elektrischen Energie innerhalb der Produktionssteuerung vorgenommen worden. Vor dem Hintergrund des immer weiteren Fortschritts der Energiewende und der politischen sowie gesellschaftlichen Bestätigung der Relevanz dieses Themas, bietet die Weiterentwicklung der vorgestellten Steuerungsverfahren und die nähere Analyse der angrenzenden Bereiche – insbesondere der Produktionsplanung – vielversprechende Ansätze für zukünftige Forschungsaktivitäten.

Die energieorientierte Produktionssteuerung setzt ein enges Zusammenspiel mit dem übergeordneten Planungsprozess voraus. Wie sich bereits im Stand der Technik gezeigt hat, sind zwar umfassende Aktivitäten im Bereich der Belegungsplanung unter Berücksichtigung der Energiekosten vorgenommen worden, jedoch bietet sich an, diese Verfahren auch auf die vorgelagerten Planungsschritte, d. h. auf die Kapazitäts- und Bedarfsplanung sowie die Losgrößenbildung auszuweiten, um den wirtschaftlichen Nutzen der energieorientierten PPS zu maximieren.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Wie im Zuge der vorliegenden Arbeit dargelegt wurde, stehen steuernde Eingriffe zur Anpassung des Lastgangs infolge der Opportunitätskosten in Konkurrenz zur betrieblichen Leistungserbringung. Das entwickelte Steuerungssystem bemisst die logistische Zielerfüllung eines Produktionssystems vorrangig in der Zielgröße der Termintreue. Eine Weiterentwicklung der energieorientierten Produktionssteuerung kann hingegen das vorgestellte Kostenmodell auch auf logistische Kosten der Auftragsabwicklung ausdehnen. Zu diesem Zweck können beispielsweise die Opportunitätskosten für entgangene Produktionsleistung detailliert quantifiziert werden, um somit die Entscheidungsfindung weiter zu verbessern. Weiterhin ließe sich dabei untersuchen, inwieweit der Zeithorizont der Produktionssteuerung erweitert werden kann, um beispielsweise nicht nur einen Tag sondern eine gesamte Woche abzudecken.

Grundsätzlich ist die vorgestellte energieorientierte Produktionssteuerung dazu imstande, Lastspitzen, die sich auf den Leistungspreis eines Unternehmens auswirken, als Teil des Kostenmodells abzubilden und zu kompensieren. Die in der Bedarfsüberwachung eingesetzten Energiemodelle lassen jedoch keine Prognose von Lastspitzen zu, sodass deren Identifikation nur für das aktuelle Abrechnungsintervall gewährleistet ist. Die Weiterentwicklung des Energiemodells für eine Prognose von Lastspitzen erscheint daher ebenfalls vielversprechend.

Die entwickelten Steuerungsverfahren sind von ihrem inhärenten Grundprinzip her nicht an einen speziellen Energieträger gebunden. Wenn die Struktur anderer Energiemärkte die Bildung von Fahrplänen sowie deren Einhaltung ermöglicht und vergütet, erscheint eine Übertragung der energieorientierten Produktionssteuerung auf diese Energieträger möglich. Für weitere Forschungsvorhaben sollten daher die Strukturen der Energiemärkte, beispielsweise für Gas oder Wärme, analysiert und gegebenenfalls eine entsprechende Weiterentwicklung der Produktionssteuerung angestrebt werden.

10 Literaturverzeichnis

50HERTZ et al. 2016

50Hertz Transmission GmbH (Hrsg.); Amprion GmbH (Hrsg.); TransnetBW GmbH (Hrsg.); TenneT TSO GmbH (Hrsg.): Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung. <https://www.regelleistung.net/ext/>. Zuletzt abgerufen am: 10.01.2016.

ABELE et al. 2012a

Abele, E.; Schrems, S.; Eisele, C.; Schraml, P.: Simulation-Based Assessment of the Energy Consumption of Manufacturing Processes. In: Dornfeld, D. A. (Hrsg.); Linke, B. S. (Hrsg.): Leveraging Technology for a Sustainable World, S. 375-379. Berlin: Springer. 2012 ISBN: 978-3-642-43813-4.

ABELE et al. 2012b

Abele, E.; Schrems, S.; Schraml, P.: Energieeffizienz in der Fertigungsplanung: Frühzeitige Abschätzung des Energieverbrauchs von Produktionsmaschinen in der Mittel- und Großserienfertigung. wt Werkstattstechnik online 102 (2012) 1/2, S. 38-42.

ABELE et al. 2016

Abele, E.; Schraml, P.; Moog, D.: Electric Load Management on Machine Tools. Procedia CIRP 55 (2016), S. 164-169.

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3-44642-595-8.

ACATECH 2015

acatech/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.): Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Stabilität im Zeitalter der erneuerbaren Energien. Halle (Saale): Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, 2015. ISBN: 978-3-8047-3503-3.

ALBAT et al. 2012

Albat, S.; Grabowski, K.; Seefeldt, F.: vbw-Studie Energieeffizienz in der Industrie. München: vbw 2012.

ANDERL et al. 2015

Anderl, R.; Picard, A.; Wang, Y.; Fleischer, J.; Dosch, S.; Klee, B.; Bauer, J.: Leitfaden Industrie 4.0: Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand. Frankfurt: VDMA Forum Industrie 4.0 2015.

ANDELFINGER & HÄNISCH 2017

Andelfinger, V.P.; Hänisch, T. (Hrsg.): Industrie 4.0: Wie cyber-physische Systeme die Arbeitswelt verändern. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2017. ISBN: 978-3-658-15556-8.

APPELRATH et al. 2011

Appelrath, H.-J.; Mayer, C.; Breuer, A.; Drzisga, T.; König, A.; Luhmann, T.; Maerten, M.; Terzidis, O.: Deutschlands Energiewende kann nur mit einem Smart Grid gelingen.

http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/E-Energy/Deutschlands_Energiewende_kann_nur_mit_Smartgrids_gelingen_1_.pdf.
Zuletzt abgerufen am: 28.01.2017.

ARNOLD et al. 2011

Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmanns, K. (Hrsg.): Handbuch Logistik. 3. Aufl. Berlin: Springer 2008.
ISBN: 978-3-540-72928-0.

ARTIGUES et al. 2013

Artigues, C.; Lopez, P.; Hait, A.: The Energy Scheduling Problem: Industrial Case-study and Constraint Propagation Techniques. International Journal of Production Economics 143 (2013), S. 13-23.

AURICH et al. 2012

Aurich, J. C.; Carrella, M.; Steffes, M.: Evaluation of Abrasive Processes and Machines with Respect to Energy Efficiency. In: Dornfeld, D. A. (Hrsg.); Linke, B. S. (Hrsg.): Leveraging Technology for a Sustainable World, S. 329-333. Berlin: Springer. 2012 ISBN: 978-3-642-43813-4.

BAFA 2017

Bundesverband für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Drittländerskohlepreis.
http://www.bafa.de/DE/Energie/Rohstoffe/Drittländerskohlepreis/drittländerskohlepreis_node.html. Zuletzt abgerufen am: 31.01.2017.

BALOGUN et al. 2013

Balogun, V.A.; Mativenga, P.T.: Modelling of Direct Energy Requirements in Mechanical Machining Processes. Journal of Cleaner Production 41 (2013), S. 179-189.

BDEW 2015

Bundesverband für Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: BDEW-Strompreisanalyse August 2015: Haushalte und Industrie.
Berlin: BDEW 2015.

BECHTE 1984

Bechte, W.: Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung. Dissertation Universität Hannover.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1984. ISBN: 3-18-147002-3.

BECKER & DELFMANN 2004

Becker, J. (Hrsg.); Delfmann, P. (Hrsg.): Referenzmodellierung - Grundlagen, Techniken und domänenbezogene Anwendung.
Heidelberg: Physica 2004.

BEIER 2017

Beier, J.: Simulation Approach Towards Energy Flexible Manufacturing Systems. Dissertation Technische Universität Braunschweig. Berlin: Springer 2017. ISBN: 978-3-319-46638-5.

BEIER et al. 2015

Beier, J.; Thiede, S.; Hermann, C.: Increasing Energy Flexibility of Manufacturing Systems through Flexible Compressed Air Generation. *Procedia CIRP* 37 (2015), S. 18-23.

BEIER et al. 2016a

Beier, J.; Thiede, S.; Hermann, C.: Energy Flexibility of Manufacturing Systems for Variable Renewable Energy Supply Integration: Real-time Control Method and Simulation. *Journal of Cleaner Production* 141 (2016), S. 648-661.

BEIER et al. 2016b

Beier, J.; Neef, B.; Thiede, S.; Hermann, C.: Integrating On-site Renewable Electricity Generation into a Manufacturing System with Intermittent Battery Storage from Electric Vehicles. *Procedia CIRP* 48 (2016), S. 483-488.

BENETTI et al. 2015

Benetti, G.; Caprino, D.; Della Vedova, M.L.; Facchinetti, T.: Electric Load Management Approaches for Peak Load Reduction: A Systematic Literature Review and State of the Art. *Sustainable Cities and Society* 20 (2015), S. 124-141.

BERG & BORCHERT 2014

Berg, M.; Borchert, S.: Strategischer Energieeinkauf: Der Energieeinkauf zwischen liberalisierten Märkten und einer wechselhaften Energiepolitik in Deutschland. Frankfurt am Main: BME e.V. 2014.

BERLAK 2003

Berlak, J.: Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen. Dissertation Technische Universität München. München: Utz 2003 (Forschungsberichte *iwb* 181).

BNETZA & BKARTA 2015

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Hrsg.); Bundeskartellamt (Hrsg.): Monitoringbericht 2015. Berlin: BNetzA 2015.

BMF 2000

Bundesministerium der Finanzen (Hrsg.): AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter („AV“).
http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuertemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/2000-12-15-afa-103.pdf?__blob=publicationFile&v=3. Zuletzt abgerufen am: 27.03.2017.

BMJ 1998

Bundesministerium der Justiz (Hrsg.): Bundesgesetzblatt I/23: Gesetz zur Neuregelung des Energiewirtschaftsrechts. Köln: Bundesanzeiger 1998.

BMJV 2014

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (Hrsg.): Bundesgesetzblatt I/33 Art. 1: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz). Köln: Bundesanzeiger 2014.

BMJV 2016

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (Hrsg.): Bundesgesetzblatt I/65 Art. 2: Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes. Köln: Bundesanzeiger 2016.

BMWi 2014

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Die Energie der Zukunft - Erster Fortschrittsbericht zur Energiewende. Berlin: BMWi 2014.

BMWi & BMU 2010

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin: BMWi 2010.

BOGDANSKI et al. 2013

Bogdanski G.; Schönemann, M.; Thiede, S., Andrew, S.; Herrmann, C.: An Extended Energy Value Stream Approach Applied on the Electronics Industry. In: Emmanouilidis, C.; Taisch, M.; Kiritsis, D. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services. APMS 2012. IFIP Advances in Information and Communication Technology 397 (2013) S. 65-72. Berlin: Springer, 2013. ISBN: 978-3-642-40351-4.

BÖNING et al. 2013

Böning, C.; Nyhuis, P.; Ullmann, G.: Sparen trotz konstantem Energieverbrauch. Computer & Automation 4 (2013), S. 28-31.

BÖNING 2013

Böning, C.: Stromintensive Fertigung: Energiekostenorientierte Belegungsplanung. IT&Production 14 (2013) 12, S. 88-89. ISSN 1439-7722.

BONNESCHKY 2002

Bonneschky, A.: Integration energiewirtschaftlicher Aspekte in Systeme der Produktionsplanung und -steuerung. Dissertation Brandenburgische Technische Universität. Cottbus: disseration.de - Verlag im Internet 2002. ISBN: 3-89825-454-2.

BONVOISIN et al. 2013

Bonvoisin, J.; Thiede, S.; Brissaud, D.; Herrmann, C.: An Implemented Framework to Estimate Manufacturing-related Energy Consumption in Prod-

uct Design. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 26 (2013) 9, S. 866-880.

BORNSCHLEGEL et al. 2014

Bornschlegel, M.; Paryanto, M.S.; Kreitlein, S.; Bregulla, M.; Franke, J.: Energy Planning of Manufacturing Systems with Methods-Energy Measurement (MEM) and Multi-Domain Simulation Approach. Applied Mechanics and Materials 655 (2014), S. 53-59.

BREITHAUPT 2001

Breithaupt, J.-W.: Rückstandsorientierte Produktionsregelung von Fertigungsbereichen. Grundlagen, und Anwendungen. Dissertation Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.

BRUCKNER et al. 2014

Bruckner, T.; Bashmakov, I.A.; Mulugetta, Y.; Chum, H.; de la Vega Navarro, A.; Edmonds, J.; Faaij, A.; Fungtammasan, B.; Garg, A.; Hertwich, E.; Honnery, D.; Infield, D.; Kainuma, M.; Khennas, S.; Kim, S.; Nimir, H.B.; Riahi, K.; Strachan, N.; Wiser, R.; Zhang, X.: Energy Systems. In: Edenhofer, O.; Pichs-Madruga, R.; Sokona, Y.; Farahani, E.; Kadner, S.; Seyboth, K.; Adler, A.; Baum, I.; Brunner, S.; Eickemeier, P.; Kriemann, B.; Savolainen, J.; Schlömer, S.; von Stechow, C.; Zwickel, T.; Minx J.C. (Hrsg): Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

BRUZZONE et al. 2012

Bruzzone, A.A.G. ; Anghinolfi, D.; Paolucci, M.; Tonelli, F.: Energy-aware Scheduling for Improving Manufacturing Process Sustainability: A Mathematical Model for Flexible Flow Shops. CIRP Annals Manufacturing Technology 61 (2012), S. 459-462.

BUKVIC-SCHÄFER 2007

Bukvic-Schäfer, A.S.: Lastmanagement: Nutzung der Thermischen Kapazität von Gebäuden als nichtelektrische Energiespeicher in elektrischen Versorgungsnetzen. Dissertation Universität Kassel. Kassel: kassel university press 2007. ISBN: 978-3-89958-356-4.

BULLINGER 1995

Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Arbeitsgestaltung. Wiesbaden: Vieweg +Teubner 1995. ISBN: 978-3-66307-797-8.

CZUCHRA 2010

Czuchra, W.: UML in logistischen Prozessen: graphische Sprache zur Modellierung der Systeme. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg +Teubner 2010. ISBN: 978-3-8348-0796-0.

DANGELMEIER 2009

Dangelmeier, W.: Theorie der Produktionsplanung und -steuerung. 1. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-642-00632-6.

DENA 2010

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hrsg.): dena-Netzstudie II: Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015-2020 mit Ausblick auf 2025. Berlin: dena 2010.

DENA 2012

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hrsg.): Handbuch Lastmanagement. 1. Aufl. Berlin: dena 2012.

DEPARTMENT OF ENERGY 2006

U. S. Department of Energy (DoE) (Hrsg.): Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them. Washington D.C.: DoE 2006.

DESTATIS 2016

Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Produzierendes Gewerbe: Stromerzeugungsanlagen der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe sowie Bergbau und in der Gewinnung von Steinen und Erden (2015). Wiesbaden: destatis 2016.

DESTATIS 2017

Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Daten zur Energiepreisentwicklung: Lange Reihe von Januar 2000 bis Dezember 2016. Wiesbaden: destatis 2017.

DIAZ et al. 2011

Diaz, N.; Redelsheimer, E.; Dornfeld, D.: Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, S. 263-267. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-64219-692-8.

DIAZ et al. 2012

Diaz, N.; Ninomiya, K.; Noble, J.; Dornfeld, D.: Environmental Impact Characterization of Milling and Implications for Potential Energy Savings in Industry. *Procedia CIRP* 1 (2012), S. 518-523.

DIEBLER 2016

Diebler, H.: Energiemanagement in der Industrie: Heute und morgen. *ZWF Zeitschrift wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111 (2016) 10, S.633-634.

DIETMAIR et al. 2008

Dietmair, A.; Verl, A.; Wosnik, M.: Zustandsbasierte Energieverbrauchsprofile. *wt Werkstattstechnik online* 98 (2008) 7/8, S. 640-645.

DIETMAIR & VERL 2008

Dietmair, A.; Verl, A.: Energy Consumption Modeling and Optimization for Production Machines. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET 2008)*. Singapur, Singapur, 24.-27.11.2008.

DIETMAIR & VERL 2009

ietmair, A.; Verl, A.: Energy Consumption Forecasting and Optimisation for Tool Machines. *Modern Machinery Science Journal* 3 (2009), S. 62-67.

DIETRICH et al. 2013

Dietrich, K.; Latorre, J.M.; Olmos, L.; Ramos, A.: The Role of Flexible Demands in Smart Energy Systems. In: Pappu, V. (Hrsg.); Carvalho, M. (Hrsg.); Pardalos, P.M. (Hrsg.): Optimization and Security Challenges in Smart Power Grids. 1. Aufl. Berlin: Springer 2013. ISBN: 978-3-642-38134-8.

DIHK 2014

DIHK Deutscher Industrie- und Handelskammertag Berlin und VEA - Bundesverband der Energie-Abnehmer e. V. (Hrsg.): Faktenpapier Eigenerzeugung von Strom: Rahmenbedingungen, Trends, Beispiele. Berlin: DIHK 2014.

DIN 44300

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN 44300: Informationsverarbeitung - Begriffe. Berlin: Beuth 1972.

DIN 8580

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einleitung. Berlin: Beuth 2003.

DIN 16001

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN EN 16001: Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitungen zur Anwendung. Berlin: Beuth 2009.

DIN 62264

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN EN 62264-1: Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen – Teil 1: Modelle und Terminologie (Entwurf). Berlin: DIN 2012.

DITTMER 1989

Dittmer, M.: Lastmanagement bei zeitvariabler Elektrizitätspreisbildung in Industriebetrieben. Dissertation Technische Universität Berlin. Berlin: Springer 1989.

DORNINGER 1991

Dorninger, C.: Kundenindividuelle Fertigung: Moderne Techniken und Organisationsformen zur Produktionsplanung und -steuerung. Dissertation Wirtschaftsuniversität Wien. Wien: Linde 1991.

EBERSPÄRCHER 2014

Eberspärcher, P.; Schraml, P.; Schlechtendahl, J.; Verl, A.; Abele, E.: A Model- and Signal-based Power Consumption Monitoring Concept for Energetic Optimization in Machine Tools. Procedia CIRP 15 (2014), S. 44-49.

EBERSPÄRCHER 2015

Eberspärcher, P.; Schlechtendahl, J.; Colangelo, E.; Weskamp, M.; Wahren, S.; Bauernhansl, T.; Siegert, J.; Verl, A.; Lechler, A.: Modellbasierte, energieoptimale Produktionssteuerung. wt Werkstattstechnik Online 105 (2015) 5, S. 324-328.

EISELE et al. 2011

Eisele, C.; Schrems, S.; Abele, E.: Energy-Efficient Machine Tools through Simulation in the Design Process. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, S. 258-262. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-64219-692-8.

EMEC et al. 2016

Emec, S.; Krüger, J.; Seliger, G.: Online Fault-monitoring in Machine Tools Based on Energy Consumption Analysis and Non-invasive Data Acquisition for Improved Resource-efficiency. *Procedia CIRP* 40 (2016), S. 236-243.

EMEC et al. 2013

Emec, S.; Kuschke, M.; Huber, F.W.; Stephan, R.; Strunz, K.; Seliger, G.: Stochastic Optimization Method to Schedule Production Steps According to Volatile Energy Price. In: Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing (GCSM 2013). Berlin, Deutschland, 23-25.09.2013.

ENGELHARDT 2015

Engelhardt, P.R.: System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Dissertation Technische Universität München. München: Utz 2015 (Forschungsberichte *iwb* 299).

ENGELMANN 2009

Engelmann, J.: Methoden und Werkzeuge zur Gestaltung energieeffizienter Fabriken. Dissertation Technische Universität Chemnitz. Chemnitz: IBF 2009.

EPEX 2016

European Power Exchange: Produkte. <http://www.epexspot.com/de/produkte>. Zuletzt abgerufen am: 09.01.2016.

EUROPÄISCHE KOMMISSION 2016

Europäische Kommission (Hrsg.): Key European Action Supporting the 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals. Straßburg: EU-Kommission 2016.

FANDEL 2005

Fandel, G.: Produktion I: Produktions- und Kostentheorie. 6. Aufl. Berlin: Springer 2005. ISBN: 978-3-540-25023-4.

FANG et al. 2011

Fang, K.; Uhan, N.; Zhao, F.; Sutherland, J.W.: A New Approach to Scheduling in Manufacturing for Power Consumption and Carbon Footprint Reduction. *Journal of Manufacturing Systems* 30 (2011), S. 234-240.

FEDER et al. 2015

Feder, F.; Erlach, K.; Hoask, F.; Lepple, H.: Der energieflexible und effiziente Energiewertstrom – Direkte, indirekte und periphere Energieverbräuche reduzieren sowie flexible an das Angebot anpassen. *wt Werkstattstechnik online* 105 (2015) 5, S. 313-318.

FERNANDEZ et al. 2013

Fernandez, M.; Li, L.; Sun, Z.: „Just-for-Peak“ Buffer Inventory for Peak Electricity Demand Reduction of Manufacturing Systems. *International Journal of Production Economics* 146 (2013), S.178-184.

FISCHER 2009

Fischer, S.: Entwicklung eines Referenzmodells zur Entscheidungsunterstützung im reaktiven Störungsmanagement in KMU. Dissertation Technische Universität Dortmund. Dortmund: Verlag Praxiswissen 2009.

FISCHÄDER 2009

Fischäder, H.: Störungsmanagement in netzwerkförmigen Produktionssystemen. Dissertation Technische Universität Illmenau. 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2007. ISBN: 978-3-83500-539-6..

FLEITER et al. 2013

Fleiter, T.; Schlomann, B.; Eichmann, W.: Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologie: Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2013

FLOREA et al. 2013

Florea, A.; Luttamus, J.; Postelnicu, C.; Martinez Lastra, J.L.: Agent-Based Control of Operational Conditions for Smart Factories: The Peak Load Management Scenario. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS 2013)*, Prag, Tschechische Republik, 26-28.08.2013, S.83-94.

FRIGERIO & MATTA 2015

Frigerio, N.; Matta, A.: Analysis of an Energy Oriented Switching Control of Production Lines. *Procedia CIRP* 29 (2015), S.34-39.

GASS & FU 2001

Gass, S.I.; Fu, M.C. (Hrsg.): *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*. 3. Aufl. New York: Springer 2001.
ISBN: 978-1-4419-1137-7.

GEIGER 2015

Geiger, F.: System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten. Dissertation Technische Universität München. München: Utz 2015 (Forschungsberichte *iwb* 311).

GENC 2015

Genc, E.: Frühwarnsystem für ein adaptives Störungsmanagement. Dissertation Technische Universität München. München: Utz 2015 (Forschungsberichte *iwb* 308).

GOLDHAHN et al. 2012

Goldhahn, L.; Bock, D.; Eckardt, R.; Weber, H.: Energetische Planungsalgorithmen für ERP-Systeme (EnPlan): Entwicklung energetischer Planungsalgorithmen und deren Nutzbarmachung für den Einsatz in ERP-Systemen metallverarbeitender KMU. ZWF Zeitschrift wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 107 (2012) 9, S.603-607.

GONG et al. 2015

Gong, X.; De Pessemer, T.; Joseph, W.; Martens, L.: An Energy-cost-aware Scheduling Methodology for Sustainable Manufacturing. Procedia CIRP 29 (2015), S. 185-190.

GONTARZ et al. 2015

Gontarz, A.M.; Hampl, D.; Weiss, L.; Wegener, K.: Resource Consumption Monitoring in Manufacturing Environments. Procedia CIRP 26 (2015), S. 264-269.

GOTTSCHALK 2005

Gottschalk, L.L.: Flexibilitätsprofile: Analyse und Konfiguration von Strategien zur Kapazitätsanpassung in der industriellen Produktion. Dissertation ETH Zürich. Zürich: Eigenverlag 2005.

GÖTZ et al. 2014

Götz, P.; Henkel, J.; Lenck, T.; Lenz, K.: Negative Strompreise: Ursachen und Auswirkungen. Berlin: Agora Energiewende 2014.

GÖTZE & ROTHER 2013

Götze, U.; Rother, S.: Beschaffung. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Handbuch Ressourceneffiziente Produktion. 1. Aufl. München: Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-43008-2.

GRABL 2015

Graßl, M.: Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion. Dissertation Technische Universität München. München: Utz 2015 (Forschungsberichte *iwb* 300).

GREVE 1970

Greve, J.: Störungen im Industriebetrieb: Eine klassifizierende Untersuchung der Störungen und Analyse des Störverhaltens betrieblicher Systeme unter Anwendung kybernetischer Betrachtungsweise. Dissertation Technische Hochschule Darmstadt. Darmstadt: Eigenverlag 1970.

GROBE BÖCKMANN 2014

Große Böckmann, M.: Senkung der Produktionskosten durch Gestaltung eines Energiereglerkreis-Konzeptes. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. 1. Aufl. Aachen: Apprimus 2014. ISBN: 978-3-86359-240-0.

GRISMAJER & SELIGER 2012

Grismajer, M.; Seliger, G.: Information Requirement for Motivated Alignment of Manufacturing Operations to Energy Availability. *Procedia CIRP* 3 (2012), S. 418-423.

GÜNTHER & TEMPELMEIER 2005

Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: *Produktion und Logistik*. 9. Aufl. Berlin: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-25164-1.

GÜNTHER 2015

Günther, M.: *Energieeffizienz durch Erneuerbare Energie: Möglichkeiten, Potenziale, Systeme*. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015. ISBN: 978-3-658-06752-6.

GUTENBERG 1983

Gutenberg, E.: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre - Band 1: Die Produktion*. 24. Aufl. Berlin: Springer 1983. ISBN: 978-3-540-05694-2.

HAAG 2013

Haag, H.: *Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion*. Dissertation Universität Stuttgart. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN: 978-3-8396-0547-9.

HAASIS 2008

Haasis, H.-D.: *Produktions- und Logistikmanagement: Planung und Gestaltung von Wertschöpfungsprozessen*. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2008. ISBN: 978-3-8349-0361-7.

HACKSTEIN 1989

Hackstein, R.: *Produktionsplanung und -steuerung (PPS): Ein Handbuch für die Betriebspraxis*. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989. ISBN: 3-18-400924-6.

HARJUNKOSKI et al. 2014

Harjunkoski, I.; Maravelias, C.T.; Bongers, P.; Castro, P.M.; Engell, S.; Grossmann, I.E.; Hooker, J.; Méndez, C.; Sand, G.; Wassick, J.: Scope for Industrial Applications of Production Scheduling Models and Solution Methods. *Computers and Chemical Engineering* 62 (2014), S.161-193.

HERING et al. 2013

Hering, N.; Brandenburg, U.; Kropp, S.: *Energieeffiziente Produktionsplanung und -regelung*. *ZWF Zeitschrift wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 108 (2013) 10, S.783-787.

HE et al. 2012

He, Y.; Liu, F.; Wu, T.; Zhong, F.P.; Peng, B.: Analysis and Estimation of Energy Consumption for Numerical Control Machining. *Journal of Engineering Manufacture* 266 (2012) 2, S. 255-266.

HEIL 1995

Heil, M.: *Entstörung betrieblicher Abläufe*. Dissertation TU München. Wiesbaden: Gabler 1995. ISBN: 3-82446-100-5.

HERMANN et al. 2013

Hermann, C.; Posselt, G.; Thiede, S.(Hrsg.): Energie- und Hilfsstoffoptimierte Produktion. 1. Aufl. Berlin: Springer Vieweg 2013.
ISBN: 978-3-642-38691-3.

HESSEL 2008

Hessel, V.: Energiemanagement – Maßnahmen zur Verbrauchs- und Kostenreduzierung, Förderprogramme, Vorschriften. 1. Aufl. Erlangen: Publics Publishing 2008. ISBN: 978-3-89578-327-2.

HESSELBACH 2012

Hesselbach, J.: Energie- und klimaeffiziente Produktion: Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele. 1. Aufl. Berlin: Springer Vieweg 2012. ISBN: 978-3-8348-0448-8.

HILDEBRAND et al. 2011

Hilderbrand, K.; Gebauer M.; Hinrichs, H.; Mielke, M.: Daten und Informationsqualität: Auf dem Weg zur Information Excellence. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2011. ISBN: 978-3-8348-1453-1.

HINRICHS 2009

Hinrichs, J.A.: Unterstützung des dispositiven Störungsmanagements. Dissertation TU Dortmund. Dortmund: Verlag Praxiswissen 2009.
ISBN: 978-3-89957-076-2.

HOPP & SPEARMAN 2008

Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: Factory Physics (International Edition). 3. Aufl. New York: McGraw-Hill 2008. ISBN: 978-007-123246-3.

IEA 2016

International Energy Agency (Hrsg.): World Energy Outlook 2016.
Paris: IAE 2012.

IPH 2012

IPH Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH (Hrsg.): Nach Belegungsplan Kosten sparen: Energiekostenorientierte Belegungsplanung. Perspektiven für die Produktionstechnik: Jahresbericht 2012. Hannover: IPH 2012.

IPH 2014

IPH Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH (Hrsg.): Die Energiewende nutzen: Stromkosten senken durch angepasst Fertigungsverfahren. Perspektiven für die Produktionstechnik: Jahresbericht 2014. Hannover: IPH 2014.

JÜNEMANN & BEYER 1998

Jünemann, R.; Beyer, A.: Steuerung von Materialfluss- und Logistiksystemen. Informations- und Steuerungssysteme, Automatisierungstechnik. 2. Aufl. Berlin: Springer 1998. ISBN: 978-3-540-64514-6.

JUNGE 2007

Junge, M.: Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Dissertation Universität Kassel. Kassel: kassel university press 2007. ISBN: 978-3-89958-301-9.

KAMPER 2009

Kamper, A.: Dezentrales Lastmanagement zum Ausgleich kurzfristiger Abweichung im Stromnetz. Dissertation Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2009. ISBN: 978-3-86644-546-8.

KARA & LI 2011

Kara, S.; Li, W.: Unit Process Energy Consumption Models for Material Removal Processes. *CIRP Annals Manufacturing Technology* 60 (2011), S. 37-40.

KARA et al. 2011

Kara, S.; Bogdanski, G.; Li, W.: Electricity Metering and Monitoring in Manufacturing Systems. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, S. 1-10. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-19691-1.

KELLER ET AL. 2015

Keller, F.; Schönborn, C.; Reinhart, G.: Energy-orientated Machine Scheduling for Hybrid Flow Shops. *Procedia CIRP* 29 (2015) S. 156-161.

KELLER ET AL. 2016a

Keller, F.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Integration of On-site Energy Generation into Production Planning Systems. *Procedia CIRP* 48 (2016), S. 254-258.

KELLER ET AL. 2016b

Keller, F.; Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Enabling Energy-Flexibility of Manufacturing Systems through New Approaches within Production Planning and Control. *Procedia CIRP* 57 (2016), S. 752-757.

KELLER & REINHART 2016

Keller, F.; Reinhart, G.: Energy Supply Orientation in Production Planning systems. *Procedia CIRP* 40 (2016), S. 244-249.

KIBIRA et al. 2015

Kibira, D.; Choi, S.S.; Jung, K.; Bardhan, T.: Analysis of Standards Towards Simulation-Based Integrated Production Planning. In: Umeda, S. (Hrsg.); Nakano, M. (Hrsg.); Mizuyama, H. (Hrsg.); Hibino, H. (Hrsg.); Kiritsis, D. (Hrsg.); von Cieminski, G. (Hrsg.): *Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth APMS 2015*. Cham: Springer 2015.

KINTNER-MEYER et al. 2003

Kintner-Meyer, M.; Goldman, C.; Sezgen, O.; Pratt, D.: Dividends with Demand Response. *ASHRAE Journal* 8 (2003), S. 37-43.

KLETTI 2006

Kletti, J. (Hrsg.): MES: Manufacturing Execution System. 1. Aufl. Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-3-540-28010-1.

KLOBASA 2009

Klobasa, M.: Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz. Dissertation ETH Zürich. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag 2009. ISBN: 978-3-8167-7991-9.

KLOBASA et al. 2013

Klobasa, M., Angerer, G.; Lüllmann, A.; Schleich, J.; Buber, T.; Gruber, A.; Hünecke, M.; von Roon, S.: Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland. Berlin: Agora Energiewende 2013.

KOHL et al. 2014

Kohl, J.; Spreng, S.; Franke, J.: Discrete Event Simulation of Individual Energy Consumption for Product-varieties. *Procedia CIRP* 17 (2014), S. 517-522.

KÖHRMANN 2000

Köhrmann, C.: Modellbasierte Verfügbarkeitsanalyse automatischer Montagelinien. Dissertation Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-Verlag 2000. ISBN: 978-3-183-53802-7.

KONSTANTIN 2013

Konstantin, P.: Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport, und -beschaffung im liberalisierten Markt. 3. Aufl. Berlin: Springer 2013. ISBN: 978-3-642-37264-3.

KÖPP et al. 2013

Köpp, C.; von Mettenheim, H.-J.; Breitner, M.H.: Lastmanagement in Stromnetzen – Beiträge für ein Entscheidungsunterstützungssystem für Portfoliobetreiber. *Wirtschaftsinformatik* 1 (2013), S. 39-49.

KOSTKOVÁ et al. 2013

Kostková, K.; Omelina, L.; Kycina, P.; Jamrich, P.: An Introduction to Load Management. *Electric Power Systems Research* 95 (2013), S. 184-191.

KRAUTER 2014

Krauter, S.: Integration Erneuerbarer Energien: Herausforderungen und Maßnahmen im Erzeugungssektor und Lastmanagement. *uwf UmweltWirtschaftsForum* 22 (2014) 1, S. 37-44.

KRCMAR 2011

Krcmar, H.: Einführung in das Informationsmanagement. 1. Aufl. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-15831-5.

KREITLEIN et al. 2015a

Kreitlein, S.; Schwender, S.; Rackow, T.; Franke, J.: E|Benchmark: A Pioneering Method for Energy Efficient Process Planning and Assessment along the Life Cycle Process. *Procedia CIRP* 29 (2015), S. 56-61.

KREITLEIN et al. 2015b

Kreitlein, S.; Spreng, S.; Franke, J.: E|Benchmark: A Pioneering Method for Process Planning and Sustainable Manufacturing Strategies. *Procedia CIRP* 26 (2015), S. 150-155.

KUHRKE 2011

Kuhrke, B.: Methode zur Energie- und Medienbedarfsbewertung spanender Werkzeugmaschinen. Dissertation TU Darmstadt. Berlin: epubli GmbH 2011. ISBN: 978-3-84421-461-1.

KURBEL 2005

Kurbel, K.: Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management. 1. Aufl. München: Oldenbourg 2011. ISBN: 3-486-57578-3.

KÜSTER et al. 2013

Küster, T.; Lützenberger, M.; Freund, D.; Albayrak, S.: Distributed Evolutionary Optimisation for Electricity Price Responsive Manufacturing using Multi-Agent System Technology. *International Journal on Advances in Intelligent Systems* 6 (2013) 6, S. 27-40.

LANGER et al. 2014

Langer, T.; Schlegel, A.; Stoldt, J.; Putz, M.: A Model-based Approach to Energy-saving Manufacturing Control Strategies. *Procedia CIRP* 15 (2014), S. 123-128.

LANGROCK 2015

Langrock, T.: Lastmanagement in Industrie und Gewerbe. München: VDI Wissensforum 2015.

LE & PANG 2013

Le, C.V.; Pang, C.K.: Fast Reactive Scheduling to Minimize Tardiness Penalty and Energy Cost under Power Consumption Uncertainties. *Computers & Industrial Engineering* 66 (2013), S. 406-417.

LEHNER et al. 2008

Lehner, F.; Wildner S.; Scholz, M.: *Wirtschaftsinformatik: Eine Einführung*. 2. Aufl. München: Hanser 2008.

LI et al. 2013a

Li, L.; Yan, J.; Xing, Z.: Energy Requirements Evaluation of Milling Machines based on Thermal Equilibrium and Empirical Modelling. *Journal of Cleaner Production* 52 (2013), S. 113-121.

LI et al. 2013b

Li, W.; Kara, S.; Kornfeld, B.: Developing Unit Process Models for Predicting Energy Consumption in Industry: A Case of Extrusion Line. In: Nee, A. (Hrsg.): *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*, S. 147-152. New York: Springer 2013. ISBN: 978-9-81445-147-5.

LI & KARA. 2011

Li, W.; Kara, S.: An Empirical Model for Predicting Energy Consumption of Manufacturing Processes: A Case of Turning Process. *Journal of Engineering Manufacture* 225 (2011) 9, S. 1636-1646.

LI et al. 2014

Li, Y.; He, Y.; Wang, Y.; Yan, P.; Liu, X.: A Framework for Characterising Energy Consumption of Machining Manufacturing Systems. *International Journal of Production Research* 52 (2014) 2, S. 314-325.

LI et al. 2016

Li, W.; Alvandi, S.; Kara, S.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Sustainability Cockpit: An Integrated Tool for Continuous Assessment and Improvement of Sustainability in Manufacturing. *CIRP Annals Manufacturing Technology* (2016), S. 5-8.

LIEBL et al. 2016

Liebl, C.; Popp, R.S.-H.; Zäh, M.F.: Systematic Generation and Evaluation of Energy Data in Manufacturing. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Competitive Manufacturing (COMA '16)*, Stellenbosch, Südafrika, S. 517-521.

LIU et al. 2014

Liu, Y.; Dong, H.; Lohse, N.; Petrovic, S.; Gindy, N.: An Investigation into Minimizing Total Energy Consumption and Total Weighted Tardiness in Job Shops. *Journal of Cleaner Production* 65 (2014), S. 87-96.

LIU et al. 2015a

Liu, F.; Xie, J.; Liu, S.: A Method for Predicting the Energy Consumption of the Main Driving System of a Machine Tool in a Machining Process. *Journal of Cleaner Production* 105 (2015), S. 171-177.

LIU et al. 2015b

Liu, N.; Zhang, Y.F.; Lu, W.F.: A Hybrid Approach to Energy Consumption Modelling based on Cutting Power: A Milling Case. *Journal of Cleaner Production* 104 (2015), S. 264-272.

LÖDDING 2008

Lödding, H.-P.: *Verfahren der Fertigungssteuerung*. 2. Aufl. Berlin: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-76859-3.

LOMBARDI & SCHWALBE 2017

Lombardi, P.; Schwalbe, F.: Sharing Economy as a New Business Model for Energy Storage Systems. *Applied Energy* 188 (2017), S. 485-496.

LOUIS 2009

Louis, J.P.: *Manufacturing Execution Systems: Grundlagen und Auswahl*. Dissertation Universität Marburg. Wiesbaden: Gabler 2009. ISBN: 978-3-8349-1018-9.

LUO et al. 2013

Luo, H.; Du, B.; Huang, G.Q.; Chen, H.; Li, X.: Hybrid Flow Shop Modeling considering Machine Electricity Consumption. *International Journal of Production Economics* 146 (2013), S. 423-439.

MARCZINSKI 2008

Marczinski, G.: Einsatzgebiete von ERP-, APS und MES-Lösungen. *ERP Management* 4 (2008), S. 62-64.

MAYER et al. 2016

Mayer, J.; Pielmeier, J.; Berger, C.; Engehausen, F.; Hempel, T.; Hünnekes, P.; Nyhuis, P. (Hrsg.): Aktuelle Herausforderungen der Produktionsplanung und -steuerung mittels Industrie 4.0 begegnen. Garbsen: PZH Verlag 2016. ISBN: 978-3-95900-104-3.

MEMMLER et al. 2014

Memmler, M.; Schrempf, L.; Hermann, S.; Schneider, S.; Pabst, J.; Dreher, M.: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger: Bestimmung der verschiedenen Emissionen im Jahr 2013. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt 2014.

MENGMENG et al. 2016

Mengmeng, Y.; Renzhi, L.; Hong, S.H.: A Real-time Decision Model for Industrial Load Management in a Smart Grid. *Applied Energy* 183 (2016), S. 1488-1497.

MERTENS 2013

Mertens P.: Integrierte Informationsverarbeitung 1: Operative Systeme in der Industrie. 18. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler 2013. ISBN: 978-3-8349-4394-1.

MOGNOL et al. 2006

Mognol, P.; Lepicart, D.; Perry, N.: Rapid Prototyping: Energy and Environment in the Espotlight. *Rapid Prototyping Journal* 12 (2006) 1, S. 26-34.

MÜLLER et al. 2013

Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T.; Strauch, J.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. 1. Aufl. Berlin: Springer 2013. ISBN: 978-3-642-31945-7.

MÜLLER et al. 2014

Müller, E.; Stock, T.; Schillig, R.: A Method to Generate Energy Value-streams in Production and Logistics in Respect of Time- and Energy-consumption. *Production Engineering – Research and Development* 8 (2014) S. 243-251.

NABE 2006

Nabe, C.: Effiziente Integration erneuerbarer Energien in den deutschen Elektrizitätsmarkt. Dissertation Technische Universität Berlin. Berlin: DepositOnce 2006.

NEUGEBAUER et al. 2012

Neugebauer, R.; Putz, M.; Schlegel, A.; Langer, T.; Franz, E.; Lorenz, S.: Energy-Sensitive Production Control in Mixed Module Manufacturing. In: Dornfeld, D. A. (Hrsg.); Linke, B. S. (Hrsg.): Leveraging Technology for a Sustainable World, S. 399-404. Berlin: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-43813-4.

NEUGEBAUER 2014

Neugebauer, R.: Handbuch Ressourcenorientierte Produktion. 1. Aufl. München: Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-43008-2

NIEHUES 2017

Niehues, M.R.: Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme durch fertigungsbegleitende Reihenfolgebildung. Dissertation Technische Universität München. München: Utz 2017.

NYHUIS et al. 2010

Nyhuis, P.; Münzberg, B.: Konfiguration der Fertigungssteuerung: Berücksichtigung unternehmensspezifischer Anforderungen. wt Werkstattstechnik online 100 (2010) 4, S. 285-290.

NYHUIS & WIENDAHL 2012

Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. 3. Aufl. Berlin: Springer 2012. ISBN: 978-3-540-92839-3.

OSTERFELD et al. 2015

Osterfeld, H.; Klimm, B.; Langer, S.; Schultz, C.; Reinhart, G.: Mit OPC UA zur energieorientierten Produktionssteuerung. productivity 4 (2015) S. 49-52.

OSTGATHE 2012

Ostgathe, M.: System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Dissertation Technische Universität München. München: Utz 2012 (Forschungsberichte iw 265).

PAULUS & BORGGREFE 2011

Paulus, M.; Borggreffe, F.: The potential of Demand-side Management in Energy-intensive Industries for Electricity Markets in Germany. Applied Energy 88 (2011), S. 432-441.

PECHMANN & SCHÖLER 2011

Pechmann, A.; Schöler, I.: Optimizing Energy Costs by Intelligent Production Scheduling. In: Hesselbach J., Herrmann C. (Hrsg.): Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, S. 293-298. Berlin: Springer 2011.

PECHMANN et al. 2012

Pechmann, A.; Schöler, I.; Hackmann R.: Energy Efficient and Intelligent Production Scheduling – Evaluation of a New Production Planning and Scheduling Software. In: Dornfeld, D. A. (Hrsg.); Linke, B. S. (Hrsg.): Leveraging Technology for a Sustainable World, S. 491-496. Berlin: Springer. 2012 ISBN: 978-3-642-43813-4.

PILLER 2006

Piller, F.T.: Mass Customization: Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2006.
ISBN: 978-3-8350-0355-2.

POGGENSEE 2015

Poggensee, K.: Investitionsrechnung: Grundlagen, Aufgaben, Lösungen. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2015. ISBN: 978-3-658-03090-2.

POPP & ZÄH 2014a

Popp, R.; Zäh; M.F.: Steuerung des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen: Beeinflussung der Leistungsaufnahme spanender Werkzeugmaschinen ohne Prozessauswirkung. wt Werkstattstechnik Online 104 (2014) 6, S. 413-417.

POPP & ZÄH 2014b

Popp, R.; Zäh; M.F.: Determination of the Technical Energy Flexibility of Production Systems. Advanced Materials Research 1018 (2014), S. 365-372.

POPP et al. 2016

Popp, R.S.-H.; Liebl, C.; Zäh; M.F.: Energy Flexible Machine Tool Components – An Investigation of Capabilities. Procedia CIRP 57 (2016), S. 629-697.

PÜSCHEL et al. 2011

Püschel, F.: Energieeffizienz-Steigerungspotentiale in großen Anlagebeständen. Dissertation Universität Flensburg. Lohmar: Josef Eul Verlag 2011.
ISBN: 978-3-8441-0107-2.

PUTZ et al. 2012

Putz, M.; Schlegel, A.; Franz, E.; Langer, T.; Stoldt, J.: Energy-Sensitive control strategies for discrete part manufacturing. In: Proceedings of the 10th Global Conference on Sustainable Manufacturing (GCSM 2012). Istanbul, Türkei, 31.10.-02.11.2012.

PUTZ et al. 2015

Putz, M.; Stoldt, J.; Fanghänel, C.; Bierer, A.; Schlegel, A.: Making sustainability paradigms a part of PPC. Procedia CIRP 29 (2015), S. 209-214.

QURESHI et al. 2012

Qureshi, F.; Li, W.; Kara, S.; Herrmann, C.: Unit Process Energy Consumption Models for Material Addition processes: A Case of the Injection Molding Process. In: Dornfeld, D. A. (Hrsg.); Linke, B. S. (Hrsg.): Leveraging Technology for a Sustainable World, S. 269-274. Berlin: Springer. 2012
ISBN: 978-3-642-43813-4.

RACKOW et al. 2015

Rackow, T.; Donhauser, T.; Schuderer, J.; Franke, J.: Planung von Energieverbräuchen in der Produktion. wt Werkstattstechnik online 105 (2015) 5, S. 329-333.

RAGER 2008

Rager, M.: Energieorientierte Produktionsplanung: Analyse, Konzeption und Umsetzung. Dissertation Universität Augsburg 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2008. ISBN: 978-3-8350-0987-5.

RAHIMIFARD et al. 2010

Rahimifard, S.; Seow, Y.; Childs, T.: Minimising Embodied Product Energy to support energy efficient manufacturing. CIRP Annals Manufacturing Technology 59 (2010), S. 25-28.

REINHARDT 2013

Reinhardt, S.: Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung. Dissertation Technische Universität München. München: Utz 2013 (Forschungsberichte *iwb* 278).

REINHART et al. 2011

Reinhart, G.; Geiger, F.; Karl, F.; Wiedemann, M.: Handlungsfelder zur Realisierung energieeffizienter Produktionsplanung und -steuerung. ZWF Zeitschrift wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106 (2011) 10, S.596-600.

ROHDE 2016

Rohde, C.: Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2015 mit Aktualisierungen der Anwendungsbilanzen der Jahre 2009 bis 2012. Karlsruhe: Fraunhofer ISI 2016.

VON ROON & GOBMAIER 2010

von Roon, S.; Gobmaier, T.: Demand Response in der Industrie: Status und Potenziale in Deutschland. München: FfE 2010.

ROSCHMANN 1979

Roschmann, K.: Betriebsdatenerfassung in Industrieunternehmen. München: Verlag Moderne Industrie 1979. ISBN: 978-3-478-34760-0.

ROTHLAUF 2011

Rothlauf, F.: Design of Modern Heuristics: Principles and Applications. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-540-72961-7.

RUMPE 2011

Rumpe, B.: Modellierung mit UML: Sprache, Konzepte und Methodik. 2. Aufl. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-22412-6.

SAUER et al. 2016

Sauer, A.; Weckmann, S.; Zimmermann, F.: Softwarelösungen für das Energiemanagement von morgen: Eine vergleichende Studie. Stuttgart: Eigenverlag 2016.

SANTOS et al. 2011

Santos, J.P.; Oliveira, M.; Almeida, F. G.; Pereira, J.P.; Reis, A.: Improving the Environmental Performance of Machine-Tools: Influence of Technology and Throughput on the Electrical Energy Consumption of a Press-Brake. Journal of Cleaner Production 19 (2011), S. 356-364.

SCHENK et al. 2014

Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. Berlin: Springer 2014. ISBN: 978-3-642-05458-7.

SCHIEFERDECKER et al. 2006

Schieferdecker, B.; Fünfgeld, C.; Bonneschky, A.: Energiemanagement-Tools: Anwendungen im Industrieunternehmen. Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-3-540-25478-2.

SCHILLIG et al. 2014

Schillig, R.; Müller, E.; Stock, T.; Uhl, J.: Integration peripherer Prozesse in die Energiewertstromanalyse. In: Produktion und Arbeitswelt 4.0: Aktuelle Konzepte für die Praxis?. 15. Tage des Betriebs- und Systemingenieurs (TBI2014). Chemnitz: Eigenverlag 2014.

SCHLECHTENDAHL et al. 2016

Schlechtendahl, J.; Eberspächer, P.; Schraml, P.; Verl, A.; Abele, E. : Multi-level energy Demand Optimizer System for Machine Tool Controls. Procedia CIRP 41 (2016), S.783-788.

SCHMID 2008

Schmidt, C.: Energieeffizienz in Unternehmen: Eine wissensbasierte Analyse von Einflussfaktoren und Instrumenten. Dissertation ETH Zürich. Zürich: vdf Hochschulverlag 2008.

SCHMID et al. 2015

Schmidt, C.; Li, W.; Thiede, S.; Kara, S.; Hermann, C.: A Methodology for Customized Prediction of Energy Consumption in Manufacturing Industries. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 2 (2015) 2, S. 163-172.

SCHREMS 2014

Schrems, S.: Methode zur modellbasierten Integration des maschinenbezogenen Energiebedarfs in die Produktionsplanung. Dissertation Technische Universität Darmstadt. Aachen: Shaker 2014. ISBN: 978-3-8440-2999-4.

SCHUH & SCHMIDT 2014

Schuh, G.; Schmidt, C. (Hrsg.): Produktionsmanagement: Handbuch Produktion und Management 5. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-642-54287-9.

SCHUH & STICH 2012

Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 1: Grundlagen der PPS. 4. Aufl. Berlin: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-25422-2.

SCHUH & STICH 2013

Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Produktion am Standort Deutschland: Ergebnisse der Untersuchung 2013. Aachen: FIR 2013. ISBN: 978-9-943024-15-9.

SCHUH et al. 2007

Schuh, G.; Gottschalk, S.; Höhne, T.: High Resolution Production Management. *Annals of the CIRP* 56 (2007) 1, S. 439-442.

SCHUH et al. 2014

Schuh, G.; Potente, T.; Thomas, C.; Hauptvogel, A.: Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber-physische Systeme. In: Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B.: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014

SCHUH et al. 2015

Schuh, G.; Brandenburg, U.; Liu, Y.: Evaluation of Demand Response Actions in Production Logistics. *Procedia CIRP* 29 (2015), S. 173-178.

SCHULTZ et al. 2014

Schultz, C.; Keller, F.; Reinhart, G.: Modellierung einer energieorientierten PPS. *wt Werkstattstechnik Online* 11/12 (2014), S. 771-775.

SCHULTZ et al. 2015a

Schultz, C.; Sellmaier, P.; Reinhart, G.: An Approach for Energy-oriented Production Control using Energy Flexibility. *Procedia CIRP* 29 (2015), S. 197-202.

SCHULTZ et al. 2015b

Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Integration von Lastmanagementstrategien in die Produktionssteuerung. *ZWF Zeitschrift wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110 (2015) 11, S.675-680.

SCHULTZ et al. 2016a

Schultz, C.; Keller, F.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Die PPS für eine energieflexible Fabrik – Einbindung von Energiedaten in die Produktionsplanung und -steuerung. *wt Werkstattstechnik online* 4 (2016), S. 193-198.

SCHULTZ et al. 2016b

Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Method for an Energy-oriented Production Control. *Procedia CIRP* 48 (2016), S. 248-253.

SCHULTZ et al. 2016c

Schultz, C.; Braun, S.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Verfahren und Konfiguration einer energieorientierten Produktionssteuerung. *ZWF - Zeitschrift wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111 (2016) 12, S. 779-783.

SCHULTZ et al. 2017

Schultz, C.; Braun, S.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Integration of Load Management into an Energy-oriented Production Control. *Procedia Manufacturing* 8 (2017), S. 144-151.

SCHWAB 2012

Schwab, A.J.: *Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*. 3. Aufl. Berlin: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-21957-3.

SCHWARTZ 2004

Schwartz, F.: Störungsmanagement in Produktionssystemen. Dissertation Universität Hamburg. Aachen: Shaker 2004. ISBN: 2-83223-088-2.

SEOW & RAHIMIFARD 2011

Seow, Y.; Rahimifard, S.: A Framework for Modelling Energy Consumption within Manufacturing Systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 4 (2011), S. 258-264.

SEOW et al. 2013

Seow, Y.; Rahimifard, S.; Woolley, E.: Simulation of Energy Consumption in the Manufacture of a Product. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 26 (2013) 7, S. 663-680.

SHROUF et al. 2014

Shrouf, F.; Ordieres-Meré, J.; García-Sánchez, A.; Ortega-Mier, M.: Optimizing the Production Schedule of a Single Machine to Minimize Total Energy Consumption Costs. *Journal of Cleaner Production* 67 (2014), S.197-207.

SIMON 1994

Simon, D.: Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störgrößenmanagement. Dissertation Technische Universität München. Berlin: Springer 1994 (Forschungsberichte *iwb* 84).

SONNENSCHNEIN et al. 2012

Sonnenschein, M.; Rapp, B.; Bremer, J.: Demand Side Management und Demand Response. In: Beck, H.-P. (Hrsg.): *Handbuch Energiemanagement: Wirtschaft, Recht, Technik. Erg.-Lfg. 32.* Frankfurt, M: EW Medien und Kongresse 2012.

SPATH et al. 2013

Spath, D.; Ganschar, O.; Gerlach, S.; Hämmerle, M.; Krause, T.; Schlund, S.: *Produktionsarbeit der Zukunft: Industrie 4.0.* Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2013. ISBN: 978-3-8396-0570-7.

STATISTA 2017

Statista GmbH: Preis für Fernwärme nach Anschlusswert in Deutschland in den Jahren 1992 bis 2015. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/250114/umfrage/preis-fuer-fernwaerme-nach-anschluss-ert-in-deutschland/>. Zuletzt abgerufen am: 31.01.2017.

STERNER & STADLER 2014

Sterner, M.; Stadler, I.: *Energiespeicher: Bedarf, Technologien, Integration.* 1. Aufl. Berlin: Springer-Verlag 2014. ISBN: 978-3-642-37379-4.

STOCK & SELIGER 2015

Stock, T.; Seliger, G.: Multi-objective Shop Floor Scheduling Using Monitored Energy Data. *Procedia CIRP* 26 (2015), S. 510-515.

SUN et al. 2013

Sun, Z.; Li, L.: Opportunity Estimation for Real-Time Energy Control of Sustainable Manufacturing Systems. *IEEE Transactions on Automation science and Engineering* 10 (2013) 1, S.38-44.

SUN & LI 2014

Sun, Z.; Li, L.: Potential Capability Estimation for Real Time Electricity Demand Response of Sustainable Manufacturing Systems using Markov Decision Process. *Journal of Cleaner Production* 65 (2014), S.184-193.

SUN et al. 2014

Sun, Z.; Li, L., Fernandez, M.; Wang, J.: Inventory Control for Peak Electricity Demand Reduction of Manufacturing Systems Considering the Tradeoff between Production Loss and Energy Savings. *Journal of Cleaner Production* 82 (2014), S.84-93.

SWAT et al. 2015a

Swat, M.; Rebenschläger, A.; Trapp, K.; Stock, T.; Seliger, G.; Bähre, D.: Investigation the Energy Consumption of the PECM Process for Considering in the Selection of Manufacturing Process Chains. *Procedia CIRP* 29 (2015), S. 585-590.

SWAT et al. 2015b

Swat, M.; Stock, T.; Bähre, D.; Seliger, G.: Monitoring production systems for energy-aware planning and design of process chains. In: *Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing (GCSM 2013)*, Berlin, Deutschland, 23.-25.10.2013, S. 649-654.

THIEDE 2012

Thiede, S.: *Energy Efficiency in Manufacturing Systems*. Dissertation Technische Universität Braunschweig. Berlin: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-25913-5.

THIEDE et al. 2012

Thiede, S.; Bogdanski, G.; Herrmann, C.: A Systematic Method for Increasing the Energy and Resource Efficiency in Manufacturing Companies. *Procedia CIRP* 2 (2012), S. 28-33.

THIRIEZ & GUTOWSKI 2006

Thiriez, A.; Gutowski, T. G.: An Environmental Analysis of Injection Molding. In: *Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Electronics and Environment*, Scottsdale, USA: 08.-11.05.2006.

TRAINER 2007

Trainer, T.: *Renewable Energy cannot sustain a Consumer Society*. 1. Aufl. Dordrecht: Springer 2007. ISBN: 978-1-4020-5548-5.

UNITED NATIONS 2012

United Nations (Hrsg.): *Back to Our Common Future: Sustainable Development in the 21st Century (SD21) Project*. New York: United Nations 2012.

UNITED NATIONS 2015a

United Nations (Hrsg.): World Population Prospects: Key Findings & Advance Tables. New York: United Nations 2015.

UNITED NATIONS 2015b

United Nations (Hrsg.): Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/70/1). New York: United Nations 2015.

VAN BRACKEL 2009

van Brackel, T.: Adaptive Steuerung flexibler Werkstattfertigungssysteme - Nutzung moderner Informations- und Kommunikationstechnologie zur effizienten Produktionssteuerung unter Echtzeitbedingungen. Dissertation Universität Paderborn. Wiesbaden: Gabler 2012. ISBN: 978-3-8349-1365-4.

VDI 2815

Verein Deutsche Ingenieure e. V. (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2815 Blatt 1: Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung: Einführung, Grundlagen. Düsseldorf: Beuth 1978.

VDI 1992

Verein Deutsche Ingenieure e. V. (Hrsg.): Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung: Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992. ISBN: 3-18-401006-6.

VDI 5600

Verein Deutsche Ingenieure e. V. (Hrsg.): VDI-Richtlinie 5600 Blatt 1: Fertigungsmanagementsysteme. Berlin: Beuth 2007. ISBN: 3-18-401006-6.

VDI 3633

Verein Deutsche Ingenieure e. V. (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Begriffe (Entwurf). Berlin: Beuth 2013.

VERL et al. 2011a

Verl, A.; Westkämper, E.; Abele, E.; Dietmair, A.; Schlechtendahl, J.; Friedrich, J.; Haag, H.; Schrems, S.: Architecture for Multilevel Monitoring and Control of Energy Consumption. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, S. 347-352. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-64219-692-8.

VIJAYARAGHAVAN & DORNFELD 2010

vijayaraghavan, A; Dornfeld, D.: Automated energy monitoring of machine tools. CIRP Annals Manufacturing Technology 59 (2010) S. 21–24.

VIKHOREV ET AL. 2012

Vikhorev, K.; Greenough, R.; Brown, N: An Advanced Energy Management Framework to Promote Energy Awareness. Journal of Cleaner Production 43 (2013), S. 103-112.

VOEGELE & SOMMER 2012

Voegele, A.A.; Sommer, L.: Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure: Kostenmanagement im Engineering. 1. Aufl. München: Hanser 2012. ISBN: 978-3-446-42617-7.

WANG et al. 2013

Wang, Y.; Li, L.: Time-of-use Based Electricity Demand Response for Sustainable Manufacturing Systems. Energy 63 (2013), S.233-244.

WENZEL 2000

Wenzel, S. (Hrsg.): Referenzmodell für die Simulation in Produktion und Logistik. Gent: Society for Computer Simulation International 2000. ISBN: 1-56555-182-6.

WEINERT 2010a

Weinert, N.: Vorgehensweise für die Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme. Dissertation Technische Universität Berlin. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2010. ISBN: 978-3-83960-173-0.

WEINERT 2010b

Weinert, N.: Planung energieeffizienter Produktionssysteme. ZWF Zeitschrift wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105 (2010) 5, S. 503-507.

WEINERT et al. 2011

Weinert, N.; Chiotellis, S.; Seliger, G.: Methodology for Planning and Operating Energy-efficient Production Systems. CIRP Annals Manufacturing Technology 60 (2011), S.41-44.

WEINERT et al. 2012

Weinert, N.; Rohrmus, D.; Dudeck, S.: Energy-Aware Production Planning Based on EnergyBlocks in a Siemens AG Generator Plant. In: Seliger, G. (Hrsg.): Sustainable Manufacturing. Berlin: Springer 2012, S. 211-216. ISBN: 978-3-64227-290-5.

WEINERT & MOSE 2016

Weinert, N.; Mose, C.: Electrical Load Management for Production Equipment Applying a Decentralized Optimization Approach. Procedia CIRP 48 (2016), S. 259-264.

WEIß 2010

Weiß, M.: Datenauswertung von Energiemanagementsystemen - Datenerfassung, Messwertdarstellung und -interpretation, Kennwerte zur Energieverteilung, Praxisbeispiele. Erlangen: Publics Publishing 2010. ISBN: 978-89578-347-0.

WEIßHAAR 2014

Weißhaar, N.: Wege zur energieautarken Produktion auf Basis von erneuerbaren Energien am Beispiel der Kunststoff verarbeitenden Industrie. Dissertation Universität Kassel. Kassel: kassel university press 2014. ISBN: 978-86219-529-9.

WELLER 2003

Weller, R.: Verfahren zum kurzfristigen Störfallmanagement für die flexible Werkstattsteuerung. Dissertation Universität Stuttgart.
Heimsheim: Jost-Jetter 2003. ISBN: 3-93694-704-X.

WESSELAK et al. 2017

Wesselak, V.; Schabbach, T.; Link, T.; Fischer, J.: Handbuch Regenerative Energietechnik. 3. Aufl. Berlin: Springer Vieweg 2017.
ISBN: 978-3-662-53072-6.

WESTKÄMPER 2006

Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. 1. Aufl.
Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-3-540-26039-4.

WIENDAHL et al. 2005

Wiendahl, H.-H.; Wiendahl, H.-P.; von Cieminski, G.: Stolpersteine der PPS: Symptome - Ursachen - Lösungsansätze. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) 9, S. 717-725.

WIENDAHL 2011

Wiendahl, H.-H.: Auftragsmanagement der industriellen Produktion: Grundlagen, Konfiguration, Einführung. 1. Aufl. Berlin: Springer 2011.
ISBN: 978-3-642-19148-0.

WIENDAHL & HEGENSCHIEDT 2012

Wiendahl, H.-P.; Hegenscheidt, M.: Verfügbarkeit von Montagesystemen. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin: Springer 2012, S. 331-363. ISBN: 978-3-642-29061-9.

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. Aufl. München: Carl Hanser 2010. ISBN: 978-3-446-41878-3.

WILLEKE et al. 2014

Willeke, S.; Wesebaum, S.; Ullmann, G.; Nyhuis, P.: Energiekosteneffiziente Fertigungssteuerung. ZWF Zeitschrift wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 5, S.328-331.

WILLEKE et al. 2015a

Willeke, S.; Wesebaum, S.; Ullmann, G.: Integration zeitvariable Energiekosten in die Belastungsorientierte Auftragsfreigabe. Logistics Journal (2015).
<https://www.logistics-journal.de/not-reviewed/2015/07/4200>.
Zuletzt abgerufen am: 14.02.2016.

WILLEKE et al. 2015b

Willeke, S.; Wesebaum, S.; Ullmann, G.; Nyhuis, P.: Energiekostenorientierte Reihenfolgebildung. ZWF Zeitschrift wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 110 (2015) 9, S.495-499.

WILLEKE et al. 2015c

Willeke, S.; Wesebaum, S.; Prinzhorn, H.; Ullmann, G.; Nyhuis, P.: Energiekostenorientierte Rückstandsregelung. *IT&Production* 12 (2015).

http://www.it-production.com/index.php?seite=einzel_artikel_ansicht&id=62954. Zuletzt abgerufen am: 14.02.2016.

WILLEKE et al. 2016

Willeke, S.; Ullmann, G.; Nyhuis, P.: Method for an Energy-Cost-Oriented Manufacturing Control to Reduce Energy Costs – Energy Cost Reduction by Using a New Sequencing Method. In: *Proceeding of the International Conference on Industrial Engineering, Management Science and Applications (ICIMSA)*, Jeju Island, Korea, 23.-26.05.2016. ISBN: 978-1-5090-1671-6.

WIRTH 1990

Wirth, S. (Hrsg.): *Flexible Fertigungssysteme: Gestaltung und Anwendung in der Teilefertigung*. Heidelberg: Hüthig 1990. ISBN: 978-1-7785-1850.

WIRTH 2017

Wirth, H.: *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. Freiburg: Fraunhofer ISE 2017. <https://www.pv-fakten.de>.
Zuletzt abgerufen am: 27.01.2017.

WOHINZ & MOOR 1989

Wohinz, J.W.; Moor, M.: *Betriebliches Energiemanagement: Aktuelle Investition in die Zukunft*. Wien: Springer 1989. ISBN: 978-3-7091-9039-5.

WOLF 1987

Wolf, J.: *Industriebetriebliche Energienutzung und Produktionsplanung*. Heidelberg: Physica 1987. ISBN: 978-3-7908-0371-6.

ZAHORANSKY 2009

Zahoransky, R.A.: *Energietechnik: Systeme zur Energieumwandlung*. 4. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2009. ISBN: 978-3-8348-0488-4.

ZAPF 2017

Zapf, M.: *Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem*. 1. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2017. ISBN: 978-3-658-15073-0.

ZÄPFEL 1996

Zäpfel, G.: PPS (Produktionsplanung und -steuerung). In: Kern, W. (Hrsg.); Schröder, H.-H. (Hrsg.); Weber, J. (Hrsg.): *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*. 2. Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1996. ISBN: 3-7910-8044-X.

ZÄPFEL & BRAUNE 2005

Zäpfel, G.; Braune, R.: *Moderne Heuristiken in der Produktionsplanung*. München: Vahlen 2005. ISBN: 978-3-8006-3238-1.

ZHOU et al. 2013

Zhou, Z.; Li, L.: Real Time Electricity Demand Response for Sustainable Manufacturing Systems Considering Throughput Bottleneck Detection. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2013), Madison, USA, 17.-20.08.2013.

ZIESING 2017

Ziesing, H.-J.: Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2016. Berlin: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. 2017.

11 Anhang

11.1 Beispielhafte Anwendung der Maßnahmengenerierung

Erste periphere Ordnung - Beispiel: Werkstücktransport

Die Betriebsmittel der 1. Peripherie umfassen vielfach Hilfsaggregate einzelner Maschinen mit Zwischenspeichern, wie z. B. die Maschinenkühlung oder das Hydrauliksystem. Die Pufferkapazität der Hilfsaggregate lassen Leistungsanpassungen in der Regel nur für wenige Sekunden oder Minuten zu und werden daher für das Lastmanagement auf der Produktionsbereichsebene nicht weiter betrachtet. Stattdessen können durch diese Puffer Lastglättungen innerhalb von Maschinen vorgenommen werden (POPP & ZÄH 2014a, POPP et al. 2016).

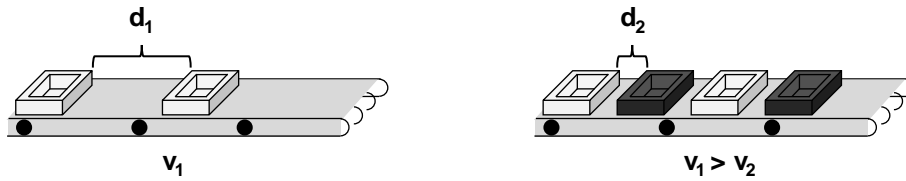
Darüber hinaus können auch Förderstrecken für den Werkstücktransport als Beispiel der 1. Peripherie aufgefasst werden. BEIER et al. (2016a) beschreiben beispielsweise eine Lastanpassung durch Variation der Fördergeschwindigkeiten. Dies setzt eine Verkettung der Produktionsanlagen beispielsweise über Förderbänder voraus. Durch die Reduktion der Fördergeschwindigkeit wird der Abstand zwischen den geförderten Werkstücken verringert und somit der Puffer zwischen den Systemen vergrößert (vgl. Abbildung 76). Es gilt dabei:

$$C_{Förder} = l_{Förder} / (w_{Gut} + d) \quad (33)$$

$$\text{mit } d = v_{Förder} \cdot ZZ_{Zugang, Förder} \quad (34)$$

$C_{Förder}$	Pufferkapazität der Förderstrecke
$l_{Förder}$	Länge der Förderstrecke
w_{Gut}	Mittlere Breite des Fördergutes
d	Mittlerer Abstand der Fördergüter
$v_{Förder}$	Geschwindigkeit der Förderstrecke

Durch die Anpassung der Fördergeschwindigkeit kann auch die Leistungsaufnahme des Förderbandes verändert werden. Bei der Übertragung auf das Modell eines Betriebsmittels stellt das Förderband somit einen Materialpuffer mit Leistungsbedarf zwischen zwei Fertigungsmitteln dar. Infolgedessen wird in diesem Kontext eine Lastmanagementmaßnahme durch die angrenzenden Fertigungsmittel, nicht jedoch durch das Förderband selbst bewirkt.




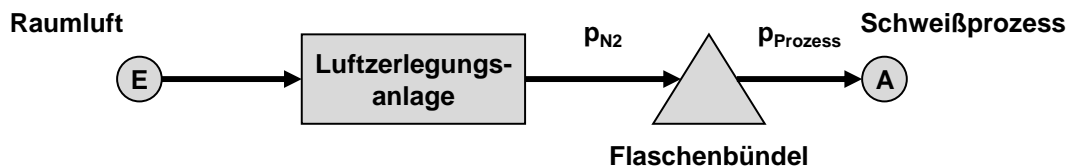
Legende: v : Fördergeschwindigkeit d : Abstand zwischen Werkstücken
 : Fördergut

Abbildung 76: Förderband bei verschiedenen Fördergeschwindigkeiten

Zweite periphere Ordnung - Beispiel: Stickstoffherzeugung

Die zweite periphere Ordnung umfasst unter anderem Betriebsmittel, die Hilfsmittel für die Durchführung der Hauptprozesse bereitstellen. Als repräsentatives Beispiel wird im Folgenden eine industrielle Luftzerlegungsanlage beschrieben, die den für Schweiß- und Schneidprozesse benötigten Stickstoff vor Ort erzeugt (vgl. Abbildung 77).



Legende: \longrightarrow : Material-, Stoff- oder Energiefluss
 (E) : Eingang von vorhergehendem System
 (A) : Ausgang zu nachgelagertem System

Abbildung 77: Beispiel der Luftzerlegungsanlage in der 2. Prozessperipherie

Die Luftzerlegungsanlage kann vereinfachend mit zwei Betriebszuständen (An/Aus) angenommen werden. Mit einer Zykluszeit von $ZZ_{\text{Erzeugung}}$ werden 1 m^3 Stickstoff mit einem Druck von p_{N_2} erzeugt. Der Schweißprozess bildet den Abgang mit einer Zykluszeit von ZZ_{Prozess} . Als Speicher dienen im Allgemeinen Druckflaschen, in denen das Gas unabhängig vom Prozess gepuffert werden kann. Das Gesamtvolumen des Puffers ergibt sich somit aus der Anzahl und dem Einzelvolumen der Flaschen. Da der Schweißprozess als nachgelagertes System den Stickstoff mit einem niedrigeren Druck von p_{Prozess} benötigt, errechnet sich die Pufferkapazität unter Verwendung der Zustandsgleichung idealer Gase näherungsweise zu:

$$C_{N_2} = n \cdot p_{N_2} / p_{\text{Prozess}} \cdot V_{N_2} \quad (35)$$

mit	C_{N_2}	Kapazität des Stickstoffspeichers
	n	Anzahl der Druckflaschen
	p_{N_2}	Gasdruck innerhalb der einzelnen Druckflaschen
	p_{Prozess}	Gasdruck im Prozess
	V_{N_2}	Volumen der einzelnen Druckflaschen

Die ermittelten Werte lassen sich wiederum in die Formeln des Modells einsetzen, um das Lastmanagementpotenzial zu ermitteln³².

Dritte periphere Ordnung - Beispiel: Gebäudelüftung

Aufgrund ihrer funktionalen Distanz zum Wertschöpfungsprozess kommt den Betriebsmitteln der dritten Prozessperipherie für das Lastmanagement eine hohe Relevanz zu. Bedeutende Vertreter dieser Kategorie sind die Gebäudelüftung und die Klimatisierung, die sich unter Nutzung der Trägheit des Raumklimas für ein Lastmanagement verwenden lassen. Die Gebäudelüftung dient sowohl der Erhaltung der Luftqualität als auch der Regulierung der Raumtemperatur. Zu diesem Zweck versorgt die Lüftung den Produktionsbereich mit einer vorgegebenen Außenluftfrate mit Frischluft.

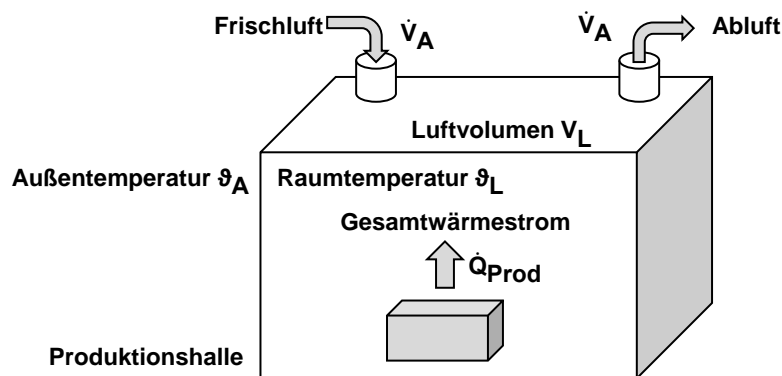


Abbildung 78: Lüftung einer Produktionshalle

Im einfachen Fall einer Mischlüftung wird das gesamte Luftvolumen der Halle mit Frischluft durchmischt, sodass sich für das gesamte Volumen dieselbe Lufttemperatur ergibt (HESSELBACH 2012). Die Bestimmung des erforderlichen Frischluftvolumenstroms erfolgt in diesem Fall aus der Energiebilanz der Halle (BUKVIC-SCHÄFER 2007). Es gilt:

³² In der Literatur finden sich darüber hinaus Beispiele zur Beschreibung der Druckluftversorgung als flexibles Betriebsmittel der 2. Prozessperipherie (BEIER et al. 2015).

$$V_L \cdot c_{P,L} \cdot \rho_L \cdot \frac{\partial \vartheta_L}{\partial t} = P_{HK} + \dot{Q}_{Prod} - \dot{Q}_U - \dot{Q}_A \quad (36)$$

mit	V_L	Luftvolumen in der Halle
	$c_{P,L}$	Isobare spezifische Wärmekapazität der Luft
	ρ_L	Dichte der Luft
	$\partial \vartheta_L / \partial t$	Gradient der Raumtemperatur
	P_{HK}	Leistung der Heizung und Klimatisierung
	\dot{Q}_{Prod}	Abwärme des Produktionsbereichs
	\dot{Q}_U	Wärmeaustausch mit der Gebäudehülle
	\dot{Q}_A	Wärmeaustausch durch Lufttransport

Die Abwärme des Produktionsbereichs setzt sich aus den Wärmeverlusten der Betriebsmittel, der Wärmeabgabe der Personen und solarem Wärmegewinn zusammen. Als Abschätzung der Abwärme kann der Mittelwert der durch alle Betriebsmittel aufgenommenen elektrischen Energie herangezogen werden (MÜLLER et al. 2013). Unter Vernachlässigung des Austausches mit der Gebäudehülle lässt sich die Gleichung umstellen zu:

$$\frac{\partial \vartheta_L}{\partial t} = (\dot{Q}_{Prod} - \dot{Q}_A + P_{HK}) \cdot (V_L \cdot c_{P,L} \cdot \rho_L)^{-1} \quad (37)$$

Der durch die Lüftung abtransportierte Wärmestrom errechnet sich zu:

$$\dot{Q}_A = \dot{V}_A \cdot c_{P,L} \cdot \rho_L \cdot (\vartheta_L - \vartheta_A) \quad (38)$$

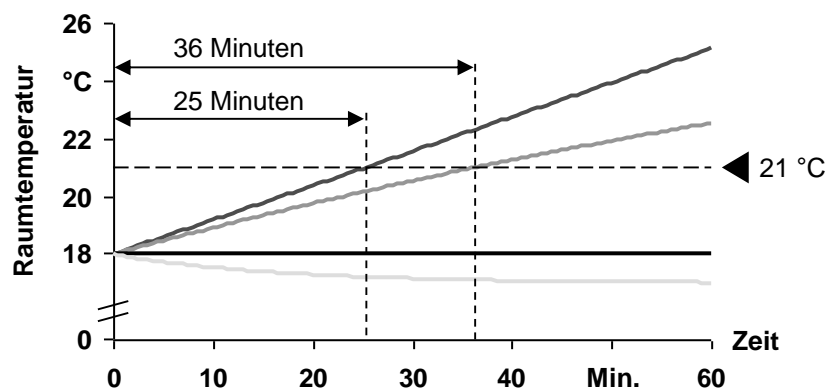
mit	ϑ_L	Temperatur der Raumluft
	ϑ_A	Temperatur der Außenluft

Gemäß dem Modell in Abbildung 61 lässt sich der Abwärmestrom als Zugang betrachten, während unter Vernachlässigung einer zusätzlichen Kühlleistung der durch die Lüftung transportierte Wärmestrom den Abgang darstellt. Die Wärmekapazität des Luftvolumens bildet in diesem Fall den Puffer, da eine Temperaturerhöhung nur träge erfolgt und Temperaturschwankungen um einen Idealwert zulässig sind (vgl. Tabelle 14).

Tabelle 14: Zulässige Raumtemperatur nach Tätigkeit (MÜLLER et al. 2013)

Art der Tätigkeit	Lufttemperatur in °C		
	Minimal	Ideal	Maximal
Leichte Arbeit	17	18	22
Schwerarbeit	15	17	21
Schwerstarbeit	14	16	20

Eine Drosselung der Leistungsaufnahme der Lüftung verringert den Durchfluss und reduziert somit den transportierten Wärmestrom. Der Zusammenhang zwischen der Leistungsaufnahme ist dabei von der Regelung der Lüftung abhängig (HESSELBACH 2012). Infolgedessen nimmt die Raumtemperatur langsam zu bis die Obergrenze erreicht, d. h. der Puffer gefüllt, ist. Für die Zeitspanne lässt sich unter der Annahme, dass die mittlere Abwärme kurzfristig konstant ist, eine Grobabschätzung in Abhängigkeit der Lüftungsleistung vornehmen. Ein Beispiel ist in Abbildung 79 dargestellt. Eine genauere Berechnung des thermischen Verhaltens unter Berücksichtigung des Wärmeaustausches mit der Gebäudehülle erfordert hingegen einen simulationstechnischen Ansatz, wie er beispielsweise von BUKVIC-SCHÄFER (2007) vorgestellt wird.



Legende: — : 0 % Lüftungsleistung — : 100 % Lüftungsleistung
 — : 50 % Lüftungsleistung — : 150 % Lüftungsleistung

Abbildung 79: Zusammenhang zwischen der Raumtemperatur und der Lüftungsleistung

11.2 Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Promotion sind die folgenden studentischen Arbeiten unter wissenschaftlicher Anleitung des Autors entstanden:

- BRAUN, S.
Entwicklung eines Verfahrens für eine energieorientierte Produktionssteuerung
- EGGER, B.
Entwicklung eines Verfahrens zum Lastmanagement mit prozessperipheren Verbrauchern in der Produktion
- GEYER, K.
Erarbeitung eines Ansatzes für ein Energie-Störungsmanagement in der Produktionssteuerung
- HECKELSMÜLLER, M.
Entwicklung eines Prognoseverfahrens für Energieverbräuche in der Produktionssteuerung
- HEIMFARTH, A.
Entwicklung eines Verfahrens zur kostenoptimalen Auswahl von Lastmanagement-Maßnahmen in einer Werkstattproduktion
- KARL, R.
Entwicklung und Integration von Lastmanagementmaßnahmen in ein Manufacturing Execution System
- KLÖBER-KOCH, J.
Entwicklung eines Vorgehens für ein Energie-Störungsmanagement in der Produktionssteuerung
- SELLMAIER, P.
Entwicklung eines Konzeptes zur energieflexiblen Produktionssteuerung anhand von Technomatix Plant Simulation

11.3 Genutzte Softwareprodukte

IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

IBM Deutschland GmbH, IBM-Allee 1, 71139 Ehningen

Microsoft Office

Microsoft Deutschland GmbH, Walter-Gropius-Straße 5, 80807 München

MATLAB

The MathWorks GmbH, Adalperostraße 45, 85737 Ismaning

Plant Simulation

Siemens Industry Software GmbH, Franz-Geuer-Straße 10, 50823 Köln

SAP Manufacturing Execution

SAP AG, Dietmar-Hopp-Allee 16, 69190 Walldorf

SAP Manufacturing Integration & Intelligence

SAP AG, Dietmar-Hopp-Allee 16, 69190 Walldorf

SAP Plant Connectivity

SAP AG, Dietmar-Hopp-Allee 16, 69190 Walldorf