

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

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

Methodik zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung

Fabian Karl Keller

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. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Matthias Putz

Die Dissertation wurde am 29.11.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 22.05.2018 angenommen.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AA	Ameisen-Algorithmus
AGEB	AG Energiebilanzen e.V.
AVO	Arbeitsvorgang
BDE	Betriebsdatenerfassung
bdew	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BNetzA	Bundesnetzagentur
CNC	Computerized Numerical Control
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
dena	Deutsche Energie-Agentur
DeStatis	Statistisches Bundesamt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DoE	Departement of Energy
EDE	Energiedatenerfassung
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
eex	European Energy Exchange
EI	Energieintensität
ERP	Enterprise-Resource-Planning
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FCFS	First-come, first-served

Abkürzungsverzeichnis

FIFO	First In, First Out
FLT	Frühester Liefertermin
GA	Genetischer Algorithmus
GTA	Giffler-Thompson-Algorithmus
IEA	International Energy Agency
IINAS	Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
K	Energiekosten
KOZ	Kürzeste Operationszeit
MAE	Mean Absolut Error
max	maximal
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing-Execution-System
MILP	Mixed Integer Linear Programming
min	minimal
MRL	Minutenreserveleistung
MRP	Material-Requirement-Planning
opt	optimal
OR	Operations Research
OTC	Over-the-Counter
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
pf	preisfixiert
pv	preisvariabel
PVA	Photovoltaikanlage

Abkürzungsverzeichnis

Q	Quartal
RMSE	Root Mean Squared Error
RLM	Registrierende Leistungsmessung
SA	Simulated Annealing
SRL	Sekundärregelleistung
UML	Unified Modeling Language
UN	Vereinte Nationen
UPN	Umwandlungsanlagen, Produktionsanlagen und Nebenanlagen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
WKA	Windkraftanlage

Verzeichnis der Formelzeichen

Große lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
B_s	min	Kapazität der Engpassressource in Periode s
B_t	min	Kapazität der Engpassressource in Periode t
D_{ps}^+	Stück	Fehlmengen aufgrund von Terminüberschreitungen
D_{ps}	Stück	Nachfrage nach Produkt p in Periode s in Stück
D_{pt}	Stück	Nachfrage nach Produkt p in Periode t
E	Ws, kWh, MWh	Elektrische Energie
E_{pt}	kWh	Energiemenge
E_p^{ah}	kWh	Auftragsspezifischer Energiebedarf zur Herstellung eines Loses des Produkts p in der Hauptzeit
E_p^{an}	kWh	Auftragsspezifischer Energiebedarf zur Herstellung eines Loses des Produkts p in der Nebenzeit
E_s^e	kWh	Vorhandene Energiemenge in Periode s
E_t^f	kWh	Zusätzliche Energiebeschaffung in Periode t
E_p^{ph}	kWh	Energiemenge zur Herstellung einer Einheit des Produkts p
E_s^v	kWh	Zusätzliche Energiebeschaffung in Periode s
G_s	gCO ₂	Grenzwert der durchschnittlichen Emissionen in Periode s

Verzeichnis der Formelzeichen

G_t	gCO ₂	Grenzwert der durchschnittlichen Emissionen in Periode t
I	A	Stromstärke
K	€	Energiekosten
K_s	€	Grenzwert der Energiekosten in Periode s
K_t	€	Grenzwert der Energiekosten in Periode t
K^{d+}	€	Kosten für Terminüberschreitungen je Einheit und Periode
K_{ps}^y	€	Lagerkosten pro Einheit in Periode s
K_s^e	€	Energiekosten der Eigenproduktion in Periode s
K_s^v	€	Energiekosten variabler Beschaffungsoptionen in Periode s
K_t^e	€	Energiekosten der Eigenproduktion in Periode t
K_t^f	€	Energiekosten fixierter Beschaffungsoptionen in Periode t
K_t^k	€	Kapitalkosten je Einheit in Periode t
K_t^y	€	Lagerkosten pro Einheit in Periode t
$K(l)$	€	Kosten der bestehenden Lösung
$K(l')$	€	Kosten der neu berechneten Lösung
M		„Big M“, große Konstante
P	W, kW, MW	Elektrische Energie
P_x	kW	Benötigte Leistung im Intervall x
P_x^{LM}	kW	Leistungsgrenze des Intervalls x
T	K	Temperatur
T_{stopp}	K	Unteren Schranke der Temperatur

Verzeichnis der Formelzeichen

U	V	Elektrische Spannung
Q_{ps}	Stück	Produktionsmenge von Produkt p in Periode s
Q_{pt}	Stück	Produktionsmenge von Produkt p in Periode t
Y_p^0	Stück	Anfangslagerbestand von Produkt p
Y_{ps}	Stück	Lagerbestand von Produkt p in Periode s
Y_{pt}	Stück	Lagerbestand von Produkt p in Periode t
V_s	min	Produktionskapazität in Periode s
V_t	min	Produktionskapazität in Periode t
Y_s	Stück	Lagerverfügbarkeit in Periode s
Y_t	Stück	Lagerverfügbarkeit in Periode t
Z	Anzahl	Freie Kapazitäten im Intervall x

Kleine lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
a_{ps}		Anzahl der Lose von Produkt p in Periode s
a_{pt}		Anzahl der Lose von Produkt p in Periode t
b_p^a	min	Auftragswechselzeit von Produkt p an der Engpassressource
b_p^p	min	Bearbeitungszeit des Produkts p an der Engpassressource
e		Eulersche Zahl
f_{ps}		Indikator, ob Produkt p in Periode s produziert wird
g_p	Stück	Durchschnittliche Losgröße je Auftrag von Produkt p
k_B		Bolzmannkonstante

Verzeichnis der Formelzeichen

k_x^E	€	Kosten je Leistungseinheit im Intervall x
k_x^{LM}	€	Strafkosten bei Übertretung der Leistungsgrenze je Leistungseinheit im Intervall x
k_x^Z	€	Strafkosten je freier Kapazität im Intervall x
l	Stück	Maximale Losgröße
p		Produkte
s	min	Mittelfristige Perioden
t	min	Kurzfristige Perioden
x	min	Intervall der Planungsperiode
z_p^{ah}	min	Hauptzeit für einen Auftrag von Produkt p
z_p^{an}	min	Nebenzeit für einen Auftrag von Produkt p
z_p^{ph}	min	Bearbeitungszeit für eine Einheit von Produkt p

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	K	Abkühlfaktor
σ		Standardabweichung
ε	kgCO ₂	Energiebezugsbedingte Emission
ε_t^f	kgCO ₂	Emission einer zusätzlich beschafften Energieeinheit in Periode t
ε_t^e	kgCO ₂	Emission einer Energieeinheit der vorhandenen Energiemenge in Periode t
ε_s^v	kgCO ₂	Emission einer zusätzlich beschafften Energieeinheit in Periode s
ε_s^e	kgCO ₂	Emission einer Energieeinheit der vorhandenen Energiemenge in Periode

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	i
Verzeichnis der Formelzeichen.....	v
Inhaltsverzeichnis.....	ix
1 Einleitung	1
1.1 Die Situation produzierender Unternehmen im Kontext der Energiewende	1
1.1.1 Globale Entwicklungen in der Energiepolitik.....	1
1.1.2 Nationale Entwicklungen im deutschen Stromsystem	3
1.2 Betrachtungsrahmen und Motivation	7
1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	10
2 Grundlagen.....	13
2.1 Übersicht.....	13
2.2 Auftragsplanung im operativen Produktionsmanagement	13
2.2.1 Allgemeines.....	13
2.2.2 Definitionen.....	13
2.2.3 Produktionsmanagement	15
2.2.4 Produktionsplanung und -steuerung.....	16
2.2.5 Auftragsplanung in Rahmen der Eigenfertigung	20
2.2.6 Elemente der Auftragsplanung.....	22
2.2.7 Lösungsverfahren für Entscheidungsmodelle im Kontext der Auftragsplanung	24
2.3 Energiebezugsoptionen produzierender Unternehmen.....	26
2.3.1 Allgemeines.....	26
2.3.2 Definitionen.....	27
2.3.3 Optionen der Stromerzeugung.....	28
2.3.4 Optionen der Strombeschaffung.....	31
2.3.5 Zusammenfassung der Energiebezugsoptionen	37

2.4	Elektrische Lastanpassung in der Produktion	37
2.4.1	Allgemeines	37
2.4.2	Definitionen	38
2.4.3	Elektrische Lastanpassung mit energieflexiblen Produktionssystemen.....	39
2.4.4	Aufgaben und Funktionen eines variablen Lastmanagements	43
3	Stand der aktuellen Erkenntnisse	45
3.1	Überblick.....	45
3.2	Gestaltung energieorientierter Produktionssysteme	45
3.2.1	Energieorientierte strukturelle Ansätze	46
3.2.2	Energieorientierte prozessuale Ansätze.....	47
3.3	Gestaltung einer energieorientierten Auftragsplanung	48
3.3.1	Energieorientierte koordinative Ansätze	48
3.3.2	Ausgewählte Ansätze der Auftragsplanung.....	49
3.3.3	Weitere Ansätze der Auftragsplanung.....	52
3.4	Bewertung der Ansätze im Kontext einer energiebezugsorientierten Auftragsplanung	53
3.5	Ableitung des Handlungsbedarfs und Formulierung der Anforderungen	56
4	Aufbau und Übersicht der Methodik	59
4.1	Allgemeines	59
4.2	Aufbau der energiebezugsorientierten Auftragsplanung	60
4.3	Ablauf der energiebezugsorientierten Auftragsplanung	61
5	Integration der Energiebezugsoptionen in die Auftragsplanung	63
5.1	Überblick.....	63
5.2	Bestimmung der relevanten Parameter zur Beschreibung der Energiebezugsoptionen.....	63
5.2.1	Allgemeines	63
5.2.2	Energiemenge und Leistungsniveau	64
5.2.3	Energiekosten und Emissionen.....	64

5.2.4	Abhängigkeiten der Parameter	64
5.3	Erfassung und Modellierung der Bezugsoptionen	65
5.3.1	Allgemeines	65
5.3.2	Kontinuierliche Stromerzeugungsoptionen	65
5.3.3	Fluktuierende Stromerzeugungsoptionen	67
5.3.4	Preisfixierte und -variable Strombeschaffungsoptionen	70
5.4	Aggregation und Modellierung des standortspezifischen Energiebezugs für die Auftragsplanung	72
5.4.1	Allgemeines	72
5.4.2	Aggregation der Stromerzeugung	72
5.4.3	Aggregation der Strombeschaffung	74
5.5	Generierung der Energiemodelle für die Auftragsplanung	76
5.5.1	Allgemeines	76
5.5.2	Erstellung des Energiemengenmodells	76
5.5.3	Erstellung des Leistungsmodells	77
5.5.4	Ableitung variabler Lastmanagementstufen für die Reihenfolgeplanung	78
5.6	Fazit	79
6	Integration energieorientierter Kennzahlen in auftragsbezogene Planungselemente	81
6.1	Übersicht	81
6.2	Stammdatengenerierung der Planungselemente	81
6.2.1	Allgemeines	81
6.2.2	Betriebsdatenerfassung	81
6.2.3	Maschinendaten	82
6.2.4	Energiedaten	84
6.2.5	Auftragsbezogene Planungselemente	87
6.3	Generierung eines leistungsbezogenen Maschinenmodells	88
6.3.1	Allgemeines	88

6.3.2	Verknüpfung von Energie- und Maschinendaten	88
6.3.3	Verknüpfung des leistungsbezogenen Maschinenmodells mit bestehenden Stammdaten	91
6.4	Ableitung des arbeitsbezogenen Auftrags- und Produktmodells.....	92
6.4.1	Allgemeines	92
6.4.2	Verknüpfung von arbeitsbezogenen Energie- und Auftragsdaten.	92
6.4.3	Verknüpfung der Energiebedarfsmodelle mit den Planungselementen der Ablauforganisation	95
6.5	Fazit.....	96
7	Lösungsverfahren zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung..	99
7.1	Übersicht	99
7.2	Aufbau und Ablauf.....	99
7.3	Ansatz einer mittel- bis kurzfristigen energiebezugsorientierten Mengenplanung	100
7.3.1	Allgemeines	100
7.3.2	Aufbau des mittelfristigen Makromodells	101
7.3.3	Formulierung des mittelfristigen Makromodells	102
7.3.4	Aufbau des kurzfristigen Mikromodells	107
7.3.5	Formulierung des Mikromodells	107
7.4	Ansatz einer kurzfristigen energiebezugsorientierten Ablaufplanung....	113
7.4.1	Allgemeines	113
7.4.2	Lösungswerkzeuge der Reihenfolgeplanung.....	114
7.4.3	Aufbau der energiebezugsorientierten Maschinenbelegung.....	118
7.4.4	Formulierung der energiebezugsorientierten Maschinenbelegung.....	119
7.5	Fazit.....	125
8	Anwendung der energiebezugsorientierten Auftragsplanung	127
8.1	Übersicht	127
8.2	Projektbeispiel zur Bewertung einer energiebezugsorientierten Auftragsplanung	127

8.2.1	Einführung.....	127
8.2.2	Aufnahme des Energiebezugs	127
8.2.3	Modellierung des betrachteten Produktionssystems	129
8.2.4	Berechnung der Losgrößen, Termine und Kapazitäten.....	131
8.2.5	Verknüpfung des Mikromodells mit der Maschinenbelegung....	137
8.2.6	Berechnung der Maschinenbelegung	138
8.3	Nutzen- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	141
8.3.1	Aufwand	141
8.3.2	Nutzen.....	143
8.3.3	Wirtschaftlichkeit	144
8.4	Diskussion der Ergebnisse.....	145
8.5	Fazit	146
9	Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick.....	149
9.1	Zusammenfassung	149
9.2	Kritische Diskussion der Ergebnisse	150
9.3	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf.....	151
10	Literaturverzeichnis	153
11	Studienarbeiten.....	181

1 Einleitung

„Die Sicherstellung einer zuverlässigen, wirtschaftlichen und umweltverträglichen Energieversorgung ist eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts.“ (BMWi 2010)

1.1 Die Situation produzierender Unternehmen im Kontext der Energiewende

Die stetig zunehmende Weltbevölkerung sowie die sinkende Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen stellen die Entwicklung der Weltwirtschaft vor große Herausforderungen (HERRMANN 2010, ABELE & REINHART 2011, WEISSENBERGER-EIBL ET AL. 2013). Verknüpft mit dem konstanten Anstieg der Treibhausgasemissionen (IPCC 2014) leitet sich daraus das Ziel einer ressourceneffizienten Güterherstellung und einer nachhaltigen Wohlstandsgenerierung ab (HAUFF & KLEINE 2009). Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist der bewusste Umgang mit endlichen und erneuerbaren Ressourcen, um industrielle Erzeugnisse ökonomisch und nachhaltig herzustellen (BULLIGNER ET AL. 2000, ABELE & REINHART 2011). Der Hauptaspekt zur Erreichung dieses Vorhabens liegt hierbei auf der Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch (LUKS 2005, NEUGEBAUER ET AL. 2008, ABELE & REINHART 2011). Gleichwohl ist in den letzten Jahrzehnten zu beobachten, dass der Ausstoß von Treibhausgasemissionen, wie z.B. CO₂, stark zugenommen hat (VICTOR ET AL. 2014). Im Rahmen dieser Entwicklung spielen die verwendeten Energieträger sowie der damit verbundene Emissionsausstoß im industriellen Umfeld eine entscheidende Rolle, da die Industrie bspw. im Jahr 2010 44 % der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortete (FISCHEDICK ET AL. 2014).

1.1.1 Globale Entwicklungen in der Energiepolitik

Ausgangspunkt für weltweite energiepolitische Veränderungen sind die 1997 und 2015 verabschiedeten Klimarahmenkonventionen der Vereinten Nationen (UN 1998, UN 2015A). Diese bilden die Grundlage für internationale Einsparungsziele für fossile Energieträger, die Transformation nationaler Energiesysteme und die Etablierung von Emissionshandelssystemen (KLEPPER ET AL. 2015). Ziel dieser Abkommen ist es, den Treibhausgasausstoß zu begrenzen sowie die Energieerzeugung aus fossilen Energieträgern erheblich zu reduzieren. Vor allem im industriellen Umfeld führt dies zu Veränderungen, da ein Großteil der CO₂-Emissionen auf den direkten und indirekten Energieeinsatz zurückzuführen ist (SCHIPPER 2006).

Im Jahr 2013 benötigte die Industrie ca. 29 % des weltweiten Energiebedarfs (IEA 2015) und leistete einen Anteil von ca. 28 % an der globalen Bruttowertschöpfung (WELTBANK 2016). Verglichen mit dem Bevölkerungswachstum zwischen 1973 und 2013, welches jährlich um 1,5 % von 3,9 auf 7,1 Mrd. Menschen anwuchs (UN 2015B), stieg die Wirtschaftsleistung im gleichen Zeitraum jedes Jahr dazu überproportional um ca. 3 % (WELTBANK 2016). Dies begründet sich durch die stetige Steigerung des weltweiten Lebensstandards (v. a. in den sog. Schwellenländern wie China oder Indien) und den damit verbundenen Bedarf an industriell gefertigten Waren (LUKS 2005). Diesen Entwicklungen gilt es seitens der Industrie ökonomisch und ökologisch nachhaltig zu begegnen. Abbildung 1 fasst die Entwicklung des Bevölkerungswachstums, der industriellen Bruttowertschöpfung sowie des Energieeinsatzes für die Jahre 1973 und 2013 zusammen und zeigt die jeweilige Prognose für das Jahr 2040. Die Daten werden über die Kennzahl der *Energieintensität (EI)* verknüpft, welche den Energieeinsatz in Bezug zur Bruttowertschöpfung setzt.

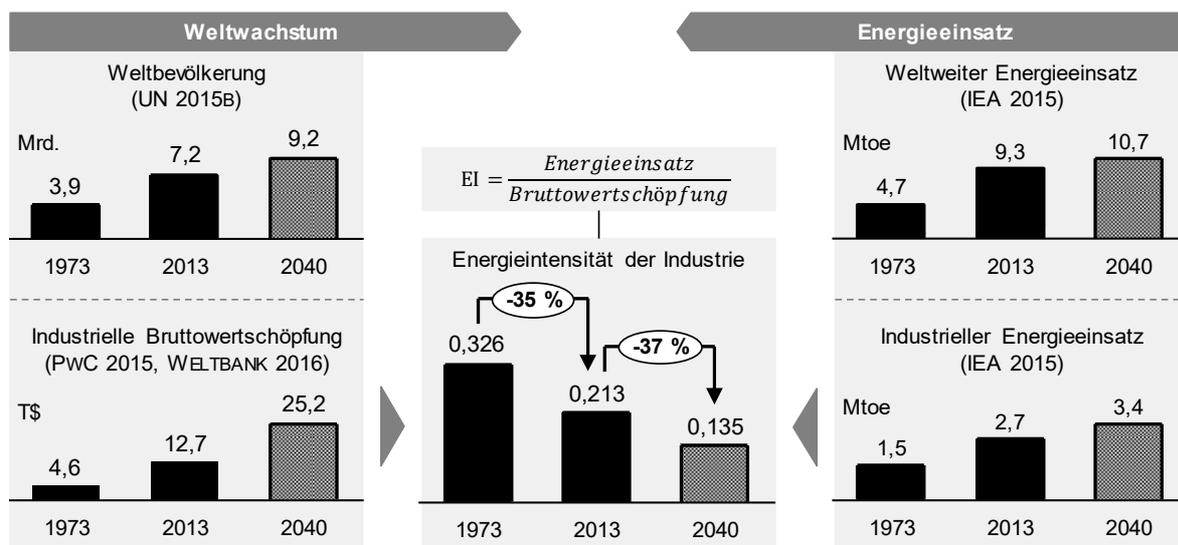


Abbildung 1: Entwicklung der industriellen Energieintensität in den Jahren 1973 und 2013 sowie die Prognose für das Jahr 2040

Es zeigt sich, dass in der Industrie zukünftig eine signifikante Verringerung der Energieintensität zu erwarten ist. Zwischen 1973 und 2013 ist es durch Produktivitätssteigerungen und Energieeffizienzmaßnahmen gelungen, eine Reduktion des Energieeinsatzes um 35 % zu realisieren. Für das Jahr 2040 wird auf Basis des in den UN-Klimakonventionen vereinbarten 2-Grad-Ziels erwartet, dass die Industrie den aktuellen Energieeinsatz um weitere 37 % verringert (IEA 2015).

1.1.2 Nationale Entwicklungen im deutschen Stromsystem

Die UN-Klimaschutzziele wurden von Deutschland in dem 2010 vorgestellten Energiekonzept aufgegriffen. Konkretes Ziel stellt die Reduktion der Treibhausgasemissionen zwischen 1990 und 2050 um 80 % dar (BMWi 2010). Darüber hinaus wird eine nachhaltige und atomkraftfreie Energieerzeugung angestrebt. Der Fokus bei der Umsetzung dieses Vorhabens liegt vor allem auf der Erzeugung von elektrischer Energie durch den Ausbau von Windkraft- und Photovoltaikanlagen. Dadurch sollen im Jahr 2050 mindestens 80 % des Elektrizitätsbedarfs mittels erneuerbarer Energieträger gedeckt werden (BMWi 2010). Das bedeutet, dass Strom, welcher bislang zentral in Großkraftwerken gewonnen wurde, vermehrt mithilfe dezentraler Energiequellen erzeugt wird (ICHA & KUHS 2016). Diese Quellen weisen jedoch eine fluktuierende Energiebereitstellung auf, da die Erzeugungsleistung an die lokalen Witterungsbedingungen (z. B. Sonneneinstrahlung) geknüpft ist (BODE ET AL. 2010). Die Auswirkungen dieser Erzeugungscharakteristik beeinflussen das Stromsystem, welches sich aus einem Markt und einem Netz bildet.

1.1.2.1 Auswirkungen der Energiewende auf den deutschen Strommarkt

Der Strommarkt verbindet das Angebot mit der Nachfrageseite i. d. R. durch eine Strombörse. Die regionale Koordination findet in sog. Bilanzkreisen mithilfe von Verantwortlichen statt (z.B. einem Energieversorgungsunternehmen), welche entsprechend der prognostizierten Nachfragesituation das Stromangebot organisieren. Mit seinem Handeln verantwortet der sog. Bilanzkreisverantwortliche das Gleichgewicht zwischen Stromangebot und -nachfrage in der jeweiligen Region (KONSTANTIN 2013). Infolge des sukzessiven Ausbaus der erneuerbaren Energien in Deutschland sind an der Strombörse fallende und stärker schwankende Strompreise zu beobachten (WÜRFEL & KUNZELMANN 2014, PUDLIK ET AL. 2016). Abbildung 2 veranschaulicht diese Entwicklung in einem Überblick.

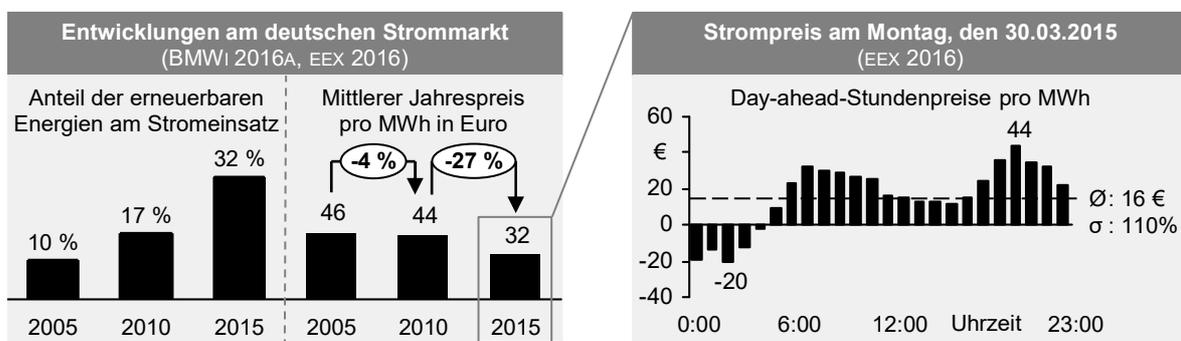


Abbildung 2: Entwicklungen am Strommarkt am Beispiel des Spotmarktes

Ersichtlich ist, dass zwischen 2010 und 2015 der mittlere Börsenpreis für Strom um über 27 %, von ca. 44 € auf ca. 32 € pro MWh, gefallen ist (EEX 2016). Gleichzeitig ist eine Erhöhung der untertägigen Preisschwankungen im jährlichen Mittel von ca. 10 € auf ca. 13 € festzustellen (EEX 2016). Zudem waren 2015 stündliche Preisschwankungen von über 100 % im Vergleich zum Tagesmittel sowie das Auftreten von negativen Preisen zu beobachten (EEX 2016). Dies unterstreicht die zunehmende Volatilität des Strommarktes. Exemplarisch zeigt Abbildung 2 einen Wochentag aus dem Jahr 2015 mit einer untertägigen Preisschwankung von über 100 % zum Tagesmittel. Die Schwankungen des Strompreises bieten für die Industrie Möglichkeiten, bei der Beschaffung Kostenvorteile zu erzielen. Der Strombörsenhandel unterstellt eine effiziente deutschlandweite Stromübertragung (EGERER ET AL. 2015), was allerdings nicht die technischen Gegebenheiten des Stromnetzes widerspiegelt (DENA 2005, DENA 2010, BMWI 2012).

1.1.2.2 Auswirkungen der Energiewende im deutschen Stromnetz

Die fluktuierende Erzeugungscharakteristik stellt das Stromübertragungsnetz vor eine Herausforderung, da national und regional ein permanentes Gleichgewicht zwischen Stromangebot und -nachfrage herrschen muss (BNETZA 2011). Eine zeitliche und räumliche Diskrepanz zwischen Angebot und Nachfrage nimmt einen kritischen Einfluss auf die Energieversorgung und führt zu sog. Netzengpässen (BNETZA 2011). Diese Engpässe sind durch die Stromnetzbetreiber präventiv oder reaktiv zu kompensieren, sodass sich einem regionalen Ausfall der Energieversorgung entgegenwirken lässt. Infolgedessen sind die Stromnetzbetreiber gefordert, Aufwände und Investitionen für die Sicherung der Netzstabilität zu betreiben (HINZ ET AL. 2014). Um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten, stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen kann bei einem regionalen Engpass ein sog. *Redispatch*, d. h. eine Anpassung des Stromangebots, vorgenommen werden. Dieser reduziert oder erhöht im Vorfeld die Einspeisung von Erzeugungsanlagen innerhalb einer Region gegen eine monetäre Kompensation, um einem Netzengpass entgegenzuwirken (BNETZA 2016A). Das ist bei erneuerbaren Energiequellen, wie z. B. Photovoltaikanlagen, lediglich bedingt möglich (KLESSMANN ET AL. 2008). Zum anderen steht der Mechanismus der sog. *Regelenergie* zur Verfügung, welcher reaktiv eine regionale Über- oder Unterversorgung ad hoc ausgleicht (BNETZA 2013). Auch hier lassen sich auf der Erzeugungsseite vorgehaltene Kapazitäten gegen ein Entgelt nutzen, die entweder zusätzliche Energie zur Verfügung stellen oder ihre Leistung entsprechend reduzieren. Abbildung 3 stellt einen Überblick zu diesen Entwicklungen dar.

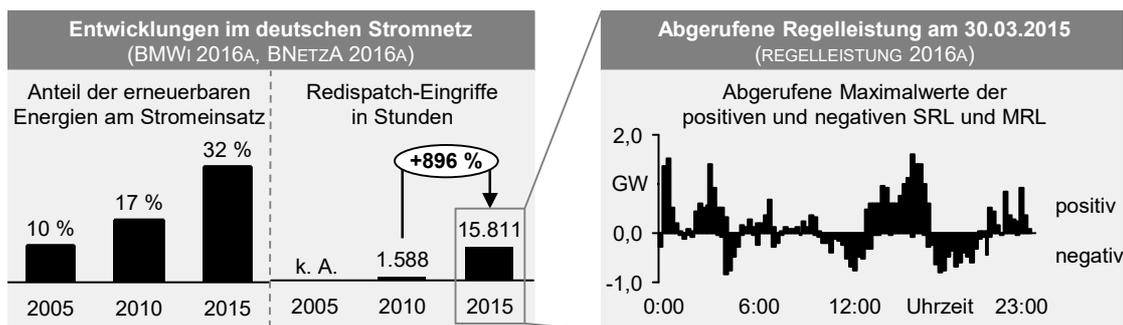


Abbildung 3: Entwicklungen im Stromnetz am Beispiel der Reserveleistung

Im Speziellen zeigt die Entwicklung der Redispatch-Eingriffe, dass ein großer Bedarf zur Anpassung zwischen Angebot und Nachfrage innerhalb des deutschen Stromsystems herrscht. Das wird bei der zusätzlichen Betrachtung der kumuliert abgerufenen Regelleistung aus der Sekundär- und Tertiärreserve (SRL und MRL) von 2,8 TWh im Jahr 2015 deutlich (REGELLEISTUNG 2016A). Am Beispieldatum von Abschnitt 1.1.2.1 ist der physikalische Eingriff der Netzbetreiber in Form der SRL und MRL dargestellt. In diesem Zeitraum waren die Netzbetreiber trotz der hohen Redispatch-Aufwände gezwungen, einen physikalischen Lastausgleich zwischen 850 MW in der negativen Regelleistung (Reduktion des Stromangebots) sowie 1.600 MW in der positiven Regelleistung (Erhöhung des Stromangebots) zu realisieren (REGELLEISTUNG 2016A). Die Reserveleistungen können grundsätzlich von Kraftwerken oder Speichersystemen erbracht werden. Allerdings sind diese nur eingeschränkt einsetzbar (z. B. Pumpspeicherkraftwerke) (STEFFEN 2012) und bedingt wirtschaftlich (z. B. Batteriespeicher) (KONDZIELLA ET AL. 2013). Die Entwicklungen sowohl am Strommarkt als auch im Stromnetz wirken sich auf die Strompreise produzierender Unternehmen aus.

1.1.2.3 Auswirkungen der Energiewende auf produzierende Unternehmen

Zwar lassen sich an der Strombörse fallende Preise durch den Ausbau erneuerbarer Energiequellen beobachten, jedoch sind Unternehmen gleichzeitig mit steigenden Stromkosten konfrontiert (SCHUMACHER & WÜRFEL 2015). Zum einen begründet sich dies durch die unterschiedlichen Steuern und Umlagen, z. B. EEG-Umlage, und zum anderen durch die Netzentgelte, welche die in Abschnitt 1.1.2.2 beschriebenen Stabilisierungsmaßnahmen der Stromnetzbetreiber finanzieren. Abbildung 4 fasst die Entwicklung der Industriestromkosten und den Einsatz von Stromerzeugungsanlagen für produzierende Unternehmen in Deutschland zusammen.

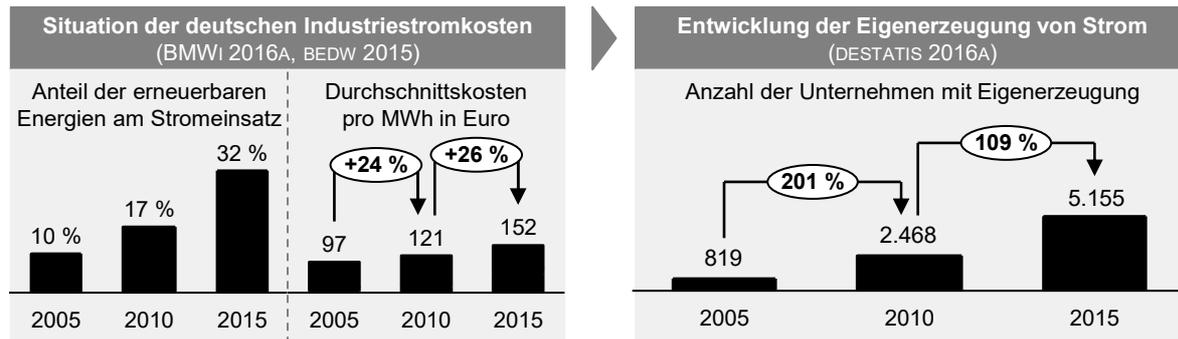


Abbildung 4: Entwicklungen der Industriestromkosten sowie der Eigenerzeugung von Strom in der Industrie

Das Ergebnis der aktuellen Entwicklungen zeigt eine kontinuierliche Stromkostensteigerung für industrielle Verbraucher (BDEW 2015). Um den steigenden Kosten entgegenzuwirken sowie mögliche Versorgungsengpässe zu kompensieren, investieren Unternehmen folglich vermehrt in Eigenerzeugungsanlagen, wie bspw. Blockheizkraftwerke. Die Zahl der Betriebe mit Eigenerzeugungsanlagen hat sich in den Jahren zwischen 2010 und 2015 mehr als verdoppelt. Diese erzeugten 2015 eine Gesamtstrommenge von 50 TWh. Dabei nutzten 70 % der Unternehmen erneuerbare Energieträger in ihrer Eigenerzeugung und produzierten damit 5 TWh an elektrischer Energie (DESTATIS 2016A).

Als Antwort auf die Herausforderungen der Energiewende haben Unternehmen neben der Eigenversorgung außerdem die Möglichkeit, sich als sog. *Prosumer* im Stromsystem zu positionieren (ROHJANS ET AL. 2010). Diese Unternehmen verfügen über die Fähigkeit, ihr Nachfrageverhalten gegenüber dem Stromsystem zu flexibilisieren. Das ermöglicht eine Kompensation von Stromangebotsschwankungen bzw. eine Erhöhung der Nachfrageelastizität (FINN & FITZPATRICK 2013). Allgemein wird dieses flexible Nachfrageverhalten als *Demand Response* zusammengefasst und stellt eine Alternative zu den Anpassungsaufwänden des Netzbetreibers dar (IEA 2003). Diese Flexibilisierung der Stromnachfrage gelingt in Industrieunternehmen bspw. mit einem sog. Lastmanagement – einem gezielten Zu- oder Abschalten von elektrischen Anlagen – zur Umsetzung (KLOBASA 2010). Die dadurch gesteigerte Nachfrageelastizität bietet eine bessere Integration von erneuerbaren Energiequellen (PAULUS & BORGGREFE 2011).

1.2 Betrachtungsrahmen und Motivation

Produktionsunternehmen unterliegen einem stetigen Wandel (WESTKÄMPER 2006, NYHUIS ET AL. 2008A, SCHENK ET AL. 2014). Neben den Herausforderungen der Energiewende sind Fabriken u. a. mit immer kürzeren Produktlebenszyklen, zunehmend individualisierten Produkten, einem globalen Wettbewerb sowie einer alternden Mitarbeiterstruktur konfrontiert. Diese Aspekte werden als *ökonomische* und *soziale Treiber* zusammengefasst (REINHART & ABELE 2011, SPATH 2013). Infolge der Energiewende und des gestiegenen Umweltbewusstseins der Konsumenten nehmen *ökologische Treiber* für die Planung und den Betrieb von Produktionsunternehmen eine immer wichtigere Position ein (FICHTER 2005, KLEINDORFER ET AL. 2005, FANG ET AL. 2011). Als Beispiele für Treiber sind hier Umwelt- und Emissionsrichtlinien, steigende Energiekosten oder der Kundenwunsch nach nachhaltig gefertigten Produkten anzuführen (DEIF 2011, REINHART & ABELE 2011, DORNFELD 2013). Abbildung 5 fasst die unterschiedlichen Treiber im Umfeld der Produktionsunternehmen exemplarisch zusammen. Um diesen unterschiedlichen Zielgrößen gerecht zu werden, bestehen im Bereich der Produktion erhöhte Anforderungen hinsichtlich der Anpassungsfähigkeit und Flexibilität technischer und organisatorischer Systeme (SETHI & SETHI 1990, FELDMANN & SLAMA 2001).

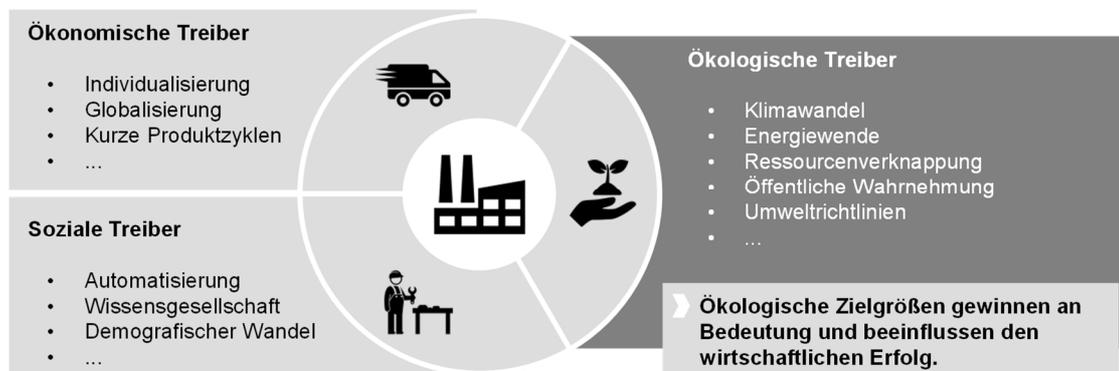


Abbildung 5: Treiber im Umfeld von produzierenden Unternehmen
(in Anlehnung an ABELE & REINHART 2011)

Mit über 36.000 Unternehmen, über 7 Mio. Arbeitsplätzen (DESTATIS 2016B) sowie einem Anteil von 22,6 % an der Bruttowertschöpfung (BMWI 2016B) gilt das verarbeitende Gewerbe als einer der wichtigsten Wirtschaftsbereiche in Deutschland. In Bezug auf den Energieeinsatz werden dort 28 % der gesamten Energieträger der Bundesrepublik benötigt (ROHDE 2013, AGE 2015). Dabei erweist sich der industrielle Anteil am deutschen Stromverbrauch mit 43 % bzw. 61.812 TWh im

Vergleich zu anderen Sektoren (z. B. Haushalte) als überproportional hoch (AGEB 2015). Innerhalb des verarbeitenden Gewerbes nehmen metallverarbeitende Betriebe, inklusive des Maschinen- und Fahrzeugbaus, durch ihre Exportstärke einen besonderen Stellenwert ein (DISPAN & SCHWARZ-KOCHER 2014). Diese Betriebe verbrauchen mit 329 PJ 13 % der Energie bzw. mit 12.962 TWh 21 % des Strombedarfs innerhalb der verarbeitenden Industrie (AGEB 2015). Der Energiebedarf des metallverarbeitenden Gewerbes setzt sich zu 50 % aus elektrischer Energie, zu 43 % aus Brennstoffen und zu 7 % aus Fernwärme zusammen (ROHDE 2013). Diese Energieformen werden an einem Produktionsstandort direkt genutzt oder mittels Umwandlungsanlagen in eine benötigte Energieform überführt (z. B. Gas in Prozesswärme und Elektrizität) bzw. zwischengespeichert (SCHIEFERDECKER 2006). Im Bezug auf den Einsatz von elektrischer Energie ist festzustellen, dass diese zu 66 % in die Betriebsmittel (z. B. Werkzeugmaschinen), zu 21 % in Nebenanlagen (z. B. Druckluftbereitstellung) und zu 13 % in Beleuchtung und Raumklimatisierung eingeht (ROHDE 2013). Abbildung 6 zeigt die Beschaffung von Energieträgern und den Einsatz von Strom in der metallverarbeitenden Industrie.

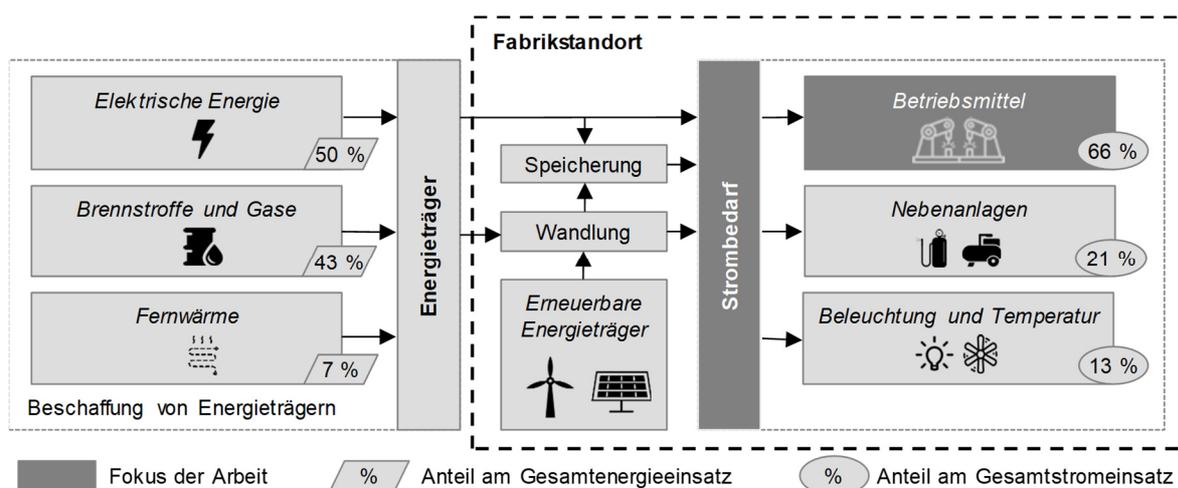


Abbildung 6: Beschaffung und Einsatz von elektrischer Energie in der metallverarbeitenden Industrie

Die Situation deutscher Unternehmen ist im Rahmen der aktuellen energiepolitischen Ziele sehr herausfordernd. So erachten Unternehmen neben den hohen Stromkosten vor allem die zukünftige Versorgungssicherheit in Deutschland als kritisch (LEVERMANN 2013). Diese Faktoren stellen sowohl einen wirtschaftlichen Wettbewerbsnachteil als auch ein Investitionsrisiko für den Produktionsstandort Deutschland dar (ENGELMANN 2013, LEVERMANN 2013). Da im Kontext der Energiewende die Stromerzeugung sowie der Einsatz elektrischer Energie im Vordergrund stehen (vgl. Abschnitt 1.1.2), fokussiert sich diese Arbeit auf die Abstim-

mung des Strombedarfs von produktionsabhängigen Betriebsmitteln. Anforderungen im Rahmen von betriebsorganisatorischen Fragestellungen sind hier zu berücksichtigen und in ein geeignetes Planungsverfahren zu überführen. Dabei stellt die Integration der Ressource Energie als wesentlicher Parameter bestehende Ansätze vor neue Herausforderungen. Neben den strategischen Leistungszielen *Zeit*, *Kosten* und *Qualität* (WESTKÄMPER 2006, WIENDAHL 2011) sind weitere Zielgrößen, wie *Energiekosten* und *CO₂-Emissionen*, zu integrieren. Diese finden bisher kaum oder nur teilweise Berücksichtigung (RAGER 2008, HERRMANN ET AL. 2011, DUFLOU ET AL. 2012). Der Grund hierfür liegt in den fehlenden Informationen über den Bezug und den Einsatz des Produktionsfaktors *Energie*. Speziell fehlen im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) geeignete Verfahren, welche die Charakteristik des elektrischen Energiebezugs in der Auftragsplanung beachten. Wie es in dieser Arbeit zu zeigen gilt, sind hierzu geeignete Lösungsansätze für diese Fragestellung abzuleiten, welche die Herausforderungen eines energieorientierten Fabrikbetriebs aufgreifen.

Zu diesem Zweck wird im Folgenden eine deskriptive Modellierung gewählt, welche die Energiesituation eines Unternehmens mit den Planungsaufgaben innerhalb der Produktion verknüpft. Mithilfe eines kreativ synthetischen Ansatzes werden deskriptive Beschreibungsmodelle mit einem sequenziellen Vorgehensmodell vereint, um anschließend als Erprobungsgegenstand einer prototypischen Validierung zu dienen. Der Erkenntnisgewinn fließt in die Formulierung einer übergreifenden Methodik ein, um Produktionsplanungsaufgaben an ein schwankendes Energieangebot auszurichten. Somit ordnet sich diese Arbeit im Rahmen der Wissenschaftssystematik in die Realwissenschaften ein, dort im Speziellen in die angewandten Handlungswissenschaften (ULRICH & HILL 1976, TÖPFER 2012). Bezogen auf das forschungsmethodische Vorgehen, steht ein heuristischer Bezugsrahmen im Fokus. Dieser diskutiert ausgehend vom Stand der Erkenntnisse und dem Aufbau eines theoretischen Verständnisses die Fragestellung einer energieorientierten Produktion. Gesammelte Daten aus industrienahen Forschungsprojekten sowie abstrahierten Modellen liefern neue theoretische Erkenntnisse, welche es kritisch zu reflektieren gilt. Die Ergebnisse dieser Reflektion finden in abstrahierter Form Anwendung, um das theoretische Verständnis zu erweitern und die generierten Modelle weiterzuentwickeln (KUBLCEK 1977, HERMANN 1996). Nachfolgend wird die vorliegende Arbeit durch eine entsprechende Zielsetzung motiviert. Diese bildet den Rahmen für einen strukturierten Aufbau der Arbeit, um geeignete Forschungsfragen zu formulieren und mithilfe der erarbeiteten Erkenntnisse wissenschaftlich zu beantworten.

1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Für eine wirtschaftliche und ökologische Auftragsplanung ist es notwendig, die technischen und organisatorischen Freiheitsgrade zu identifizieren, zu beschreiben und anschließend in ein operatives Planungsverfahren zu überführen. Im Rahmen der PPS ist diese Flexibilität in einem systematischen Ansatz darzustellen und nach vorgegebenen Zielgrößen auszurichten. Die energiebezugsorientierte Auftragsplanung übernimmt diesbezüglich die Aufgabe einer a-priori Anpassung der Produktion auf Basis verfügbarer Energieinformationen. Eine mittel- bis kurzfristige Koordination soll eine Abstimmung der Produktion ermöglichen, welche die unterschiedlichen Energiebezugsoptionen eines Standortes berücksichtigt. Eine solche Ausrichtung trägt im Rahmen dieser Arbeit zu einer Flexibilisierung des Stromnachfrageverhaltens von Fabrikssystemen bei.

Zielsetzung dieser Arbeit bezieht sich auf die Entwicklung einer *Methodik zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung*. Die Ressource *elektrische Energie* soll dabei für den Fabrikbetrieb als Planungselement modelliert und somit der Energiebedarf für die Produktionsplanung beeinflussbar werden. Speziell das Vorgehen der Produktionsplanung ist hierbei um energetische Zielgrößen zu erweitern.

Innerhalb des heuristischen Bezugsrahmens zur Erstellung der Methodik leiten sich vier Hauptaspekte ab, welche im Rahmen dieser Arbeit behandelt werden. Diese lassen sich in folgende vier Forschungsfragen überführen:

1. *Energiebezug*
Wie können in der Produktionsplanung unterschiedlichen Varianten von Bezugsoptionen elektrischer Energieträger berücksichtigt werden?
2. *Energiebedarf*
Wie können produktionsabhängige Energiebedarfe eines Produktionsstandortes als Gegenstand der Planung modelliert werden?
3. *Lösungsverfahren*
Wie können energieorientierte Zielstellungen eines Unternehmens in einem Planungsverfahren berücksichtigt werden?
4. *Nutzen*
Wie kann der Nutzen einer energiebezugsorientierten Planung für ein Unternehmen quantifiziert werden?

Mit der Beantwortung dieser Fragestellungen sollen Unternehmen zukünftig befähigt werden, ihren Energieeinsatz bei gleichzeitiger Berücksichtigung individueller ökonomischer und ökologischer Ziele zu planen. Durch die methodische Integration von Energiebezugsoptionen und produktionsbezogenen Energiebedarfen in die PPS ist eine Beeinflussung des Energieeinsatzes sowie des energieverbrauchsbedingten CO₂-Ausstoßes zu realisieren. Hierzu ist mithilfe der Auftragsplanung ein *variables Lastmanagement* mit dem konventionellen Ablauf der Produktionsplanung zu vereinen.

Die vorliegende Arbeit ist in neun Kapitel unterteilt, welche im Folgenden kurz erläutert werden. *Kapitel 1* dient als Einleitung in die Inhalte und Zielsetzung der Arbeit. *Kapitel 2* beschreibt die Grundlagen in Bezug auf die Energiebezugsoptionen eines Unternehmens sowie die Aufgaben der Auftragsplanung im Kontext der PPS. *Kapitel 3* beschäftigt sich mit dem Stand der Erkenntnisse im Bereich des Energie- und Lastmanagements in Verbindung mit der PPS. Dabei werden bestehende energieorientierte PPS-Ansätze aus der Wissenschaft aufgegriffen, vorgestellt und bewertet.

Kapitel 4 verschafft einen Überblick über den Aufbau sowie die Elemente einer energieorientierten Auftragsplanung. *Kapitel 5* fokussiert die Integration der unterschiedlichen Energiebezugsoptionen eines Produktionsstandortes für die PPS. Der Energiebedarf der Produktion wird in *Kapitel 6* erarbeitet. Dabei werden die Strombedarfe von Produktionsressourcen, Produkten und Aufträgen modellhaft beschrieben. *Kapitel 7* nimmt die planungsgerechte Modellierung von Energiebezug und Energiebedarf auf und überführt diese in ein sequenzielles mathematisches Lösungsverfahren. Dieses Verfahren setzt sich aus zwei Ansätzen zur Mengen- sowie einem Ansatz zur Ablaufplanung zusammen.

In *Kapitel 8* werden die erarbeiteten Erkenntnisse auf ihre industrielle Umsetzbarkeit und Validität hin bewertet. Im Rahmen dessen werden Methoden zur Beschreibung von Energiebedarf und -bezug am Beispiel eines Anwendungsfalls aus dem Maschinen- und Anlagenbau vorgestellt. *Kapitel 9* fasst die gesamte Arbeit zusammen und analysiert und diskutiert die Inhalte sowie die Ergebnisse. Den Abschluss bilden der Ausblick und der weitere Forschungsbedarf. *Abbildung 7* veranschaulicht den Aufbau der vorliegenden Arbeit.

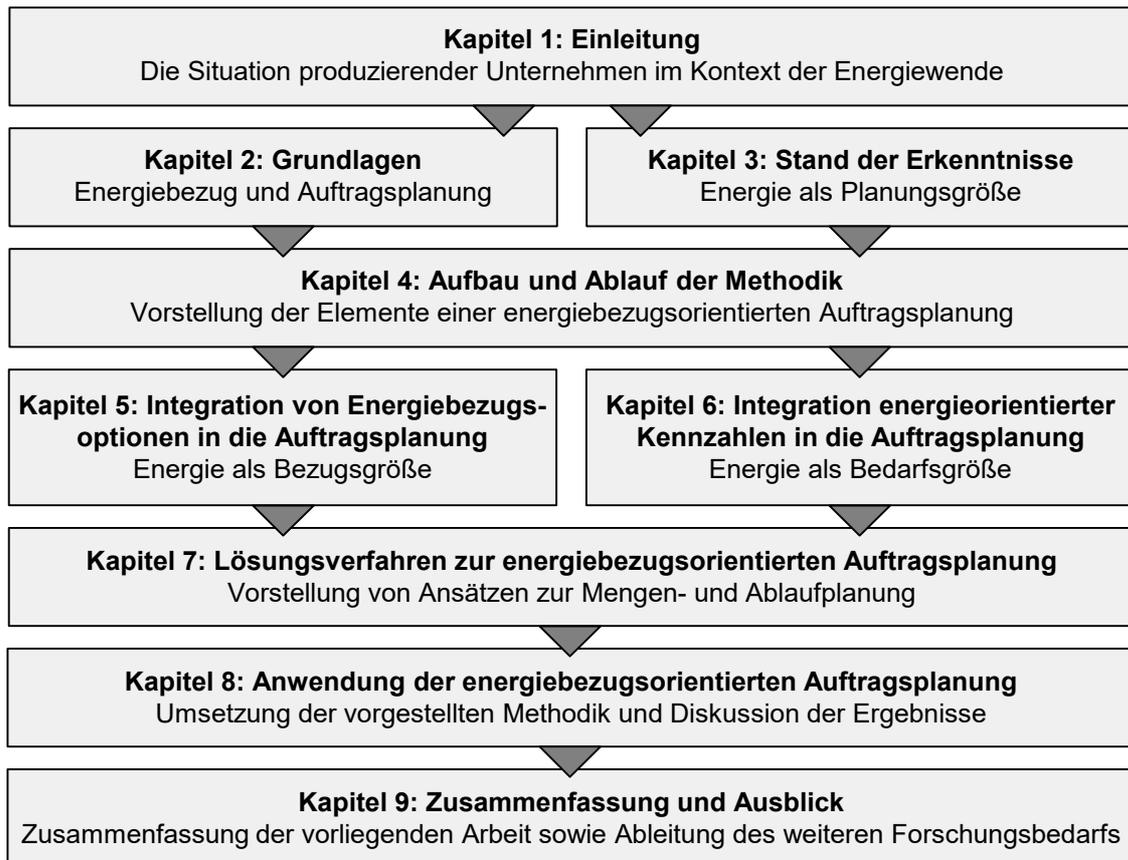


Abbildung 7: Aufbau der vorliegenden Arbeit

2 Grundlagen

2.1 Übersicht

Die Zielsetzung dieses Kapitels umfasst die Einführung von Begrifflichkeiten im Kontext der Auftragsplanung sowie des industriellen Energiebezugs. Dabei wird ein allgemeines Verständnis für Produktionssysteme, Verfahren der PPS sowie Möglichkeiten einer elektrischen Energiebedarfsanpassung vermittelt. Abschnitt 2.2 bietet eine grundlegende Einführung in den Themenkomplex der Auftragsplanung. Einen Überblick der unterschiedlichen Energiebezugsoptionen eines Unternehmens schafft Abschnitt 2.3. Darauf aufbauend, zeigt Abschnitt 2.4 Möglichkeiten der Lastanpassung im Produktionsumfeld auf.

2.2 Auftragsplanung im operativen Produktionsmanagement

2.2.1 Allgemeines

Der Bedarf von anpassungsfähigen Produktionsunternehmen im Kontext der Energiewende gelangte bereits in den vorherigen Abschnitten zur Erläuterung. Als Grundlage werden in den folgenden Abschnitten allgemeine Definitionen (Abschnitt 2.2.2) und Begrifflichkeiten des Produktionsmanagements (Abschnitt 2.2.3) erörtert. Aufgaben und Funktionen der Produktionsplanung und -steuerung werden in Abschnitt 2.2.4 voneinander abgegrenzt. Dies dient im Weiteren als Wissensbasis für die Auftragsplanung im Rahmen der Eigenfertigung (Abschnitt 2.2.5), deren Planungselemente (Abschnitt 2.2.6) sowie der Einführung von relevanten mathematischen Entscheidungsmodellen (Abschnitt 2.2.7).

2.2.2 Definitionen

Produktionsunternehmen definieren sich durch die Herstellung industrieller Erzeugnisse, allgemein als *Güter* bezeichnet, sowie durch deren Vertrieb und die Beschaffung der dafür notwendigen Ressourcen (WIENDAHL ET AL. 2014). Als *Ressourcen* werden elementare Einsatzfaktoren der Produktion, nämlich Mensch, Maschine, Material und Information, beschrieben. Durch die Ergänzung von Diensten und Rechten werden diese zu allgemeinen Produktionsfaktoren – bzw. *Input* – zusammengefasst (DYCKHOFF 2003, DANGELMEIER 2009; SCHUH & SCHMIDT 2014). Diese sog. Inputfaktoren werden mithilfe von *Produktionssystemen* in Güter (*Out-*

put) im Rahmen des innerbetrieblichen Produktherstellungsprozesses transformiert (DYCKHOFF 2003, WESTKÄMPER 2008, DANGELMEIER 2009). Gesteuert wird der Prozess durch sog. *Aufträge*, welche sich wiederum aus dem Kundenbedarf eines Marktes ableiten (WIENDAHL ET AL. 2014).

Der Begriff *System* wird in Bezug auf die Produktion in funktionale, strukturelle und hierarchische Konzepte unterteilt (WIENDAHL 2011). Funktionale Konzepte beschreiben die Funktion und den Zustand eines Systems sowie die Input-Output Beziehung als Einheit (z. B. ein Unternehmen). Strukturelle Systeme beschreiben Beziehungen zwischen Einzelementen, welche eine spezifische Funktion erfüllen (z. B. verkettete Anlagen in einem Fertigungsbereich). Dabei können Elemente eines Systems auch Subsysteme in einem hierarchischen Konzept darstellen (ROPOHL 2009, WIENDAHL 2011). Aktionen werden durch sog. *Handlungssysteme* beschrieben, welche in Systeme der Zielsetzung (Leitlinien des Handelns), der Informationsverarbeitung (Interaktion zwischen Handlungssystemen) und der Ausführung (stofflich-energetische Transformation) differenziert werden (ROPOHL 2009). Ein Beispiel hierfür stellt das Produktionsmanagement dar. Abbildung 8 verdeutlicht den Systembegriff der Produktion und verknüpft diesen mit möglichen Umwelteinflüssen (Dyckhoff & Spengler 2007, WESTKÄMPER 2008). Als wesentliche Disziplinen zur Beeinflussung eines Produktionssystems sind die *Fabrikplanung* und das *Produktionsmanagement* zu nennen.

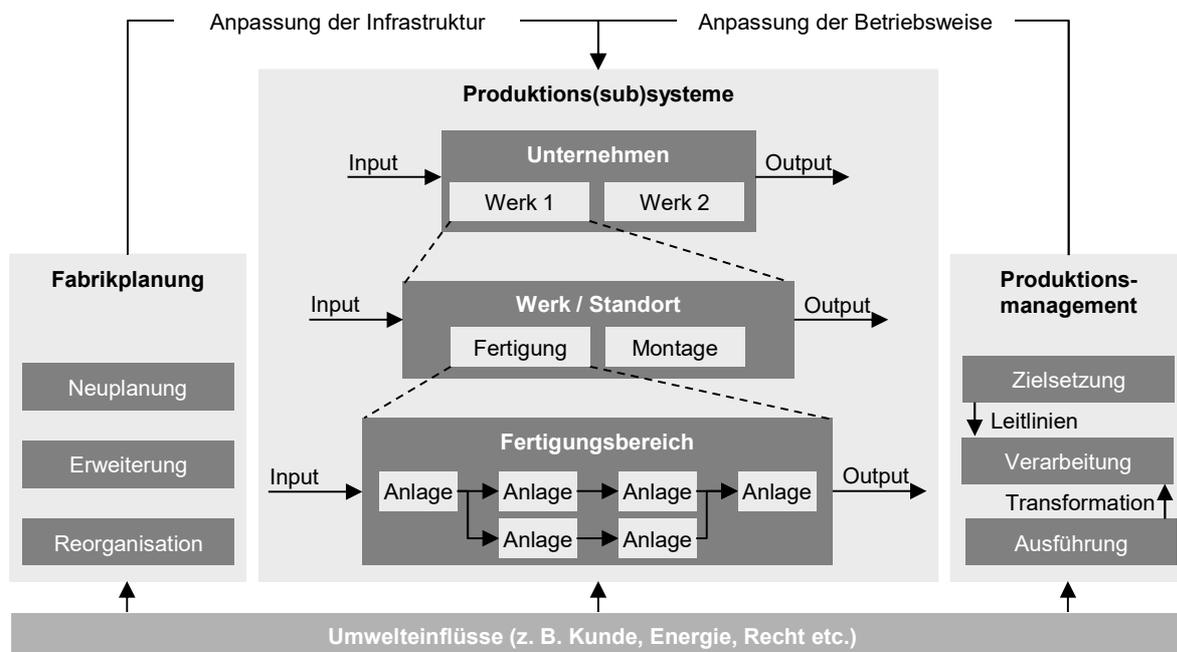


Abbildung 8: Der Systembegriff in Bezug auf die Produktion

Der innerbetriebliche Produktherstellungsprozess wird in abstrahierter Form durch den Einsatz von *Produktionssystemen* realisiert. Die Transformation der Inputelemente findet nicht zwangsläufig an einem Standort statt, weshalb sich ein Produktionssystem eines Unternehmens in weitere Subsysteme (z. B. Werk, Bereich, Zelle etc.) mit eigenen Systemelementen unterteilen lässt (EVERSHEIM & SCHUH 1999, WIENDAHL ET AL. 2014). Bei der Herstellung von Stückgütern werden meist die Unternehmensbereiche der Fertigung und Montage als Produktion bezeichnet (MAUDERER 2010). Voraussetzung für den Produktherstellungsprozess sind eine geeignete Infrastruktur sowie entsprechende Produktionsanlagen. Die *Fabrikplanung* verantwortet u. a. die räumliche und technische Planung einer Produktion, in welcher die Strukturen der Produktions-, Dienstleistungs- und Logistikprozesse eines Unternehmens gestaltet werden (SCHENK ET AL. 2014). Entscheidungen in der Fabrikplanung bezüglich Planung, Erweiterung sowie die Reorganisation eines Standortes (z. B. durch eine geänderte Fertigungs- und Montagesysteme) beeinflussen die Elemente und die Leistung (Output) eines Produktionssystems (PAWELLEK 2014, WIENDAHL ET AL. 2014). Somit zielen die Aufgaben der Fabrikplanung auf das Themenfeld der langfristigen Anpassungs- bzw. Wandlungsfähigkeit einer Fabrik (NYHUIS ET AL. 2008A). Die kurzfristige Anpassung eines Produktionssystems an die Umwelt (z. B. an einen schwankenden Strompreis) kann nicht unmittelbar im Rahmen der Fabrikplanung vorgenommen werden. Hierbei ist auf festgelegte Flexibilitätskorridore des Produktionssystems zurückzugreifen (NYHUIS ET AL. 2008B). Diese Aufgabe übernimmt das *Produktionsmanagement*, welches die Organisation bzw. das Handeln koordiniert und mit produktiven und dispositiven Elementen umsetzt.

2.2.3 Produktionsmanagement

Das Produktionsmanagement beschäftigt sich mit der übergreifenden, ablauforganisatorischen Umsetzung eines Produktherstellungsprozesses. Dies umfasst die Planung, Überwachung und Steuerung einer Produktion und der betrieblichen Ressourcen (SCHUH & SCHMIDT 2014). Produktive Elemente stellen dabei Ausführungssysteme dar, wie z. B. Produktionsanlagen, welche für die Transformation der Inputfaktoren verantwortlich sind. Zielsetzungs- und Informationsverarbeitungssysteme (z. B. PPS-Systeme) sind hingegen dispositive Elemente, welche die Koordination der produktiven Elemente verantworten (GUTENBERG 1971, WESTKÄMPER 2008, GÜNTHER & TEMPELMEIER 2012). Das Produktionsmanagement hat zur Aufgabe, die Ausführung der Produktionsaufträge durch den Einsatz (z. B. von Produktionsanlagen) und die Transformation von Ressourcen (z. B. von Energie) mithilfe ge-

eigneter Lenkungssysteme zu organisieren und zu kombinieren (WIENDAHL 2011, SCHUH & SCHMIDT 2014). Lenkungssysteme beschreiben dabei Management-, Planungs-, oder Steuerungssysteme, die dispositive Aufgaben in unterschiedlichen Zeithorizonten wahrnehmen. Allgemein ist zwischen einem *strategischen*, *taktischen* und *operativen* Planungshorizont zu differenzieren (ZÄPFEL 1989). Das strategische und das taktische Produktionsmanagement fokussiert Planungshorizonte von drei bis zehn Jahren und länger, um Veränderungen der Unternehmensumwelt im Voraus zu antizipieren (ZÄPFEL 1989, EVERSHEIM & SCHUH 1999, WIENDAHL 2010). Das operative Produktionsmanagement stellt die Umsetzung der Produktionsaufgabe in den Mittelpunkt. In Form von Makroperioden (z. B. Jahres- oder Quartalspläne) wird das Planungsergebnis dokumentiert sowie mithilfe von rollierend geplanten Mikroperioden (z. B. Monats- oder Wochenpläne) aktualisiert (WIENDAHL 2010). Dementsprechend konzentriert sich dieser Bereich auf die Lenkung einer Produktion und greift dabei auf einen vorab definierten Lösungsraum zur Erfüllung der Produktionsaufgabe zurück. Im Speziellen dient die PPS als Lenkungsinstanz zur Anpassung der Produktionssysteme an geänderte Umweltbedingungen. Die Aufgaben und Funktionen einer PPS finden im nachfolgenden Abschnitt genauer Erläuterung.

2.2.4 Produktionsplanung und -steuerung

Unter Berücksichtigung der kurzfristig schwankenden Produktionsanforderungen gelangt die PPS in den Betrachtungsfokus dieser Arbeit. Die PPS ist maßgeblich am Erfolg eines Unternehmens beteiligt, da sie als Lenkungssystem Liefertreue, Lieferzeit und Lieferfähigkeit und damit die Leistungsfähigkeit eines Produktionssystems beeinflusst (WIENDAHL 2010, SCHUH & SCHMIDT 2014). Neben diesen Marktzielen sind die sogenannten Betriebsziele (z. B. eine hohe Anlagenauslastung) zu beachten. Diese konkurrierenden Ziele lassen sich durch die Leistung sowie die Kosten eines Produktionssystems beschreiben (WIENDAHL 2010). Die Leistungsaspekte fassen die Ziele einer hohen Liefertreue (z. B. eine hohe Termintreue) und einer geringen Lieferzeit (z. B. kurze Durchlaufzeiten) zusammen. Dem stehen die Kostenaspekte entgegen, welche geringe Herstellungskosten (z. B. eine hohe Anlagenauslastung) und niedrige Kapitalbindungskosten (z. B. niedrige Bestände) anstreben. Die PPS hat zur Aufgabe, die unterschiedlichen Ziele zu verknüpfen und mittels einer Gewichtung die Ausführung der Produktion wirtschaftlich zu koordinieren. Zur Verdeutlichung des Zielkonfliktes demonstriert Abbildung 9 das sog. *Polylemma der PPS* (WIENDAHL 2010).

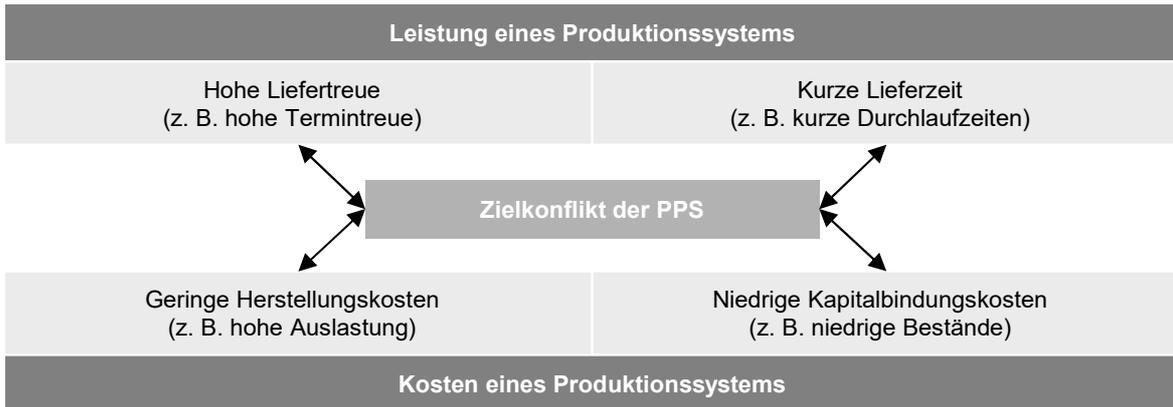


Abbildung 9: Zielkonflikt der PPS im Rahmen der Auftragsplanung
(in Anlehnung an WIENDAHL 2010)

Folgende Abschnitte stellen Referenzmodelle vor, definieren die Aufgaben der PPS und erläutern Elemente und Funktionen.

2.2.4.1 Definition der Produktionsplanung und -steuerung

Der Kern der PPS ist die Abwicklung von Produktionsaufträgen nach Art und Menge in regelmäßigen Planungshorizonten (SCHUH & STICH 2012). Diese sind mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen innerhalb einer Systemgrenze, z. B. einer Fabrik oder eines Fabrikbereichs, und dem Auftreten etwaiger Störungen bestmöglich umzusetzen (WIENDAHL 2010, LÖDDING 2016). Die Teilaufgaben der PPS werden in „das systematische Suchen und Festlegen von Zielen für die Produktion, Vorbereiten von Produktionsaufgaben und Festlegen des Ablaufes zum Erreichen dieser Ziele“ und „das Veranlassen, Überwachen und Sichern der Durchführung von Produktionsaufgaben hinsichtlich Bedarf (Menge und Termin), Qualität, Kosten und Arbeitsbedingungen“ (VDI 1992) unterteilt. Hierbei lassen sich diverse Modellierungsansätze unterscheiden.

2.2.4.2 Referenzmodelle der PPS

Allgemein ist festzuhalten, dass in der Literatur die Systemgrenzen der PPS nicht klar definiert sind. Dies wird insofern deutlich, als dass die Begrifflichkeiten *Planung* und *Steuerung* nicht konsistent zur Verwendung kommen (DÖRMER 2013). Demzufolge ist die Abgrenzung zwischen den einzelnen Aufgaben je nach betrachtetem Modell unterschiedlich. Im Folgenden werden fünf ausgewählte Modellierungsansätze der PPS vorgestellt und hinsichtlich Planungs- und Steuerungsaufgaben untersucht:

- HACKSTEIN (1989) definiert fünf Hauptfunktionen der PPS. Die Produktionsplanung umfasst die Funktionen der Programmplanung, der Bedarfsplanung sowie der Termin- und Kapazitätsplanung. Die Produktionssteuerung übernimmt die Planungsergebnisse und führt eine Auftragsfreigabe sowie eine Auftragsüberwachung durch.
- SCHEER (1997) reichert mit seinem Y-Modell die Produktionsplanung um weitere Elemente, wie z. B. Vertriebsfunktionen, an. Anders als bei HACKSTEIN ordnet SCHEER die Auftragsfreigabe der Planungsebene zu.
- Das sog. *Material Requirements Planning* (MRP) fasst sämtliche PPS-Funktionen bis zur Auftragsfreigabe unter dem Begriff der Planung zusammen (JODLBAUER 2008, KURBEL 2016). In langfristigen Zeiträumen findet die Planung gegen unbegrenzte Kapazitäten statt. Erst die Feinplanung, welche durch die Funktion der Auftragsfreigabe beschrieben wird, berücksichtigt verfügbare Produktionskapazitäten.
- DANGELMEIER (2009) schreibt in seinem Modellierungsansatz alle Aufgaben inklusive der Auftragsfreigabe der Planung zu. Anders als im MRP-Ansatz finden hier Kapazitätswerte in Form von Makro- und Mikromodellen durchgängig Berücksichtigung.
- Das Aachener PPS-Modell nach SCHUH & STICH (2012) fasst die bereits genannten Funktionen in Kernaufgaben zusammen und ergänzt Querschnittsaufgaben. Eine strikte Differenzierung zwischen Planungs- und Steuerungsaufgaben findet jedoch nicht statt.

Alle vorgestellten Modelle ermöglichen es, eine energieorientierte Auftragsplanung zu integrieren. Im Vergleich zu den weiteren Referenzmodellen, bietet das Aachener PPS-Modell durch seine generische Beschreibung die größten Freiheitsgrade, um Adaptionen im Aufbau und Ablauf zu realisieren und die Aufgaben zwischen einer energieorientierten Planung und Steuerung abzugrenzen. Folglich wird das Aachener Referenzmodell nach SCHUH & STICH (2012) für diese Arbeit übernommen. Der nächste Abschnitt erläutert und definiert die Begrifflichkeiten der PPS. Dabei steht der Begriff der *Auftragsplanung* im Vordergrund.

2.2.4.3 Aufgaben und Funktionen der PPS

Die Hauptaufgabe der PPS ist die ökonomische Koordination des Produktherstellungsprozesses durch ein Produktionssystem und dessen Elemente, wobei Kern- und Querschnittsaufgaben differenziert werden können. Kernaufgaben umschließen sämtliche Aufgaben des Herstellungsprozesses. Querschnittsaufgaben dienen hingegen der durchgängigen Integration und Interaktion zwischen den Einzelfunktionen der Kernaufgaben (SCHUH ET AL. 2012A). Abbildung 10 zeigt die Referenzarchitektur des Aachener PPS-Modells. Die Kernaufgaben umfassen die Funktionen der Programm- und der Bedarfsplanung sowie der Planung und Steuerung von Eigenfertigung und Fremdbezug. Die Programmplanung legt in einem definierten Zeitraum fest, welche Art und Menge von Produkten zu einem bestimmten Termin herzustellen sind (SCHUH ET AL. 2012A). Daraus leitet sich die Bedarfsplanung ab, die einen Abgleich mit dem Bestand vollzieht, um daraus benötigte Produktions- und Bestellmengen zu errechnen. Aufträge, die an Lieferanten vergeben werden, sind Gegenstand der Fremdbezugsplanung und -steuerung. Sämtliche weiteren Produktionsbedarfe werden als Produktionsaufträge innerhalb des Unternehmens verteilt z.B. durch die Eigenfertigungsplanung verantwortet (SCHUH & SCHMIDT 2014).



Abbildung 10: Das Aachener PPS-Modell (nach SCHUH ET AL. 2012A)

Wesentliche Querschnittsaufgaben stellen die Datenverwaltung, das Controlling sowie das Auftrags- und Bestandsmanagement dar. Die Datenverwaltung verantwortet die Speicherung und Pflege sämtlicher Daten mit dem Ziel einer hohen Datenqualität (SCHUH ET AL. 2012B). Darauf aufbauend prüft das Controlling die Zielerreichung und leitet im Bedarfsfall Maßnahmen zur Korrektur ein. Das Bestandsmanagement hat zur Aufgabe, Lagerbestände (z. B. Material) zu erfassen und zu verwalten. Ziel des Auftragsmanagements ist es, eine integrierte Planung und Steuerung der Kundenaufträge, z. B. in Form von Produktionsaufträgen (Eigenfertigung) oder Beschaffungsaufträgen (Fremdbezug), zu ermöglichen (WIENDAHL 2010, SCHUH ET AL. 2012B). Im Rahmen dieser Arbeit sind im Besonderen die Eigenfertigungsplanung sowie das Bestands- und Auftragsmanagement von Bedeutung.

2.2.5 Auftragsplanung in Rahmen der Eigenfertigung

Die Eigenfertigungsplanung und -steuerung übernimmt Aufgaben und Funktionen der PPS, welche die Herstellung von Produkten und Zwischenerzeugnissen durch unternehmenseigene Produktionssysteme realisiert (WIENDAHL 2010). Dies inkludiert die Funktionen der Losgrößenrechnung, Feinterminierung, Ressourcenfeinplanung, Reihenfolgeplanung, Verfügbarkeitsprüfung und der Auftragsfreigabe (SCHUH ET AL. 2012B). Die Losgrößenrechnung übernimmt die Aufgabe, Aufträge in einem Fertigungsbereich nach Art und Menge zusammenzufassen sowie auf unterschiedliche Planungsperioden zu verteilen. In diesen Planungsperioden stellt die Feinterminierung sicher, dass die gebildeten Aufträge innerhalb eines Produktionsbereichs zeitgerecht hergestellt werden. Auf Basis unbegrenzter Kapazitäten der Produktionsressourcen erfolgt eine erste zeitliche Abschätzung. Eine Gegenüberstellung von Kapazitätsangebot und -bedarf findet in der Ressourcenfeinplanung statt. Hier wird die tatsächliche Kapazitätssituation berücksichtigt und die bisherige Planung entsprechend angepasst. Im Rahmen dieser Korrektur werden die Aufträge auf spezifische Produktionsressourcen verteilt und bilden dort eine Auftragsreihenfolge (SCHUH ET AL. 2012B). Diese Reihenfolge gilt es auf Basis ausgewählter Maßnahmen (z. B. mittels einer Maschinenbelegung) und unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten aufzustellen. Die Verfügbarkeitsprüfung bildet den letzten Teil der planungsbezogenen Aufgaben innerhalb der PPS. Das Ziel besteht darin, den geplanten Auftrag für den Produktionsprozess freizugeben und zuvor die Verfügbarkeit der erforderlichen Ressourcen zu überprüfen. Ist dies der Fall, wird der Auftrag durch die Auftragsfreigabe unter Berücksichtigung der vorliegenden Planungsergebnisse veranlasst. Bei einer Abweichung (z. B. bei einer veränderten Kapazitätssituation) prüft die Auftragsfreigabe die Planungsergebnisse und ersetzt diese ggf. durch den Gebrauch definierter Freigaberegeln (SCHUH ET AL. 2012B).

In Bezug auf das Auftragsmanagement kann der Planungsablauf von Produktionsaufträgen in die Funktionen der Losgrößenplanung, der Termin- und Kapazitätsplanung sowie der Reihenfolgeplanung unterteilt werden (LUCZAK 2004). Abbildung 11 ordnet die Funktionen der Auftragsplanung innerhalb der Planungsaufgaben der Eigenfertigungsplanung und -steuerung ein. Im Folgenden wird der Ablauf der Auftragsplanung durch die Detaillierung der einzelnen Elemente vorgestellt.

Planungsaufgaben der PPS	Ablauf der Auftragsplanung	Ziel
Losgrößenrechnung	Losgrößenplanung	Aufträge in Fertigungslose überführen
Feinteterminierung	Termin- und Kapazitätsplanung	Fertigungslose zeitlich grobterminieren auf Basis vorhandener Ressourcen
Ressourcenfeinplanung		
Reihenfolgeplanung	Reihenfolgeplanung	Verteilung der Lose auf die Ressourcen

Abbildung 11: Ablauf der Auftragsplanung (in Anlehnung an LUCZAK 2004)

Losgrößenplanung

Die Aufgabe der Losgrößenplanung besteht darin, Produktionsaufträge in wirtschaftliche Fertigungslose zu überführen. Ziel ist es, sowohl Rüstkosten durch Produktwechsel als auch Lagerkosten und somit Kapitalbindungskosten zu reduzieren. Zur Berechnung der Losgrößen finden neben Erfahrungswissen auch mathematische Lösungsverfahren Verwendung. Sie führen zu sog. Eckterminen, z. B. eine Kalenderwoche oder ein Wochentag, welche an die Termin- und Kapazitätsplanung weitergeleitet werden (SCHUH ET AL. 2012B).

Termin- und Kapazitätsplanung

Die Termin- und Kapazitätsplanung ermittelt auf Basis der Ecktermine geplante Start- und Endtermine der unterschiedlichen Aufträge in jedem Fertigungsbereich. Dabei wird davon ausgegangen, dass sämtliche Ressourcen der Fertigung zur Verfügung stehen. Neben unterschiedlichen regelbasierten Vorgehen, wie z. B. der Rückwärtsterminierung, stehen auch hier Lösungsverfahren zur Verfügung, um die Aufträge anhand ihrer Fristen auf vorhandene Ressourcen, wie z. B. Maschinen, zu verteilen. Das Ergebnis ist ein abgestimmter Terminplan, der die verfügbaren Kapazitäten der unterschiedlichen Fertigungsbereiche berücksichtigt sowie die generierten Termine der Reihenfolgeplanung übergibt (SCHUH ET AL. 2012B).

Reihenfolgeplanung

Der Reihenfolgeplanung kommt die Aufgabe zu, auf Basis der vorgeplanten Kapazitäten die unterschiedlichen Aufträge bzw. Fertigungslose auf die bestehenden Ressourcen einzuplanen. Dabei ist es möglich, dass sich Termine oder Aufträge geändert haben oder Kapazitäten, z. B. durch eine Störung, kurzfristig nicht mehr zur Verfügung stehen. Somit sind diese Änderungen, z. B. mittels einer angepassten Maschinenbelegung, einzupflegen. Ziel ist es, den Kapazitätsbedarf sowie das -angebot aufeinander abzustimmen. Diesbezüglich stehen unterschiedliche Verfah-

ren zur Verfügung, welche dieses Zuordnungsproblem lösen. Das Ergebnis der Reihenfolgeplanung wird der Auftragsfreigabe übergeben, welche die Durchsetzung der Planungsergebnisse koordiniert (SCHUH ET AL. 2012B).

Um den Ablauf des Auftragsplanungsprozesses zu gewährleisten, sind spezifische Daten und Planungselemente erforderlich. Diese werden im folgenden Abschnitt näher erörtert.

2.2.6 Elemente der Auftragsplanung

Als Grundlage für den auftragsbezogenen Planungsprozess dienen die Betriebsdaten einer Produktion sowie *Stücklisten* und *Arbeitspläne*. Daraus werden Losgrößen, Termine und Kapazitäten und Reihenfolgen berechnet. Diese Eingangsinformationen gelangen bspw. in Software-basierten Planungssystemen zur Anwendung, welche den Planungsprozess unterstützen. Die Begrifflichkeiten erläutern sich folgendermaßen:

Betriebsdaten

Die Voraussetzung für die Auftragsplanung sind Betriebs- und Maschinendaten, welche in der Datenverwaltung der PPS vorliegen. Die Bereitstellung erfolgt durch den Einsatz entsprechender manueller oder technischer Systeme zur Betriebs-(BDE) und Maschinendatenerfassung (MDE) (KLETTI & SCHUHMACHER 2011). Die verfügbaren Daten werden in Stamm- und Bewegungsdaten unterteilt. Stammdaten weisen im Vergleich zu Bewegungsdaten eine lange Gültigkeit auf, da sie bspw. das Kapazitätsangebot, die benötigte Ressourcen (z. B. Bediener, Werkzeuge oder Material), die Bearbeitungszeiten einer Anlage oder die Schichtzeiten des Fertigungsbereiches repräsentieren. In Form von Stücklisten und Arbeitsplänen werden die Stammdaten als Planungselemente dokumentiert (KURBEL 2016).

Bewegungsdaten hingegen repräsentieren veränderliche Zustände von Aufträgen, Lagerbeständen oder Betriebsdaten. Sie sind lediglich für eine begrenzte Zeitdauer gültig und werden hauptsächlich zur Steuerung und Überwachung genutzt (SCHUH ET AL. 2012B).

Abbildung 12 fasst auftragsbezogene Stammdaten und deren Dokumentation exemplarisch zusammen.

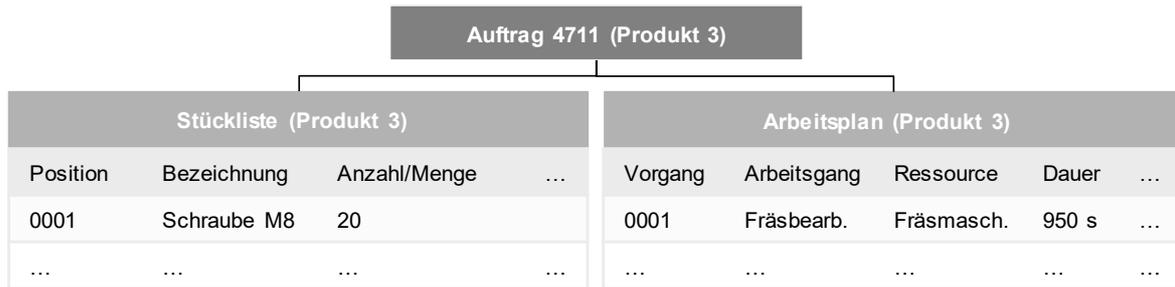


Abbildung 12: Auftragsbezogene Stammdaten und Dokumente

Stücklisten

Eine Stückliste beschreibt ein Produkt mittels einer Erzeugnisgliederung in tabellarischer und hierarchischer Form. Als Verzeichnis für die Bestandteile eines Produktes fasst sie die benötigten Materialien unter Angabe von Bezeichnung, Menge und Einheit zusammen (SCHUH ET AL. 2012B). Durch eine Stücklistenauflösung lassen sich die Produktionsmengen, die Produkte sowie die Zwischenprodukte errechnen und in den Planungsvorgang integrieren. Daraus leitet sich der Ressourcenbedarf einer Produktion zur Produktherstellung ab.

Arbeitspläne

Arbeitspläne umfassen den schrittweisen Herstellungsablauf eines Produktes an den benötigten Produktionsressourcen. Der Prozess an einer Maschine wird als Arbeitsvorgang (AVO) bezeichnet und definiert u. a. Zeiten für die Bearbeitung an der Maschine. Neben zeitlichen Informationen können auch Kapazitätsbedarfe von Bedienern oder Materialien hinzugefügt werden (SCHUH ET AL. 2012B). Der zeitliche Ressourceneinsatz in einem Produktionssystem errechnet sich somit aus der Verarbeitung der Arbeitspläne.

Software-basierte PPS-Systeme

Die Elemente der Auftragsplanung sind fester Bestandteil von innerbetrieblichen, Software-basierten PPS-Systemen, wie z. B. Enterprise-Resource-Planning (ERP) oder Manufacturing-Execution-Systemen (MES) (KLETTI & SCHUHMACHER 2011, KURBEL 2016). Sie übernehmen Aufgaben und Funktionen der PPS, leiten Software-Prozesse ein und verwalten die erforderlichen Daten. Die Auftragsplanung nutzt zur Lösung von unterschiedlichen Entscheidungsproblemen u. a. modellbasierte Lösungsverfahren, welche im folgenden Abschnitt erläutert werden.

2.2.7 Lösungsverfahren für Entscheidungsmodelle im Kontext der Auftragsplanung

PPS-Systeme bilden den Aufbau und den Ablauf eines Produktionssystems in unterschiedlichen Modellformen ab. Die Modelle beschreiben durch Reduktion (Verzicht auf unwichtige Eigenschaften) sowie Idealisierung (Vereinfachung unverzichtbarer Eigenschaften) die Wirkzusammenhänge der realen Produktionsumgebung (das sog. Realmodell) (BAETGE 1974, WIENDAHL 2011).

Neben der besseren Verständlichkeit können mithilfe von Modellen auch Entscheidungen auf Basis unterschiedlicher Modellierungsansätze und -szenarien getroffen werden. Grundsätzlich ist zwischen Beschreibungs-, Wirk- und Entscheidungsmodellen zu unterscheiden (ADAM & WITTE 1976, RIEPER 1992, WIENDAHL 2011). Speziell dienen Entscheidungsmodelle zur Bestimmung optimaler Handlungsmöglichkeiten. Hierzu werden die Wirkzusammenhänge abgebildet und an Zielfunktionen (z. B. geringen Herstellungskosten) ausgerichtet. Die Ergebnisse gelangen anhand der Zielstellung zur Bewertung und bieten im Idealfall eine Auswahl an Handlungsalternativen, um eine wirtschaftliche und umsetzbare Lösung zu ermitteln (WIENDAHL 2011).

Für die Berechnung von Losgrößen, Terminen und Kapazitäten sowie Reihenfolgen bieten sich der Auftragsplanung unterschiedliche Verfahren an. Neben einer erfahrungsbasierten Produktionsplanung bietet der Einsatz von mathematischen Lösungsverfahren eine Möglichkeit, komplexe Wirkzusammenhänge in einem Entscheidungsmodell abzubilden. Dabei befindet sich bei produktionsbezogenen Entscheidungsmodellen eine wirtschaftliche Ressourcenbelegung im Vordergrund. Im Bereich der mathematischen Lösungsverfahren stehen in Anlehnung an EVERS (2002) künstliche Intelligenz, exakte Verfahren und Heuristiken als drei Grundtypen der Ressourcenbelegung zur Verfügung (vgl. Abbildung 13).

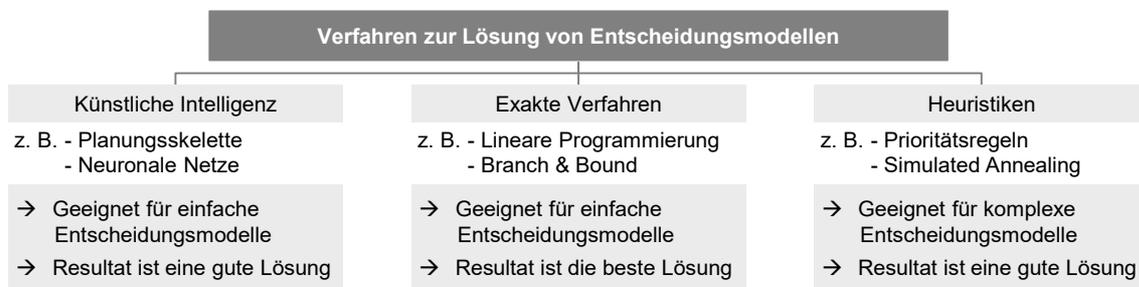


Abbildung 13: Verfahren zur Lösung von der Ressourcenbelegung

Verfahren der *künstlichen Intelligenz* sind bestrebt, das Entscheidungsverhalten des Menschen zu simulieren (FISCHER 1999). Ein Kritikpunkt bezieht sich jedoch auf die fehlende Möglichkeit der Beeinflussung des Planungsprozesses durch manuelle Vorgaben oder Änderungen des Benutzers, da es sich bei diesem Lösungsverfahren um ein in sich geschlossenes System handelt. Im weiteren Verlauf der Arbeit findet die künstliche Intelligenz keine weitere Berücksichtigung.

Exakte Verfahren und Heuristiken lassen sich der wissenschaftlichen Disziplin des *Operations Research* (OR) zuordnen. Das OR versucht, komplexe Entscheidungsprobleme mithilfe von mathematischen Methoden zu lösen. Zunächst wird ein Optimierungsmodell formuliert und im Anschluss berechnet ein Algorithmus die bestmögliche Lösung (DOMSCHKE & DREXL 2007). *Exakte Lösungsverfahren* garantieren, dass für ein lösbares Entscheidungsproblem das Optimum errechnet wird. Varianten sind die lineare Programmierung, Entscheidungsbaumverfahren (z. B. Branch & Bound) sowie Schnittebenenverfahren (DOMSCHKE & DREXL 2007).

Die Reihenfolgeplanung bzw. Maschinenbelegung stellt ein schwer lösbares Optimierungsproblem dar. *Heuristische Lösungsverfahren* erscheinen hier sinnvoll, da diese das Entscheidungsproblem in annehmbaren Berechnungszeiten zwar möglicherweise nicht optimal, aber gut lösen (NEUMANN & MORLOCK 2002). Die Verfahren gelangen zur Anwendung, wenn exakte Lösungsverfahren aufgrund des zu hohen Rechenaufwands bei praxisnahen Problemen nicht herangezogen werden können (ELLINGER ET AL. 2001). Varianten der Heuristiken unterteilen sich in Eröffnungsverfahren (Bestimmung einer ersten zulässigen Lösung), lokale Suchverfahren (Verbesserung einer bestehenden Lösung), relaxationsbasierte Verfahren (Erzeugung lokaler Schranken) und unvollständig ausgeführte Optimierungsverfahren (DOMSCHKE & SCHOLL 2007). Für weiterführende Erläuterungen sei an dieser Stelle auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen (z. B. DOMSCHKE & DREXL 2007, ZÄPFEL ET AL. 2010).

Nachdem die Auftragsplanung im operativen Produktionsmanagement eingeordnet ist, wird im Folgenden die Ressource Energie in Bezug auf das Bestandsmanagement definiert und beschrieben.

2.3 Energiebezugsoptionen produzierender Unternehmen

2.3.1 Allgemeines

Einem Industrieunternehmen stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, den Energiebedarf eines Produktionsstandortes zu decken. Wichtigster Energieträger für produzierende Betriebe ist die Elektrizität. Strom kann sowohl am Strommarkt *beschafft* als auch am Standort *erzeugt* werden. Im Gegensatz dazu werden Kraftstoffe und Gase im Regelfall am jeweiligen Markt bezogen (GÖTZE & ROTHER 2013, WÜRFEL ET AL. 2017). In der Produktion werden unterschiedliche Energieformen, z. B. Elektrizität, Wärme oder Druckluft, benötigt (SCHIEFERDECKER 2006, HESSELBACH 2012). Diese Einsatzfaktoren werden zur Realisierung einer Produktionsaufgabe energetisch in den Produktionsanlagen gewandelt (MÜLLER & PONICK 2014). Wird von einer zeitkonstanten elektrischen Spannung und Stromstärke ausgegangen, so lassen sich elektrische Energie (E) und Leistung (P) mit den vereinfachten Formeln (2.1) und (2.2) berechnen (MESCHÉDE 2015).

$$P = U * I \quad (2.1)$$

$$E = P * \Delta t \quad (2.2)$$

mit

P : Leistung in Watt

U : Spannung in Volt

I : Stromstärke in Ampere

E : Energie in Wattsekunden

t : Zeit in Sekunden

E beschreibt die Menge elektrischer Arbeit, welche in einem System gewandelt bzw. durch ein System in Abhängigkeit von der Zeit verrichtet wird. Entscheidend hierfür ist P als erforderliche elektrische Leistung, welche zum Zeitpunkt der Umwandlung bzw. Verrichtung zur Verfügung stehen muss. In vorliegender Arbeit wird E als *Mengeneinheit* und P (im Speziellen die Wirkleistung) als *Leistungseinheit* verstanden. Abbildung 14 zeigt ein Strukturierungsschema für die Beschreibung des Energiebezugs, welches die Optionen nach Herkunft in Bezugsarten, nach Charakteristik in Klassen und nach Spezifikation in Merkmale gliedert.

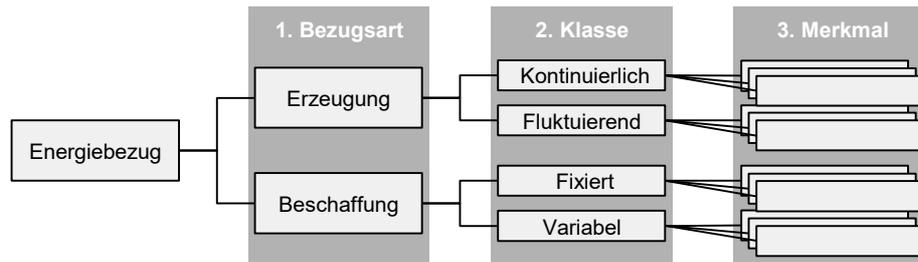


Abbildung 14: Differenzierung der Energiebezugsoptionen

Grundsätzlich ist zwischen der *Energiebeschaffung* und der *Energieerzeugung* zu unterscheiden (Abschnitt 2.3.2). Im Weiteren werden die unterschiedlichen Optionen des Strombezugs klassifiziert sowie anhand ihrer Merkmale beschrieben. Abschnitt 2.3.2 führt allgemeine Definitionen im Kontext des Energiebezugs ein. Abschnitte 2.3.3. und 2.3.4 erläutern Erzeugungs- und Beschaffungsoptionen von elektrischer Energie im Produktionsumfeld. Abschnitt 2.3.5 fasst die Energiebezugsoptionen zusammen und verbindet diese mit Möglichkeiten einer elektrischen Lastanpassung.

2.3.2 Definitionen

Einführend werden für diesen Abschnitt die Begrifflichkeiten *Energieträger*, *Energieerzeugung* und *Energiebeschaffung* definiert.

Energieträger umfassen natürlich auftretende Elemente, deren Energiegehalt für Energieumwandlungsprozesse nutzbar ist. Dies umfasst fossile Elemente, wie Kohle, Erdöl und Erdgas, nukleare Elemente, wie Uran, sowie regenerative Elemente, bspw. Holz, solare Strahlung, Windkraft und Biomasse (SCHWAB 2012). Da sie in natürlicher Form auftreten, werden sie auch als *Roh- oder Primärenergieträger* bezeichnet. Sofern die Elemente in eine andere Energieform umgewandelt werden, wird das Produkt der Umwandlung, z. B. Strom oder Diesel, *Sekundärenergieträger* bezeichnet (SCHWAB 2012).

Wird elektrische Energie an einem Fabrikstandort generiert bzw. umwandelt, so wird dieser Vorgang als *Energie- bzw. Stromerzeugung* bezeichnet. Die Erzeugung wird durch unternehmenseigene Energieumwandlungsanlagen (z. B. eine Gasturbine) realisiert, welche abgeschlossene technische Systeme darstellen. Dabei ist zwischen Eigenverbrauchs- und Einspeiseanlagen zu differenzieren. Beim Eigenverbrauch wird die elektrische Energie unmittelbar im Produktionsumfeld genutzt (BARDT ET AL. 2014). Bei der Einspeisung wird der generierte Strom hingegen dem

öffentlichen Stromsystem, bspw. über eine Direktvermarktung an der Strombörse, zur Verfügung gestellt (HEUCK ET AL. 2007, MÜLLER ET AL. 2009).

Die *Energiebeschaffung* beschreibt den betrieblichen Aufgabenbereich, um den Energiebedarf eines Standortes mithilfe von externen Bezugsquellen sicherzustellen (KONSTANTIN 2013, SCHUHMACHER & WÜRFEL 2015). Typischerweise geschieht dies durch den Einkauf von spezifischen Energiemengen, bspw. Brennstofflieferungen, oder durch vertragliche Regelungen zur Nutzung privatwirtschaftlicher Systeme, wie z. B. das Stromsystem. Daraus resultieren in Abhängigkeit der Bezugsart verschiedene rechtliche Beziehungen (z. B. Stromliefervertrag) mit dem Energieversorgungsunternehmen (EVU). Diese Begriffe bilden die Basis für die weiteren Erläuterungen zu den unterschiedlichen Möglichkeiten der innerbetrieblichen Stromerzeugung und -beschaffung.

2.3.3 Optionen der Stromerzeugung

Industrieunternehmen verfügen über eine große Auswahl an Möglichkeiten der Eigenenerzeugung von Strom. Im Folgenden werden unterschiedliche Stromerzeugungsanlagen erläutert sowie anhand ihrer charakteristischen Merkmale klassifiziert. Während in der Literatur im Allgemeinen zwischen fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugung unterschieden wird (KAUSCH ET AL. 2011), soll im Rahmen dieser Arbeit eine Unterteilung unter dem Aspekt der Kontinuität der Stromerzeugung stattfinden. Da die Gleichmäßigkeit der Energiebereitstellung einen starken Einfluss auf die Energieverfügbarkeit nimmt, wird nachfolgend zwischen *kontinuierlichen* und *fluktuierenden* Erzeugungsanlagen differenziert.

2.3.3.1 Kontinuierliche Stromerzeugungsanlagen

Kontinuierliche Erzeugungsanlagen generieren weitestgehend gleichmäßig Energie, da sie Energieträger verwenden, die dauerhaft und in ihrer Menge stetig zur Verfügung stehen. Sie sind konstant vorhanden, da sie entweder in einem Tank gespeichert werden können (z. B. Diesel) oder ihre Lieferung vertraglich gesichert ist (z. B. Gas). Tabelle 1 zeigt einen Überblick über die verschiedenen Anlagentypen, die sich als kontinuierliche Erzeugungsanlagen klassifizieren lassen.

Tabelle 1: Beispiele für kontinuierliche Stromerzeugungsanlagen im Fabrikumfeld

Klasse	Fossile Energieträger	Erneuerbare Energieträger
Kontinuierliche Erzeugungsanlagen	<ul style="list-style-type: none"> • BHKW, betrieben mit fossilen Kraftstoffen • Gaskraftwerk • Kohlekraftwerk 	<ul style="list-style-type: none"> • BHKW, betrieben mit regenerativen Kraftstoffen • Biogaskraftwerk • Biomassekraftwerk • Wasserkraftwerk

Durch Zuführung entsprechender gespeicherter oder gelieferter Brennstoff- bzw. Energieträgermengen ist die Erzeugung in definierten technischen Bereichen steuerbar, wodurch sich eine kontinuierliche Grundversorgung sicherstellen lässt (PELTE 2010). Ein Großteil der für den industriellen Betrieb relevanten Kraftwerkstypen lässt sich unter dem Namen *Blockheizkraftwerk* (BHKW) zusammenfassen. Diese Typen greifen sowohl auf fossile (z. B. Erdgas) als auch auf regenerative (z. B. Biomasse) Energieträger zurück und sind folglich keinem der beiden Trägerformen eindeutig zuzuordnen (SCHMITZ & SCHAUMANN 2010). Überdies spielen bei der Eigenstromerzeugung im industriellen Umfeld ebenso Gas- und Kohlekraftwerke eine Rolle. Neben fossilen Brennstoffen kommen hier zusätzlich erneuerbare Energieträger, wie Biomasse oder Biogas, zum Einsatz (RIEDLE 2017), sind jedoch ähnlich wie Wasserkraftwerke selten anzutreffen (LEPRICH ET AL. 2005). Kleinwasserkraftanlagen bieten eine weitere Möglichkeit zur Eigenversorgung eines Fabrikstandortes und können bei Bedarf angepasst werden. Unter den kontinuierlichen Kraftwerken nehmen sie eine Sonderstellung ein, da der verwendete Energieträger Wasser kostenfrei erhältlich ist. Nutzungseinschränkungen stellen jedoch die geografische Lage des Fabrikstandortes sowie Umweltrestriktionen dar (THÜRMER & KOHOUT 2010). Kern- und Speicherkraftwerke sind im Kontext der Energieerzeugung am Fabrikstandort nicht von Belang. Zusammenfassend gewährleisten die in diesem Abschnitt behandelten Energieerzeugungsanlagen aufgrund ihrer kontinuierlichen Leistungsbereitstellung eine geeignete Basis für die gleichmäßige bedarfsgerechte Eigenversorgung eines Fabrikstandortes.

Da die kontinuierliche Erzeugung von Energie i. d. R. mit laufenden Kraftstoffkosten verbunden ist, setzen viele Unternehmen zunehmend auf Eigenerzeugung mithilfe regenerativer Energieträger, welche unbegrenzt und nahezu kostenfrei zur Verfügung stehen (WIRTH 2016). Mit Ausnahme der Wasserkraft sind diese Energieträger allerdings nicht kontinuierlich, sondern fluktuierend vorhanden.

2.3.3.2 Fluktuierende Stromerzeugungsanlagen

Mit *fluktuierenden* Kraftwerken ist keine permanente und gesicherte Energieversorgung realisierbar, da die verwendeten Energieträger nicht konstant zur Verfügung stehen. Tabelle 2 zeigt die verschiedenen Kraftwerkstypen, welche sich den fluktuierenden Kraftwerken zuordnen lassen.

Tabelle 2: Beispiele für fluktuierende Stromerzeugungsanlagen im Fabrikumfeld

Klasse	Fossile Energieträger	Erneuerbare Energieträger
Fluktuierende Erzeugungsanlagen		<ul style="list-style-type: none">• Photovoltaikanlagen• Windkraftanlagen

Bei den beiden wichtigsten Vertreter fluktuierender Stromerzeugungsanlagen handelt es sich um Photovoltaik- (PVA) und Windkraftanlagen (WKA) (BOLAY ET AL. 2014). Durch PVA wird die Sonnenstrahlung über den photoelektrischen Effekt in elektrische Energie umgewandelt. Diese kann direkt im Fabrikumfeld genutzt werden, um einen Teil des Strombedarfs zu decken (BOLLIN 2015). PVA zählen zu den fluktuierenden Erzeugungsanlagen, da ihre Leistung von der Intensität der Solarstrahlung abhängt, welche wiederum saison-, zeit- und wetterabhängig variiert. Die Zuführung des Energieträgers ist folglich nicht steuerbar, wodurch auch die erzeugte Energiemenge lediglich bedingt beeinflusst werden kann (STAIß 1996). Des Weiteren ist die Energieerzeugung nur insofern planbar, als dass sich auf Wettervorhersagen basierende Stromertragsprognosen aufstellen lassen, welche eine Abschätzung auf den zeitlichen Verlauf der Energieerzeugung ermöglichen (BEYER ET AL. 2014). Eine weitere Form der fluktuierenden Erzeugungsanlagen sind WKA. Auch sie weisen aufgrund der standortspezifischen Witterungsbedingungen eine ungleichmäßige Betriebscharakteristik auf. Infolgedessen sind WKA nicht steuerbar und nur begrenzt planbar, da ebenfalls ein Rückgriff auf Stromertragsprognosen, die auf Wetterprognosen basieren, erfolgen muss (HAU 2014).

Anzumerken ist, dass trotz des Nachteils hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Leistungsbereitstellung fluktuierende Kraftwerke bei der Eigenversorgung von Unternehmen zunehmend an Bedeutung gewinnen (GÖTZE & ROTHER 2013, BOLAY ET AL. 2014, vgl. Abschnitt 1.1.2.2)

2.3.3.3 Einordnung und Bewertung der Erzeugungsoptionen

Wie in den vorangegangenen Abschnitten dargelegt, kann die innerbetriebliche Stromerzeugung einerseits in kontinuierlich sowie andererseits in fluktuierend gegliedert werden. Die größten Herausforderungen der internen Bezugsoptionen beziehen sich auf die auftretenden zeitlichen Abweichungen zwischen Energieangebot und -bedarf sowie die Anforderung, diese stabil in die Strombreitstellung zu überführen. Abbildung 15 fasst die Stromerzeugungsoptionen einer Fabrik zusammen.

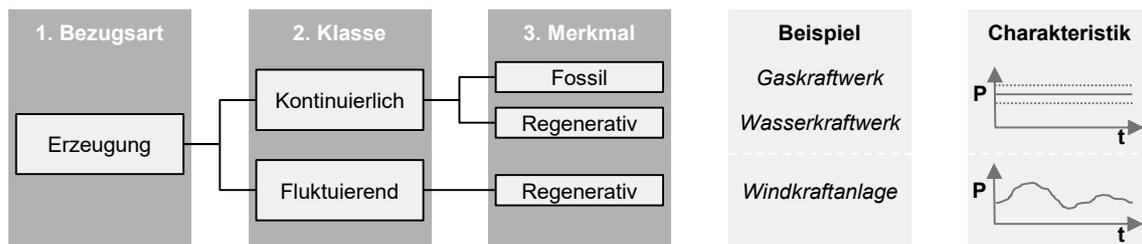


Abbildung 15: Einordnung der Stromerzeugungsoptionen einer Fabrik

Da Unternehmen lediglich in Ausnahmefällen eine vollständige Eigenversorgung betreiben, ist ein Anschluss an das öffentliche Stromnetz nach wie vor notwendig, um Engpässe mithilfe einer zusätzlichen Beschaffung von Energie zu verhindern (GÖTZE & ROTHER 2013). Hierzu werden unterschiedliche innerbetriebliche Optionen der Strombeschaffung genutzt, welche nachfolgend zur Darstellung gelangen.

2.3.4 Optionen der Strombeschaffung

Neben der Möglichkeit, Energie am Standort selbst zu erzeugen, können Unternehmen ebenfalls auf privatwirtschaftliche Beschaffungsoptionen zurückgreifen. Dabei lassen sich im Regelfall drei unterschiedliche Beschaffungsarten identifizieren, über welche Unternehmen selbst oder durch Dritte eine Deckung benötigter Energiemengen erzielen:

- die *Stromversorgung* (z. B. durch ein EVU),
- der *Stromhandel* (z. B. durch Teilnahme an der Strombörse) und
- die Nutzung bzw. das Angebot von *Systemdienstleistungen* (z. B. das Angebot von Regelleistung).

Im Folgenden werden die Möglichkeiten unter dem Aspekt der Verfügbarkeit der Preis- bzw. Abrufinformation beschrieben und bewertet. Dabei wird zwischen langfristigen bzw. *fixierten* und kurzfristigen bzw. *variablen* Strompreisen sowie zufälligen bzw. *stochastischen* Abrufen differenziert.

2.3.4.1 Stromversorgung

Die *Stromversorgung* bezeichnet eine Energiebezugsoption, welche üblicherweise mit einem EVU durch einen Stromliefervertrag abgewickelt wird (KONSTANTIN 2013). Relevant sind diesbezüglich der Strompreis sowie die Charakteristik der Preisstufen. Tabelle 3 zeigt Beispiele für Stromversorgungsmodelle im industriellen Umfeld. Die am weitesten verbreitete Art der Stromversorgung stellt die sog. *Vollstromversorgung* bzw. Stichtagsbeschaffung dar, welche die Beschaffung der gesamten Menge an einem Tag für eine definierte Laufzeit (z. B. ein Jahr) festlegt (GÖTZE & ROTHER 2013, SCHUMACHER & WÜRFEL 2015).

Tabelle 3: Beispiele für Stromversorgungsmodelle von Industrieunternehmen

Klasse	Eine Preisstufe	Mehrere Preisstufen
Fixierter Strompreis	<ul style="list-style-type: none"> • Vollstromversorgung 	<ul style="list-style-type: none"> • Time-of-Use-Tarife
Variabler Strompreis		<ul style="list-style-type: none"> • Critical-Peak-Pricing • Real-Time-Pricing • Tranchenbeschaffung

Dem Unternehmen wird somit ein Komplettstrompreis je bezogener Einheit für eine Periode in Rechnung gestellt. Dies ist eine fixierte Preisinformation, die sich aus unterschiedlichen vorab vereinbarten Preisbestandteilen zusammensetzt. Im Speziellen handelt es sich dabei um den Grund-, Arbeits- und Leistungspreis, welche meist staatliche Abgaben und Steuern sowie Netznutzungsentgelte enthalten (KONSTANTIN 2013, SCHUHMACHER & WÜRFEL 2015).

Eine Variante der Vollstromversorgung ist die Abstufung des Arbeitspreises, bspw. nach der Tageszeit, in Form von *Time-of-Use-Tarifen*. Da die Staffelungen für die Laufzeit zuvor vereinbart werden, ergibt sich eine fixierte Preisinformation (SAINI 2004, DOE 2006, NABE ET AL. 2009). Eine Preisstaffelung tritt in einigen Versorgungsmodellen auch kurzfristig bzw. variabel in Form eines *Critical-Peak-Pricings* oder eines indexorientierten Tarifs auf (NABE ET AL. 2009, FARUQUI ET AL. 2009). Beim Critical-Peak-Pricing werden verschiedene untertägige Preisabstufungen mit einem festgelegten Anteil in einer Periode vereinbart (z. B. 10 % Höchst-, 30 % Hoch-, 40 % Normal- und 20 % Niedrigpreisniveau). Im Gegensatz zu den Time-of-Use-Tarifen, werden die Zeitintervalle der untertägigen Abstufungen nicht vorab bestimmt, sondern durch das EVU kurzfristig im Vorfeld entschieden (z. B. einen Tag zuvor) in Abhängigkeit von den aktuellen Börsenstrompreisen bzw. der Netz-

auslastung (FARUQUI & SERGICI 2013). Aufgrund der kurzfristigen Bekanntgabe handelt es sich um einen variablen Preis.

Eine weitere Variante stellt die *indexorientierte Beschaffung* dar, bei welcher das EVU den Strompreis anhand eines festgelegten Index (z. B. den Börsenstrompreis) automatisch mit dem Unternehmen abrechnet. Der Stromlieferpreis ergibt sich aus einem mengengewichteten Mittelwert der Handelspreise des EVUs an der Strombörse zzgl. einer Marge und den zu entrichtenden Steuern, Abgaben und Entgelten (SCHUHMACHER & WÜRFEL 2015). Diese Variante ist auch als sog. *Real-Time-Pricing* bekannt (SAINI 2004, NABE ET AL. 2009, ROON & GROBMAIER 2010).

Sollte die Beschaffung mit dem EVU flexibel unterjährig und nicht an einem Stichtag stattfinden, so wird dies als sog. *Tranchenbeschaffung* bezeichnet. Hier wird die Strombeschaffung an der Börse allerdings nicht an zuvor festgelegten Zeitpunkten automatisiert ausgeführt, sondern flexibel durch einen Energieeinkäufer vorgenommen. Dieser legt die Beschaffungszeitpunkte von Tranchen, d. h. Stromteilmengen einer Periode, in Abhängigkeit der Marktpreisentwicklung zusammen mit dem EVU fest (KONSTANTIN 2013, SCHUHMACHER & WÜRFEL 2015).

Die fixierten Varianten der Stromversorgung regen eine effiziente Nutzung von Energie an, da sich aufgrund der Reduktion der Abnahmemenge und der Spitzenlast Kostenvorteile erzielen lassen. Variable Beschaffungsmodelle motivieren hingegen, neben der effizienten Nutzung, auch einen flexiblen Einsatz. Hier besteht das Potenzial, durch kurzfristig veränderte Preisinformationen Kostenvorteile zu erzielen. Neben den geringen Aufwänden und kalkulierbaren Energiepreisen besteht ein Hauptvorteil bei der Nutzung einer Stromversorgung darin, dass das Volumen- und Fahrplanrisiko durch das EVU übernommen wird (SCHUMACHER & WÜRFEL 2015).

Das Volumenrisiko beschreibt die Gefahr, welche durch eine Fehlbeschaffung im Bilanzkreis (vgl. Abschnitt 1.1.2.2) auftreten kann. Da zwingend zu jedem Zeitpunkt ein Gleichgewicht zwischen beschaffter sowie benötigter Energiemenge (dem sog. Fahrplan) herrschen muss, stellt das Fahrplanrisiko die Abweichungen zwischen geplanter und realer Stromabnahme dar. Bei einer Abweichung ist die sog. *Ausgleichsenergie* (REGELLEISTUNG 2016B) notwendig, um Differenzen im Bilanzkreis zu korrigieren. Dieser Ausgleichspreis ist unbekannt und stellt damit ein finanzielles Risiko dar (REGELLEISTUNG 2016B). Dennoch nutzen Unternehmen die Möglichkeit, selbst an den unterschiedlichen Strommärkten zu handeln, um weitere Kostenvorteile zu generieren.

2.3.4.2 Handel am Strommarkt

Der *Stromhandel* wird in Unternehmen mit einem sog. *Portfoliomanagement* betrieben (GÖTZE & ROTHER 2013, SCHUHMACHER & WÜRFEL 2015). Ziel ist es, den Energiebedarf einer Produktion zwischen den unterschiedlichen Handelsmöglichkeiten und -produkten des Strommarktes kostenoptimal zu decken. Ähnlich zur Stromversorgung, ist hier zwischen fixierten und variablen Strompreisen sowie zwischen dem öffentlichen und dem bilateralen Handel zu unterscheiden (KONSTANTIN 2013). Tabelle 4 fasst Beispiele für Stromhandelsmodelle zusammen.

Tabelle 4: Beispiele des Stromhandels von Industrieunternehmen

Klasse	Öffentlicher Handel	OTC-Handel
Fixierter Strompreis	<ul style="list-style-type: none"> • Terminmarkt 	<ul style="list-style-type: none"> • Langfristiger Kontrakt
Variabler Strompreis	<ul style="list-style-type: none"> • Day-ahead-Markt • Intraday-Markt 	<ul style="list-style-type: none"> • Kurzfristiger Kontrakt

Diese strukturierte unternehmensinterne Beschaffung erweist sich als aufwendiger als die konventionelle Stromversorgung, da der Energiebedarf (bzw. Lastgang oder Fahrplan) des Unternehmens detailliert zu prognostizieren ist (GÖTZE & ROTHER 2013, SCHUHMACHER & WÜRFEL 2015). Ausschließlich bei genauer Kenntnis des zukünftigen Strombedarfs können an der Strombörse gehandelte Produkte für eine optimale Deckung geordert werden. Hier gilt es, ein zu hohes Risiko von Abweichungen zu minimieren, welche den Bezug von Ausgleichsenergie und ggf. Schaden an der technischen Infrastruktur im Unternehmen verursachen.

Grundsätzlich kann zwischen dem *öffentlichen Stromhandel* über die unterschiedlichen Börsen (z. B. der European-Energy-Exchange) und dem bilateralen Handel dem sog. *Over-the-Counter (OTC)* Handel differenziert werden.

Der öffentliche Handel unterteilt sich in einen Terminmarkt, auf welchem langfristige Strommarktprodukte gehandelt werden, und zwei Spotmärkte, auf welchen kurzfristige Strommarktprodukte vermarktet werden. Allen Märkten sind der eingeschränkte Zugang, welcher bspw. nur mit einer Händlerlizenz möglich ist, sowie die gehandelten Mindestvolumina (z.B. eine MWh) gemein (KONSTANTIN 2013).

Der Terminmarkt unterscheidet zwischen sog. Base- und Peak-Produkten, welche beide mindestens einen Monat im Voraus gehandelt werden (SCHUHMACHER & WÜRFEL 2015). Das Base-Produkt beschreibt eine konstante Abnahme einer Leistungshöhe (z. B. ein MW) über den gesamten Tag. Peak-Produkte zeigen ebenfalls

eine konstante Abnahme einer Leistungshöhe an, jedoch in einem bestimmten Zeitintervall (bspw. von 08:00 bis 20:00 Uhr) (KONSTANTIN 2013). Somit lassen der Terminmarkt und dessen Produkte (z.B. Phelix-Base) aufgrund dieser Eigenschaften als Beschaffung mit fixierten Preisinformationen charakterisieren.

Eine bedarfsgerechte Zusammenstellung des Energiebedarfs ist mithilfe der Spotmärkte möglich, da hier mit kleineren Energiemengen und kleineren Zeitrastern gehandelt werden kann (KONSTANTIN 2013). Am sog. *Day-ahead-Markt* werden stundenfeine Strommarktprodukte bis zu einem Tag vor Leistungsabruf gehandelt. Der sog. *Intraday-Markt* ermöglicht einen Handel bis zu 30 Minuten vor Leistungsabruf (SCHUHMACHER & WÜRFEL 2015). Somit lassen sich durch diese Märkte kurzfristige Preisschwankungen nutzen. Neben den Beschaffungspreisen werden zudem staatliche Abgaben und Steuern sowie Netznutzungsentgelte fällig, welche z.B. an den Staat abzuführen sind.

Gleiches gilt für den sog. *OTC-Handel*, welcher außerbörslich gehandelte Strommarktprodukte zum Gegenstand hat. Im Rahmen dieser Transaktionen werden *langfristige* (z. B. einen Monat im Voraus) oder *kurzfristige Kontrakte* (z. B. 15 Minuten vor Lieferung) zwischen einem Energieerzeuger und einem Unternehmen bilateral geschlossen. Dabei orientiert sich die Preisbildung meist an der Strombörse, es sind allerdings auch Abweichungen möglich (MAUBACH 2013, SCHUHMACHER & WÜRFEL 2015). Sobald sich ein Unternehmen am Stromhandel beteiligt, ist es bestrebt, die Ressource *Energie* möglichst effizient und flexibel einzusetzen, da von den Preisschwankungen an den Märkten wirtschaftlich profitiert werden kann (WÜRFEL & KUNZELMANN 2014).

2.3.4.3 Einordnung und Bewertung der Beschaffungsoptionen

Die innerbetriebliche Strombeschaffung lässt sich in fixierte und variable Optionen gliedern. Eine Herausforderung für die Unternehmen stellt das Abwägen zwischen einer Stromversorgung mit geringem finanziellen Risiko und der Beteiligung am Stromhandel mit den damit verbundenen Kostenvorteilen dar. Abbildung 16 fasst die innerbetrieblichen Optionen zur Strombeschaffung zusammen.

Zusätzlich zur konventionellen Beschaffung können Unternehmen auch Systemdienstleistungen anbieten. Diese werden im Bedarfsfall durch den Stromnetzbetreiber abgerufen.

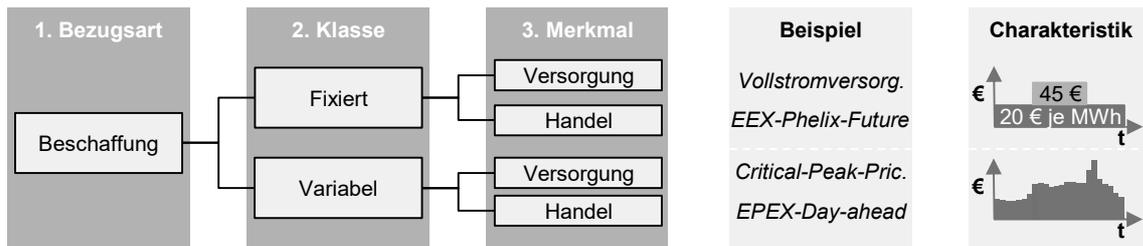


Abbildung 16: Einordnung der Strombeschaffungsoptionen von Fabriken

2.3.4.4 Stromnetzdienliche Systemdienstleistungen

Systemdienstleistungen beschreiben im Kontext des Energiebezugs von Unternehmen ein netzdienliches Stromabnahmeverhalten oder das Angebot von Ausgleichsenergie. Ziel ist, die Balance zwischen Stromerzeugung und -abnahme in einem Bilanzkreis bzw. im Übertragungsnetz zu erhalten. Das unternehmensseitige Angebot wird ebenfalls als *Regelleistung* bezeichnet (REGELLEISTUNG 2016C). Dabei kann zwischen der positiven und der negativen Regelleistung unterschieden werden. Die positive Regelleistung stellt eine Steigerung der Einspeisung bzw. eine Reduktion der Nachfrage dar, während die negative Regelleistung eine Reduktion der Einspeisung bzw. eine Erhöhung der Nachfrage beschreibt (BNETZA 2013). Alternativ dazu ist z.B. das sog. *Demand Bidding* die Vermarktung flexibler, zuschaltbarer Lasten auf der Strombörse (DOE 2006, VON ROON & GROBMAIER 2010).

Neben der Art der Regelleistung lässt sich auch zwischen den zeitlichen Dimensionen von Angebotsstellung, Aktivierung und Bereitstellung differenzieren. Als Beispiel ist hier der deutsche Tertiärregelmarkt zu erwähnen, bei welchem einen Tag vorab ein Regelleistungsangebot anzubieten ist. Dieses ist bei einem möglichen Abruf innerhalb von 15 Minuten bereitzustellen sowie für maximal vier Stunden zu erbringen (REGELLEISTUNG 2016D). Abbildung 17 zeigt schematisch die Systemdienstleistungen als stochastische Beschaffungsoption einer Fabrik.

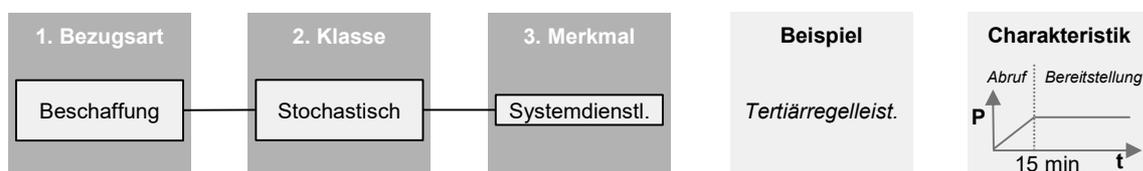


Abbildung 17: Einordnung der Systemdienstleistungen einer Fabrik

Insbesondere für Unternehmen ist die negative Regelleistung von Relevanz, da hier gegen Entgelt überschüssige Energiemengen in industrielle Wertschöpfung überführt werden können. Neben den Regelleistungsmärkten ist es Unternehmen zudem

möglich, sich als Anbieter von abschaltbaren Lasten (bzw. load-control) für Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der Netz- und Systemsicherheit vertraglich zu verpflichten (BNETZA 2016B). Da der Abruf der Systemdienstleistungen ungeplant und unmittelbar (z. B. bei der Regelleistung) auftritt, die Angebotsabgabe jedoch vorab vollzogen wird, stellt diese Form der Energiebeschaffung eine Herausforderung für das Produktionsmanagement dar. Für den Fall einer Angebotsabgabe muss dies in der Planung Berücksichtigung finden, sofern Produktionsanlagen betroffen sind. Diese Optionen werden jedoch im weiteren Verlauf nicht betrachtet, da die Umsetzung bzw. Durchführung der Maßnahmen im Rahmen dieser Arbeit die Produktionssteuerung verantwortet.

2.3.5 Zusammenfassung der Energiebezugsoptionen

Um den standortspezifischen Energiebedarf zu decken, stehen einem Industrieunternehmen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen kann in Form der Bezugsart zwischen *Stromerzeugung* und *Strombeschaffung* differenziert werden, zum anderen lassen sich die unterschiedlichen Optionen anhand ihrer Charakteristik klassifizieren. Bei der Stromerzeugung wird zwischen der *kontinuierlichen* und *fluktuierenden Erzeugung* und bei der Beschaffung zwischen *fixierter, variabler Preisinformation* und einem *stochastischen Abruf* unterschieden.

Um die unterschiedlichen Eigenschaften der Energiebezugsoptionen in einem energieorientierten Produktionsmanagement zu berücksichtigen, ist es nötig die elektrische Last bzw. die elektrischen Verbraucher des Unternehmens entsprechend zu beeinflussen. Diese Lastanpassung wird allgemein unter dem Begriff des *Lastmanagements* zusammengefasst und im folgenden Abschnitt erörtert.

2.4 Elektrische Lastanpassung in der Produktion

2.4.1 Allgemeines

Das immer mehr schwankende Energieangebot im deutschen Stromsystem bedarf einer anpassungsfähigen Energienachfrage bzw. einer erhöhten Nachfrageelastizität der Industrie (BMW I 2013, KLOBASA ET AL. 2013). Produktionsunternehmen weisen das Potenzial auf, durch eine Flexibilisierung der Energienachfrage eines Produktionsstandortes einen Beitrag zur Erhöhung der verbraucherseitigen Elastizität im Stromsystem zu leisten (ROON & GROBMAIER 2010). In diesem Kontext dienen folgende Abschnitte dazu, Begrifflichkeiten der elektrischen Lastanpassung zu defi-

nieren (Abschnitt 2.4.2) und voneinander abzugrenzen sowie die Aufgaben und Funktionen eines *variablen Lastmanagements* in Bezug zur PPS in den Abschnitten 2.4.3 und 2.4.4 einzuführen.

2.4.2 Definitionen

Als Grundlage für die vorliegende Arbeit werden die Begriffe *Demand Side Management*, *Demand Response* und *Lastmanagement* definiert.

Demand Side Management wurde Mitte der 1980er-Jahre durch GELLINGS (1985) definiert und beschreibt im Allgemeinen strategische und operative Maßnahmen zur elektrischen Bedarfsanpassung von Stromkunden aller Art. Neben dem langfristigen und kurzfristigen Bedarfsverhalten umfasst dies auch die Elektrifizierung, also die Energieerzeugung des Kunden selbst (GELLINGS & CHAMERLIN 1993). Eine breitere Definition wird durch WARREN (2013) gegeben, welche neben den Maßnahmen auch Technologien (z. B. Energiespeicher) und Programme (z. B. Demand Response) umfasst, die zum Zweck der Stabilisierung oder Reduzierung des Bedarfsverhaltens eines Stromkunden dienen. Die Programme sind dabei entweder marktseitige Anreizsysteme (z. B. das Angebot von Regelleistung) oder stromsystemseitige Regulierungen. Speziell die marktseitigen Programme werden unter dem Begriff *Demand Response* zusammengefasst.

Demand Response wird von dem U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE 2006) allgemein als eine Veränderung des normalen verbraucherseitigen Stromabnahmeverhaltens auf Basis finanzieller Anreize oder regulatorischer Bestimmungen beschrieben. Als Antwort auf eine signifikante Veränderung der Strombörsenpreise oder der Netzstabilität werden Kunden (z. B. Haushalte oder Unternehmen) finanzielle Anreize in Form von kurzfristig *variablen Strompreisen* (bspw. Critical-Peak-Pricing) oder Vergütungsmöglichkeiten in Form von *Systemdienstleistungen* (bspw. Tertiärregelleistung) angeboten (ALBADI & EL-SAADANY 2008). Eine weitere Möglichkeit stellt der Einsatz geeigneter technologischer (z. B. Speicherlösungen) sowie organisatorischer (z. B. Lastmanagement) Ansätze dar.

Der Begriff *Lastmanagement* wird von TALUKDAR & GELLINGS (1987) mit unterschiedlichen operativen Maßnahmen beschrieben, welche eine kurzfristige Anpassung des elektrischen Leistungsbedarfs an ein gegebenes Angebot ermöglichen. Im industriellen Umfeld ist vor allem das sog. *Spitzenlastmanagement* im Einsatz, welches das Auftreten von kostenintensiven Lastspitzen (z. B. bei der Vollstromversorgung) verhindern soll (ROON & GROBMAIER 2010, KLOBASA ET AL. 2013). Aktuell

dienen Lastmanagementsysteme vornehmlich zur Reduktion des absoluten Leistungsbedarfs anhand eines definierten Grenzwertes. Dabei werden meist Neben- und Klimatisierungsanlagen zur Lastanpassung genutzt (KLOBASA 2007, AGRICOLA ET AL. 2010). Somit lassen sich solche Systeme im Rahmen dieser Arbeit als *fixiert* beschreiben, da sie eine schwankende Verfügbarkeit der Ressource Strom nicht berücksichtigen. Um einen flexiblen und effizienten Einsatz von elektrischer Energie in der Produktion zu ermöglichen, gilt es, *variable Lastmanagementsysteme* zur Realisierung der Strombedarfsanpassung bereitzustellen (GELLINGS 2009, PALENSKY & DIETRICH 2011). Abbildung 18 ordnet die beiden Varianten des Lastmanagements im industriellen Umfeld im Rahmen dieser Arbeit ein.

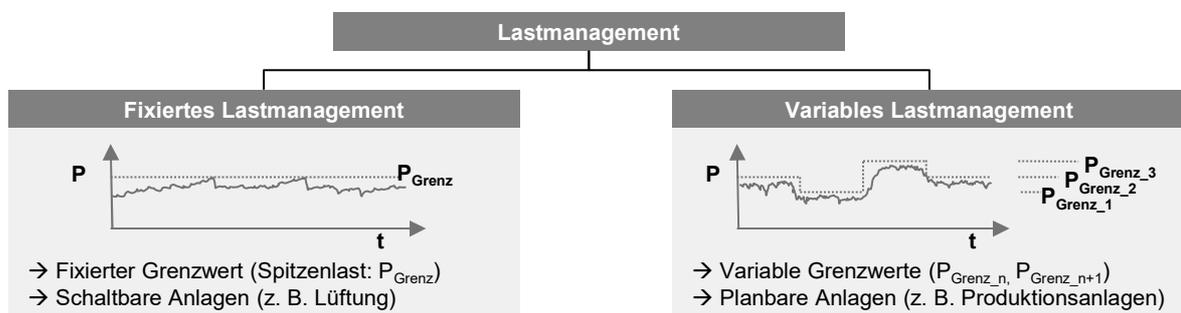


Abbildung 18: Lastmanagementsysteme im industriellen Umfeld

Variable Lastmanagementsysteme berücksichtigen verschiedene Leistungsgrenzwerte auf Basis von Verfügbarkeitsinformationen und fokussieren sich auf einen flexiblen Einsatz von planbaren Anlagen (z. B. Produktionsanlagen). Allgemein wird die Eigenschaft eines Produktionssystems, sich an ein schwankendes Energieangebot anzupassen, als *energieflexibel* definiert (GRABL 2015). Zur Umsetzung eines variablen Lastmanagements mit energieflexiblen Produktionssystemen stehen diverse Maßnahmen zur Verfügung, welche im Folgenden vorgestellt werden.

2.4.3 Elektrische Lastanpassung mit energieflexiblen Produktionssystemen

Im ersten Schritt ist zwischen allgemeinen Maßnahmen der elektrischen Lastanpassungen sowie spezifischen Maßnahmen energieflexibler Produktionssysteme zu differenzieren. Im Anschluss werden aus den vorgestellten Maßnahmen Aufgaben und Funktionen eines variablen Lastmanagements (Abschnitt 2.4.4) abgeleitet.

2.4.3.1 Allgemeine Maßnahmen der elektrischen Lastanpassung

Generell lassen sich Maßnahmen zur kurzfristigen elektrischen Lastanpassung in drei Arten unterteilen. Es wird zwischen dem sog. peak-clipping, (*Lastverzicht*), dem sog. valley-filling (*Lasterhöhung*) und dem sog. load-shifting (*Lastverschiebung* in die Zukunft) unterschieden (GELLINGS 1985). Dabei ist maßgeblich, dass bei einem Lastverzicht und einer Lasterhöhung der Energiebedarf unmittelbar verändert wird, ohne dass eine geplante Kompensation der Anpassung Berücksichtigung findet. Somit handelt es sich um ein reaktives Steuerungsverfahren, das den Bedarf einer Budget- oder Angebotssituation kurzzeitig anpasst. Die Lastverschiebung hingegen ist bestrebt, Änderungen des Energiepreises bzw. der Energieverfügbarkeit a priori und aktiv in den geplanten oder laufenden Prozess einzubinden und diese im späteren Verlauf zu kompensieren (APEL 2012, KLOBASA ET AL. 2013). Abbildung 19 demonstriert die allgemeinen Maßnahmen zur Lastanpassung.

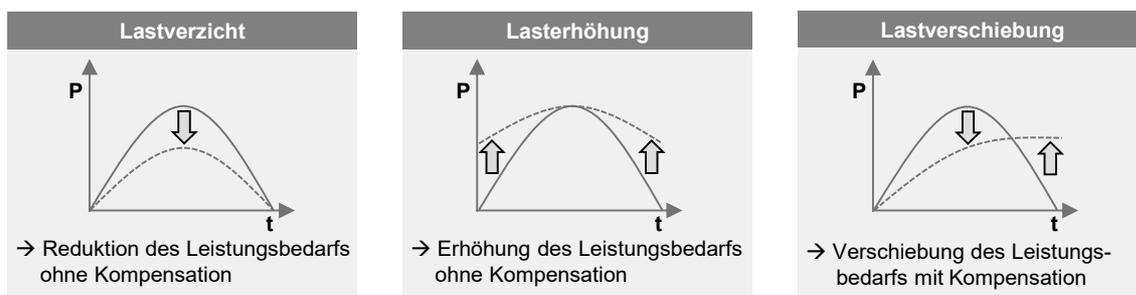


Abbildung 19: Allgemeine Maßnahmen zur elektrischen Lastanpassung

Diese allgemeinen Lastanpassungen können durch den Einsatz energieflexibler Produktionssysteme vorgenommen werden. Hierzu stehen unterschiedliche Maßnahmen zur Verfügung, welche im folgenden Abschnitt erläutert werden.

2.4.3.2 Spezifische Maßnahmen energieflexibler Produktionssysteme

Im Kontext der elektrischen Leistungs- und Energiebedarfsanpassung von Produktionssystemen beschreiben REINHART ET AL. (2012) den Begriff der *Energieflexibilität*. Diese drückt die Fähigkeit eines Produktionssystems aus, sich schnell und ohne großen finanziellen Aufwand an Veränderungen im Stromangebot anzupassen (GRABL 2015). Die Grundlage dieser Definition entstammt dem allgemeinen Flexibilitätsbegriff der Produktionstechnik (NYHUIS ET AL. 2008B). Zielsetzung ist es, die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen zu gewährleisten, indem auftretende Änderungen erkannt und Prozesse sowie Abläufe entsprechend angepasst werden (SCHUH ET AL. 2005). Diese Anpassungen sind im Rahmen von vordefinierten

Maßnahmen in einem Produktionssystem berücksichtigt (WIENDAHL & HERNÁNDEZ 2002) und lassen sich meist schnell und aufwandsarm durch das operative Produktionsmanagement umsetzen (BROWNE ET AL. 1984; NYHUIS ET AL. 2008B). In diesem Zusammenhang definieren SETHI & SETHI (1990) diverse Maßnahmen für die Anpassungsfähigkeit von Produktionsabläufen. Die Flexibilitätsarten unterteilen sich in die Mengen-, Routen-, Produkt- und Maschinenflexibilität und dienen als Grundlage zur Maßnahmenidentifikation. Zudem ist im Kontext der Energieflexibilität die Personalflexibilität als weitere Flexibilitätsart zu nennen (GRAßL 2015). Die genannten Flexibilitätsarten sind wie folgt definiert:

- *Mengenflexibilität* ist die Fähigkeit eines Produktionssystems, unterschiedliche Ausbringungsmengen wirtschaftlich herzustellen (BROWNE ET AL. 1984; SETHI & SETHI 1990).
- *Produktflexibilität* beschreibt die Fähigkeit eines Produktionssystems, verschiedene Produkte bzw. Produktvarianten zu fertigen oder ein bestehendes Produktionssystem an neue Produkte anzupassen (BROWNE ET AL. 1984).
- *Routenflexibilität* meint die Fertigung von bestimmten Produkten durch alternative Routen bzw. Maschinenstationen innerhalb des Produktionssystems (SETHI & SETHI 1990).
- *Maschinenflexibilität* ist die Fähigkeit einer Produktionsanlage, ohne großen Umrüstaufwand unterschiedliche Betriebszustände anzunehmen bzw. Fertigungsoperationen zu vollziehen (SETHI & SETHI 1990).
- *Personaleinsatzflexibilität* bezieht sich auf die Fähigkeit eines Produktionssystems, das benötigte Personal an unterschiedlichen Stationen einzusetzen sowie die Arbeitszeiten variabel zu gestalten (KOSTE & MALHOTRA 1999, GRAßL 2015).

Diese Grundflexibilitätsarten dienen als Basis für die Identifikation von Maßnahmen energieflexibler Produktionssysteme. GRAßL (2015) formuliert hierzu neun Ausprägungen in Abhängigkeit von der Zeit: die Anpassung der Schicht- und Pausenzeiten, der Auftragsreihenfolge und Maschinenbelegung, der Prozessstarts und -parameter sowie die Unterbrechung von Prozessen. Zu ergänzen ist eine Anpassung der Kapazität von Betriebsmitteln und Mitarbeitern. Die Maßnahmen im Kontext der Energieflexibilität werden wie folgt beschrieben:

- *Anpassung der Kapazität von Betriebsmitteln und Mitarbeitern* beschreibt eine Veränderung der Verfügbarkeit eines Produktionssystems. Hierzu findet ein Kapazitätseingriff bei Betriebsmitteln (z. B. durch geänderte Betriebsstunden) und bei Mitarbeitern (z. B. durch Überstunden) statt, die eine signifikante Auswirkung auf den Energiebedarf einer Produktion haben.
- *Anpassung der Schichtzeiten* resultiert in einer Verschiebung der gesamten Produktion in Zeiträume mit einem günstigen Energieangebot bspw. an Wochenenden oder Feiertagen (GRAßL 2015).
- *Anpassung der Pausenzeiten* beinhaltet eine kurzfristige Veränderung der Pausen- und Ruhezeiten von Mitarbeitern, die einen direkten Einfluss auf den Energiebedarf von Anlagen nehmen (GRAßL 2015).
- *Anpassung der Auftragsreihenfolge* beschreibt die Anpassung der Bearbeitungsreihenfolge an einer Anlage, sofern die Produkte unterschiedliche Leistungsbedarfe aufweisen (GRAßL 2015).
- *Anpassung der Maschinenbelegung* resultiert in einer veränderten Maschinenzuordnung eines Produktes, welches an alternativen Produktionsstationen hergestellt werden kann. Somit wird der Leistungs- und Energiebedarf eines Produktes durch diese Alternativen beeinflusst (GRAßL 2015).
- *Anpassung der Prozessstarts* unterteilt GRAßL (2015) in kurzfristig und mittelfristig. Eine kurzfristige Anpassung beschreibt Prozesse in kurzen Zeitraum (z. B. einer Stunde), welche vorzeitig oder verzögert gestartet werden. Die mittelfristige Anpassung meint hingegen den vorzeitigen oder verzögerten Beginn innerhalb längerer Zeiträume (z. B. eine Woche). Somit sollen Produktionskapazitäten derart genutzt werden, um Aufträge in der jeweiligen Periode nach dem gegebenen Energieangebot zu produzieren.
- *Anpassung von Prozessparametern* beschreibt die Herstellung eines Produktes durch eine Produktionsstation mit gegenüber dem Regelprozess veränderten Prozessparametern (GRAßL 2015).
- *Unterbrechung von Prozessen* bedeutet an einer Produktionsanlage das zeitweise Stoppen eines Prozesses sowie das Fortsetzen nach einer gewissen Zeitdauer (GRAßL 2015).

Als zwei weitere Maßnahmen identifiziert GRABL (2015) die *Energiespeicherung* sowie den *Wechsel der Energiequelle*. Da diese jedoch nicht direkt vom produktiven Betrieb abhängen sind, werden sie im Kontext der vorliegenden Arbeit als indirekte Maßnahmen (bzw. als Teil der Nebenanlagen) und als Form des Energiebezugs verstanden. Alle weiteren vorgestellten Maßnahmen nehmen einen direkten Einfluss auf das Leistungs- und Energiebedarfsverhalten einer Produktion. Diese gilt es nun im Folgenden, in Bezug zu den Aufgaben und Funktionen eines variablen Lastmanagements zu setzen.

2.4.4 Aufgaben und Funktionen eines variablen Lastmanagements

Ein wesentliches Ziel des variablen Lastmanagements in der Produktion ist es, Möglichkeiten und Fähigkeiten von energieflexiblen Produktionssystemen in ein Vorgehen zur mittel- und kurzfristigen Lastverschiebung zu überführen. Die Preis- und Verfügbarkeitschwankungen der Energiebezugsoptionen sind zu berücksichtigen sowie in die Produktionsabläufe zu integrieren. Die beschriebenen Maßnahmen lassen sich in unterschiedliche Funktionen überführen. Sie werden als strukturelle, koordinative und prozessuale Funktionen definiert:

- *Strukturelle Funktionen* fassen energieflexible Maßnahmen zur Anpassung von Betriebsmittel- und Mitarbeiterverfügbarkeiten zusammen. Diese beeinflussen ein Produktionssystem in seiner Ausbringungsmenge (Output) und seinem elektrischen Leistungsbedarf bzw. Energiebezug (Input). Eine Nutzung dieser Funktionen im Rahmen eines Lastmanagements ist als lang- bis mittelfristig einzuordnen, da dies eine Änderung betrieblicher Strukturen und Abläufe bedeutet.
- *Koordinative Funktionen* bezeichnen Maßnahmen eines Produktionssystems, die mehrere Stationen und Anlagen einbeziehen. Dabei werden sowohl die Anpassung der Schicht- und Pausenzeiten als auch die Änderung der Auftragsreihenfolge und der Maschinenbelegung zusammengefasst. Eine Nutzung dieser Funktionen im Rahmen eines Lastmanagements ist als mittel- bis kurzfristig einzuordnen, da sie innerhalb bestehender Abläufe eines Produktionssystems vollzogen werden.
- *Prozessuale Funktionen* umfassen jene Maßnahmen, welche sich auf einen Produktionsprozess in einer Anlage beschränken. Sie beinhalten den Start, die Anpassung und die Unterbrechung des Prozesses. Eine Nutzung dieser Funk-

tionen im Rahmen eines Lastmanagements ist als kurzfristig einzuordnen, da die Umsetzung unmittelbar an einer Anlage erfolgt.

Abbildung 20 dient als Überblick zu den Aufgaben und Funktionen eines variablen Lastmanagements im Umfeld von Produktionssystemen.

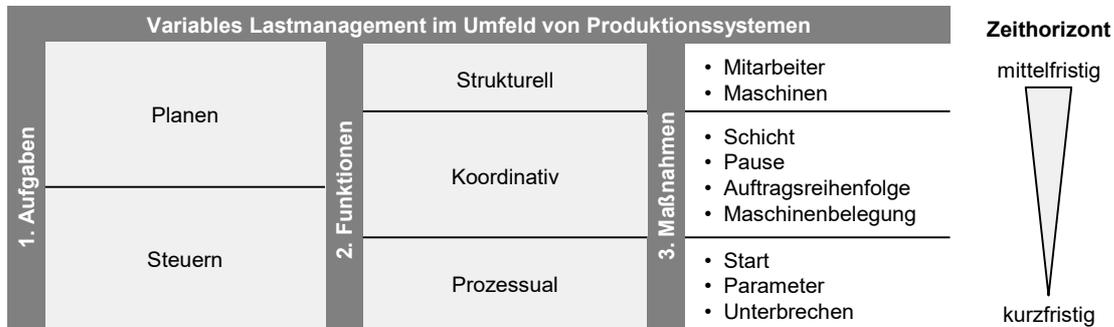


Abbildung 20: Aufgaben und Funktionen eines variablen Lastmanagements

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind die koordinativen Funktionen des variablen Lastmanagements von Bedeutung. Im Speziellen ist die Auftragsplanung im Rahmen der PPS für eine energieorientierte Anpassung der Auftragsreihenfolge und Maschinenbelegung zu untersuchen (vgl. Abschnitt 2.2.5). Nachdem die Grundlagen hierfür erläutert wurden, widmet sich folgendes Kapitel dem Stand der aktuellen Erkenntnisse bezüglich eines variablen Lastmanagements im Kontext des operativen Produktionsmanagements.

3 Stand der aktuellen Erkenntnisse

3.1 Überblick

Dieses Kapitel greift die vorgestellten Grundlagen aus Kapitel 2 auf und verbindet diese mit dem Stand der Erkenntnisse aus aktuellen Forschungsarbeiten. Abschnitt 3.2 stellt hierbei eine kurze Einleitung zum Betrachtungsrahmen energieorientierter Produktionssysteme dar. Diverse Forschungsarbeiten werden anhand der Funktionen eines variablen Lastmanagements vorgestellt. Abschnitt 3.3 umfasst ausgewählte Ansätze, die eine Gestaltung der Auftragsplanung beinhalten. Diese werden im Anschluss bewertet (Abschnitt 3.4), um daraus den erforderlichen Handlungsbedarf für diese Arbeit abzuleiten (Abschnitt 3.5).

3.2 Gestaltung energieorientierter Produktionssysteme

Der zielgerichtete Einsatz der Ressource *Energie* ist bereits seit vielen Jahren Gegenstand der produktionstechnischen Forschung (DUFLOU ET AL. 2012). Das Themenfeld *Energieeffizienz* befasst sich dabei mit neuen technischen und organisatorischen Lösungen. Die Energieeffizienz innerhalb von Produktionssystemen wird laut MÜLLER ET AL. (2009) als die Erbringung eines Nutzens (Output) mit einem möglichst geringen Energieeinsatz (Input) bezeichnet. Die Invertierung dieses Verhältnisses wird auch *Energieintensität* (vgl. Abschnitt 1.1.1.) genannt. Sie berechnet die genutzte Energiemenge im Verhältnis zum erbrachten Nutzen (ERLACH & WASKAMP 2009, REINHART ET AL. 2010). Dies kann durch eine angepasste Infrastruktur, einen abgestimmten Produktionsablauf sowie Prozessoptimierungen erreicht werden.

Neben dem Effizienzbegriff hat sich in der Vergangenheit auch die Bedeutung von *energieflexiblen Produktionssystemen* gezeigt (vgl. Abschnitt 2.4.2). Im Gegensatz zur Energieeffizienz ist hier das Ziel, Energie anhand ihrer Verfügbarkeit zu nutzen (GRAßL 2015). Da im definierten Flexibilitätsbegriff die Kostenbetrachtung ausschlaggebend ist (vgl. Abschnitt 2.4.2), sind energieflexible Produktionssysteme nicht zwingend energieeffizient (KELLER ET AL. 2016A). Für die Auslegung und den Ablauf von Produktionssystemen, die Effizienz- und Flexibilitätskriterien genügen, lassen sich Arbeiten in diesen Themenfeldern als *energieorientierte Ansätze* zusammenfassen. Innerhalb der Funktionen (strukturell, koordinativ und prozessual) eines variablen Lastmanagements sind im Folgenden diese Ansätze einzuordnen

(vgl. Abschnitt 2.4.4). Zu Beginn werden solche *strukturellen* und *prozessualen* Ansätze vorgestellt, die sowohl die Fabrikplanung als auch das Produktionsmanagement tangieren (vgl. Abschnitt 2.2.2). Im Anschluss erfolgen die Vorstellung und Bewertung der *koordinativen* Ansätze, die sich ausschließlich dem Produktionsmanagement zuordnen lassen.

3.2.1 Energieorientierte strukturelle Ansätze

Strukturelle Ansätze beschreiben in vorliegenden Forschungsarbeiten das Ziel, Produktionssysteme in einem lang- bis mittelfristigen Planungshorizont an eine energieorientierte Ausgangssituation anzupassen. An dieser Stelle sollen ausgewählte Arbeiten kurz vorgestellt werden. Beispielsweise formuliert ENGELMANN (2009) Methoden und Werkzeuge zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Fabriken. Das Ergebnis sind Handlungsansätze (z. B. die Auswahl von Verfahren mit hohen energetischen Wirkungsgraden), die in der Planung und Bewertung von Produktionsprozessen in der Automobilindustrie Einsatz finden.

Mit einem Ansatz zur Steigerung der Energieeffizienz beschreibt THIEDE (2012) die Einsatzmöglichkeiten der Simulation in der Fabrikplanung und dem -betrieb. Diesbezüglich liegt ein integriertes Prozessmodell zugrunde, das aus der Kombination eines ökologischen und ökonomischen Prozessmodells entsteht. Dieses beinhaltet die Modellierung der Prozesse, Produktions- und Nebenanlagen sowie des Fabrikgebäudes. Das Ergebnis stellt eine Visualisierung des simulierten Energiebedarfs einer Fabrik unter einem gegebenen Produktionsprogramm dar.

SCHREMS (2014) definiert eine Methode zur energieorientierten Auswahl von Produktionsmitteln. Seine Arbeit umfasst eine komponentenorientierte Modellierung des Energiebedarfs in den Betrachtungsebenen Komponenten, Baugruppen, Maschinen und Prozessketten. Mithilfe eines zustandsorientierten Maschinenverhaltens werden daraus Energiebedarfsprognosen erstellt, um auf Basis eines Entscheidungssystems energieorientierte Kennzahlen im Planungsprozess zu berücksichtigen.

SCHNELLBACH (2015) leistet mit seinen Arbeiten einen Beitrag zur Reduktion von Energieverschwendung in ganzheitlichen Produktionssystemen. So beschreibt er am Beispiel des Karosseriebaus in der Automobilproduktion bestehende Wechselwirkungen zwischen Systemelementen. Diese werden zunächst mithilfe einer energieorientierten Wertstromanalyse angereichert, um Energieeffizienzmaßnahmen abzuleiten, bevor die Bewertung in einem angepassten Fertigungsablauf mittels Simulationsstudien erfolgt.

3.2.2 Energieorientierte prozessuale Ansätze

Prozessuale Ansätze beschreiben Forschungsarbeiten mit dem Ziel, energiebezogene Aussagen zum Herstellungsprozess in einem Produktionssystem bzw. einer Anlage zu treffen. Auch diese Ansätze sind nicht ausschließlich der Fabrikplanung und dem Produktionsmanagement zuzuordnen. Ausgewählte Forschungsarbeiten aus diesen Bereichen werden im Folgenden vorgestellt. So erarbeitet LAREK (2012) eine simulationsbasierte Auslegung ressourceneffizienter Prozessketten. Hierzu wird eine modulare und hierarchische Modellierung einzelner Fertigungsschritte an einer Produktionsanlage gewählt, welche im Rahmen einer Simulation den Ressourcenbedarf prognostiziert. Die Ergebnisse fließen in eine Modellbibliothek ein, die zur automatischen Generierung von Prozessketten und deren Energiebedarfen herangezogen wird.

REINHARDT (2013) stellt mit ihrer Arbeit eine Methodik zur Verfügung, welche die Bewertung der Ressourceneffizienz von Prozessketten ermöglicht. Ausgangsbasis bildet die Ökobilanzierung, die auf die spezifischen Anforderungen der Fertigungsplanung angepasst ist. Ausgehend von den Produkteigenschaften sowie den technischen Fertigungsmöglichkeiten, ist die Modellierung der Ressourcenströme innerhalb eines Prozessschrittes die Basis für eine kennzahlorientierte Bewertung. Das Ergebnis sind bewertete Prozessalternativen, die nach Gesichtspunkten der Ressourceneffizienz dem Fertigungsplaner eine Entscheidungsgrundlage bieten.

Eine Bewertung von Produktionsanlagen und deren prozessabhängigen Betriebszuständen untersucht GRAßL (2015) im Kontext der Energieflexibilität. Neben der Modellierung von Anlagen und Maßnahmen zur elektrischen Leistungsänderung ist die Ableitung von Energieflexibilitätsaxiomen zentraler Bestandteil seiner Arbeit. Diese werden in eine Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität von Produktionsanlagen überführt, auf der wiederum ein Bewertungsvorgehen für energieflexible Anlagen basiert.

Die vorgestellten Ansätze repräsentieren statische Bewertungen, Simulationen oder Optimierungen, welche die Auswahl und Auslegung von Produktionssystemen in unterschiedlichen Ebenen fokussieren. Ausgenommen jene Arbeit von GRAßL (2015), zielen alle vorgestellten Ansätze auf eine Reduktion der eingesetzten Ressourcen bzw. des Energiebedarfs ab. Aktuell lassen sich mit Forschungsvorhaben über die *energieflexible Fabrik* neue Erkenntnisse für den effizienten und flexiblen Einsatz der Ressource Energie in der Produktion gewinnen (POPP ET AL. 2013, POPP ET AL. 2015, SCHULTZ ET AL. 2015A). So liegt der Fokus der Arbeiten von POPP &

ZÄH (2014) auf der Befähigung und Weiterentwicklung von Werkzeugmaschinen, um Prozesse und Betriebsweisen auf ein schwankendes Energieangebot auszurichten. Zudem konzentrieren sich die Arbeiten von LIEBL ET AL. (2015) und SPRENG ET AL. (2014) auf die Identifizierung und Erschließung von flexiblen Produktionsprozessen durch modifizierte Energiedatenerfassungssysteme. SIMON ET AL. (2016) formulieren in ihrem Vorgehen die Bewertung der Energieflexibilität von Produktionssystemen.

Allen Ansätzen gemein ist die Tatsache, dass diese sich lediglich bedingt zur energieorientierten Auftragsplanung bzw. zur Umsetzung eines variablen Lastmanagements innerhalb der PPS eignen. Dennoch stehen sie im engen Zusammenhang mit den energiebezogenen Eigenschaften von Produktionssystemen sowie mit den strukturellen und prozessualen Funktionen in Bezug auf ein variables Lastmanagement. Ansätze, die sich auf koordinative Funktionen des Lastmanagements im Rahmen der PPS beziehen, werden im folgenden Abschnitt vorgestellt und bewertet.

3.3 Gestaltung einer energieorientierten Auftragsplanung

Die Auftragsplanung wird im operativen Produktionsmanagement durch die PPS verantwortet und ist für die rechtzeitige und zielgrößenausgerichtete Abarbeitung der Produktionsaufträge verantwortlich (vgl. Abschnitt 2.2.5). Bestehende Forschungsansätze haben sich in den letzten Jahren auch mit der Ressource Energie innerhalb der PPS befasst. Diese lassen sich in übergreifende und koordinative Arbeiten (Abschnitt 3.3.1), in Ansätze im Kontext der Auftragsplanung (Abschnitt 3.3.2) sowie in weitere spezifische Arbeiten unterteilen. Die ausgewählten Ansätze innerhalb der Auftragsplanung bilden die Grundlage für eine Bewertung sowie die Ableitung des Handlungsbedarfs.

3.3.1 Energieorientierte koordinative Ansätze

Erste Arbeiten im Bereich einer energieorientierten PPS liefern u. a. BULLINGER ET AL. (2000) mit dem Projekt „OPUS“ (Organisationsmodelle und Informationssysteme für einen produktionsintegrierten Umweltschutz). Bestandteil ist ein Ansatz zur Auftragsabwicklung nach Umwelt- und Kostenzielen, dessen Kern eine *stoffstromorientierte PPS* ist. Diese berücksichtigt neben den logistischen Zielgrößen auch Energie-, Emissions- und Abfallmengen. Zur Auflösung des Optimierungsproblems erfolgt innerhalb der Losgrößen sowie Termin- und Kapazitätsplanung ein

Rückgriff auf eine lineare Programmierung. Im Bereich der Reihenfolgeplanung und Auftragsfreigabe bildet ein heuristisches Lösungsverfahren den Ausgangspunkt des Ansatzes. Beim Ergebnis handelt es sich um einen Leitfaden zur Implementierung eines umweltorientierten PPS-Systems in Fertigungsunternehmen.

PECHMANN & SCHÖLER (2011, 2012) und PECHMANN ET AL. (2012A, 2012B) formulieren ein Vorgehen zur Implementierung eines *energieeffizienten PPS-Systems* auf Basis einer Softwarelösung zur Maschinenbelegung. In diesem System sind Energiemenge und -kosten von Energiebeschaffungsoptionen als Zielgröße und Planungsgegenstand für die PPS abgebildet. ICHOUA & PECHMANN (2014) erweitern diesen Ansatz um weitere Energiebezugsoptionen.

PUTZ ET AL. (2012A, 2012B, 2013, 2014) und NEUGEBAUER ET AL. (2012) beschreiben in dem Ansatz der *energiesensitiven Produktionssteuerung* eine Ausrichtung konventioneller PPS-Systeme an energieeffiziente Anforderungen. Dabei findet die Ressource Energie als begrenztes Einsatzgut im Planungs- und Steuerungsprozess Berücksichtigung. Das Vorgehen hat zum Ziel, bestehende Produktionssysteme und deren Produktionsmanagement um energieorientierte Zielgrößen zu erweitern. Umgesetzt wird dies durch energieeffiziente, softwaregestützte Planungs- und Steuerungsstrategien in der Stückgutproduktion von Serienprodukten, welche u. a. eine energiesensitive Auftragsfreigabe beinhaltet.

Neben diesen übergreifenden Arbeiten stellt der folgende Abschnitt ausgewählte Ansätze im Kontext der Auftragsplanung heraus.

3.3.2 Ausgewählte Ansätze der Auftragsplanung

Im Rahmen seiner Arbeit betrachtet BONNESCHKY (2002) die Integration energie-wirtschaftlicher Aspekte in PPS-Systemen. Grundlage hierfür ist die Einführung von Energiekennzahlen sowie die Beschreibung des Produktionsstandortes anhand eines UPN-Modellierungsansatzes nach SCHIEFERDECKER (2006). Hierzu werden Umwandlungsanlagen (U), Produktionsanlagen (P) und Nebenanlagen (N) klassifiziert und mit Energiekennzahlen beschrieben. Das Ziel umfasst die Verbesserung der Energieeffizienz und Minimierung der Energieeinsatzkosten durch die resultierenden Planungsergebnisse eines erweiterten MRP-Laufs (vgl. Abschnitt 2.2.4.2). Eine Verbesserung der Auftragsplanung mittels mathematischen Lösungsverfahren ist hingegen nicht Bestandteil des Ansatzes. Das Ergebnis findet Anwendung in der Grundstoffindustrie.

Die simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung verfolgt JUNGE (2007). Auf Grundlage der Materialflusssimulation wird eine Maschinenbelegung über energieorientierte heuristische Verfahren generiert. Zielsetzung ist es, den Heizenergiebedarf von Werkshallen durch eine adaptierte Maschinenbelegung zu reduzieren. Zur Zielerreichung wurde die Materialflusssimulation an eine Gebäudesimulation gekoppelt. Grundsätzlich ist eine Anpassung gegenüber fixierten und variablen Energiebeschaffungsoptionen möglich, allerdings wird diese nicht betrachtet. Die Umsetzung wurde anhand des Einsatzes von parallelen Spritzgussmaschinen durchgeführt und bewertet.

MOUZON (2008) beschäftigt sich mit einer energieeffizienten Ressourcenplanung von einzelnen oder parallelen CNC-Maschinen. Hauptaspekt ist die Abschaltung von Maschinen in Nebenzeiten, sofern dies durch die Auslastung der Produktion möglich ist. Zur Lösung des Optimierungsproblems werden eine lineare Programmierung und unterschiedliche heuristische Ansätze verwendet und verglichen. Diese berücksichtigen energiebezogene Maschinenzustände sowie Rüst- und Stand-by-Zeiten. Der Betrachtungsumfang beschränkt sich ausschließlich auf die eingesetzte Energiemenge, was zu einer energieeffizienten Belegungsplanung für jede Maschine führt.

Eine energieorientierte Produktionsplanung formuliert RAGER (2008) für parallel-identische Maschinen. Ähnlich wie JUNGE (2007) nutzt RAGER (2008) das UPN-Modell, um Neben- und Umwandlungsanlagen in die Lösungssuche zu integrieren. Zur Modellierung wird ein maschinen- und auftragsbezogener Einsatzenergieträgerbedarf in der Textilproduktion formuliert, der durch den Gebrauch einer Heuristik in eine optimierte Maschinenbelegung überführt werden soll. Die Wechselwirkungen zwischen den Produktionsanlagen sowie den Umwandlungs- und Nebenanlagen werden dabei berücksichtigt. Zielsetzung ist ein fixiertes Spitzenlastmanagement, um Energiekosten zu senken. RAGER ET AL. (2014) erweitern dieses Lösungsverfahren mit dem Ziel, auch ein schwankendes Energieangebot bzw. volatile Energiepreise zu beachten.

AGHA (2009) formuliert in seiner Arbeit ein sequenzielles Planungsvorgehen, welches für den Einsatz in der Prozessindustrie entwickelt wurde. Dazu werden sowohl Energiebeschaffungsoptionen als auch Erzeugungsanlagen betrachtet. Darüber hinaus finden in der Zielfunktion Emissionen, Energiemengen und -kosten Berücksichtigung. Zur Lösung des Zuordnungs- und Planungsproblems wird eine Maschinenbelegung mithilfe eines exakten Lösungsverfahrens (Mixed Integer Linear Programming MILP) realisiert. Das Ergebnis ist eine verbesserte synchronisierte Nut-

zung der Eigenerzeugung in Verbindung mit der Auftragsplanung, um damit eine Reduktion der Energiekosten sowie der CO₂-Emissionen zu erzielen.

Für die Planung und den Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme beschreibt WEINERT (2010) eine Methodik, welche die Energiebedarfsmengen eines Produktionssystems in den Fokus der Betrachtungen stellt. Kernbestandteil ist hier die mathematische Formulierung von zustandsabhängigen Energiebedarfsmengen, den sog. „Energy-Blocks“, welche die Grundlage für Entscheidungsfragen in der Auf- und Ablauforganisation darstellen. Diese sind in einer Bibliothek bzw. Datenbank hinterlegt und werden exemplarisch in der Fertigungs- und Montagesystemplanung sowie in der operativen Produktionsplanung angewandt. Das Ergebnis ist eine Prognose des Energiebedarfs eines gewählten Produktionssystems auf Basis einer Simulation.

HAAG (2013) stellt in seiner Arbeit eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion vor. Dabei werden Hauptprozesse der Produktion mit Nebenanlagen in einem System verknüpft. Die Zielsetzung des Ansatzes besteht darin, frühzeitig verschiedene Planungsalternativen von Produktionssystemen bezogen auf ihr energetisches Verhalten zu bewerten. Bei der Auswahl von Produktionsszenarien wird auf die Beziehung zwischen Energiekennzahlen und logistischen Zielgrößen der Produktion geachtet. Diese Erkenntnisse gelangen bei der Auftragsfreigabe im Rahmen einer Materialflusssimulation zur Nutzung, um eine geeignete Maschinenbelegung zu realisieren. Die Methodik wird anhand einer Werkstattfertigung mit Bearbeitungszentren angewandt.

In seinen Arbeiten zur Erarbeitung einer energieorientierten Produktionssteuerung betrachten SCHULTZ ET AL. (2015A, 2015B, 2016) die Herausforderungen der untertägigen Anpassung einer Produktion an ein schwankendes Energieangebot. Kernbestandteil ist die Erweiterung des Regelkreises der Fertigungssteuerung nach LÖDDING (2016) um Energieaspekte an einzelnen Produktionsressourcen. Darüber hinaus werden der Regelkreis sowie die Maßnahmen der Auftragsfreigabe um ein Lastmanagement der Nebenanlagen erweitert. Ziele umfassen die Durchsetzung und Anpassung des Produktionsplans an einen definierten Energieplan sowie den Umgang mit ungeplanten Störungen. Dabei gelangen sowohl eine Speicherung von Energie als auch der aktive Handel mit Energiebeschaffungsoptionen, wie z. B. der Strombörse, zur Betrachtung.

BEIER (2017) erarbeitet einen Ansatz, mit dem Auswirkungen eines internen fluktuierenden Energiebezugs auf die Produktion untersucht werden. Ähnlich zu SCHULTZ

(2015) wird hierbei der Ansatz der Fertigungssteuerung nach LÖDDING (2016) gewählt, um die schwankende Energiebereitstellung in der Reihenfolgeplanung und Auftragsfreigabe zu berücksichtigen. Dabei stützt sich dieser Ansatz auf die Nutzung von physischen Materialspeichern (Puffern) zwischen den Produktionsanlagen, um den Energiebedarf vom Materialfluss zu entkoppeln. Zudem werden dazu elektrische Speicherungsmöglichkeiten (Elektrofahrzeuge) genutzt. Veränderungen in der Produktion oder in der Energiebereitstellung werden in Form einer Simulation direkt berücksichtigt und umgesetzt.

Im Folgenden findet eine Vorstellung weiterer energieorientierter, koordinativer Ansätze statt, die spezifische Funktionen der Auftragsplanung adressieren. Diese stellen jedoch keine in sich geschlossenen Betrachtungen des Themenkomplexes dar, sondern fokussieren sich auf einzelne Aspekte der Auftragsplanung.

3.3.3 Weitere Ansätze der Auftragsplanung

Übergreifende Ansätze, die Losgrößen, Termine und Kapazitäten berücksichtigen, werden unter anderem von MODARRES & IZADPANAHI (2016) formuliert. Diese betrachten Emissionen, Energiekosten und -mengen in einer linearen Programmierung im Umfeld der Metallerzeugung. Bezogen auf eine Werkstattfertigung, erarbeiten BASIS ET AL. (2015) ein Verfahren zur Losgrößenbestimmung mittels eines exakten Lösungsverfahrens (MILP). MASMOUDI ET AL. (2016) präsentieren einen Ansatz, der die lineare Programmierung mit Heuristiken kombiniert, um den Energiebedarf einer Fließfertigung auf externe Bezugsoptionen abzustimmen.

Im Bereich der Reihenfolgeplanung diskutieren BRUZZONE ET AL. (2012) ein energieorientiertes lineares mathematisches Lösungsverfahren, welches Lastspitzen einer flexiblen Fließfertigung glättet und sich an einem fixierten Lastmanagement ausrichtet. ZHANG ET AL. (2014) formulieren energieorientierte mathematische Lösungsverfahren für Produktionssysteme in einem Smart-Grid-Szenario. Im Fokus stehen Spitzenlastzeiten, die ein variables Lastmanagement unterstützen. Variable Energiebeschaffungsoptionen werden im Rahmen einer linearen Optimierung der Maschinenbelegung von EMEC ET AL. (2013) entwickelt. LIU ET AL. (2014) präsentieren ein Vorgehen, das unterschiedliche Maschinenzustände sowie produktabhängige Energiebedarfe in der Reihenfolgeplanung berücksichtigt. SHARMA ET AL. (2015) stellen eine heuristisch ermittelte Maschinenbelegung unter der Rahmenbedingung von fixierten Energiebeschaffungsoptionen vor.

Neben der energieorientierten Werkstattfertigung betrachten LIU ET AL. (2008) auch eine Kombination aus Fließ- und Werkstattfertigung, den sog. Hybrid-Flow-Shop, wobei Lösungen anhand ihrer Energiemenge und Durchlaufzeit verglichen werden. LOU ET AL. (2013) beachten in ihrem Ansatz für die Maschinenbelegung eines Hybrid-Flow-Shops unterschiedliche Maschinen je Station mit individuellen Bearbeitungszeiten und Energieverbräuchen. Darüber hinaus werden flexible externe Energiebezugsoptionen in den Betrachtungsumfang integriert.

SUWA & SAMUKAWA (2015) beschreiben auf Basis einer auftragsabhängigen Werkzeugauswahl an flexiblen Bearbeitungsmaschinen und des daraus resultierenden Energiebedarfs eine energieeffiziente Maschinenbelegung. KEMMOÉ ET AL. (2015) erarbeiten mittels einer linearen Programmierung eine Maschinenbelegung für eine flexible Werkstattfertigung unter dem Gesichtspunkt des Spitzenlastmanagements. Weitere Maschinenbelegungsverfahren, die sowohl Emissionen, Energiekosten und -mengen als auch weitere Zielgrößen berücksichtigen, werden von GIRET ET AL. (2015) in einem umfassenden Vergleich dargelegt.

Da diese Ansätze nur einzelne Bestandteile der Auftragsplanung innerhalb der PPS adressieren, werden sie in der Bewertung für eine differenzierte Bewertung im nachfolgenden Abschnitt 3.4 nicht miteinbezogen.

3.4 Bewertung der Ansätze im Kontext einer energiebezugsorientierten Auftragsplanung

Damit Produktionsunternehmen die Anforderungen eines variablen Lastmanagements im Rahmen der PPS umsetzen können, gilt es, den Ablauf und die Elemente der Auftragsplanung (vgl. Abschnitt 2.2.5 ff.) entsprechend um energieorientierte Zielgrößen zu erweitern. Um zusätzlich den Bedarfen des Demand Side Management sowie des Demand Response (vgl. Abschnitt 2.4.2) nachzukommen, ist die Beschreibung des Energiebezugs essenziell. Anhand dieser beiden Themenfelder ergibt sich die Bewertung des Erkenntnisstandes aus Abschnitt 3.3.2., die mithilfe vier unterschiedlicher Kategorien erfolgt:

- Im ersten Schritt werden die ausgewählten Arbeiten nach ihren *Zielgrößen* systematisiert. Abgeleitet von den ökologischen Treibern aus dem Umfeld produzierender Unternehmen (vgl. Abschnitt 1.2.2), liegt der Fokus auf Mengen, Kosten und Emissionen, welche im direkten und indirekten Zusammenhang mit dem Energieeinsatz der Produktion stehen.

- Im zweiten Schritt werden die Arbeiten anhand der *Systemgrenze* (vgl. Abschnitt 2.2.2), die in den jeweiligen Arbeiten gesetzt wird, eingeordnet. Es wird zwischen Einzelanlagen, Produktionssystemen und Nebenanlagen unterschieden. Einzelanlagen fassen Ansätze zusammen, bei denen Einzelmaschinen oder parallel identische Maschinen in der Planung Berücksichtigung finden. Produktionssysteme bilden einen Produktherstellungsprozess über unterschiedliche Bearbeitungsschritte mit verschiedenen Maschinen innerhalb eines Standortes ab. Nebenanlagen repräsentieren hingegen die Peripherieanlagen (z. B. Druckluftherzeugung) einer Produktion.
- Im dritten Schritt wird der Betrachtungsumfang innerhalb des *Auftragsplanungsablaufs* der Arbeiten bestimmt. Dieser erstreckt sich von der Losgrößen- bis hin zur Reihenplanung (vgl. Abschnitt 2.2.5).
- Abschließend sollen die Arbeiten mittels der unterschiedlichen *Energiebezugsoptionen* eingeordnet werden. Im Speziellen sind die betrachteten Formen der Beschaffung und Erzeugung (vgl. Abschnitt 2.3.3 ff.) von Interesse.

In Bezug auf die gewählten *Zielgrößen* befassen sich die vorgestellten Arbeiten vor allem mit einer Reduktion des Energieeinsatzes bzw. den daraus resultierenden Energiekosten. Hauptsächlich wird eine fixierte Energiebeschaffung unterstellt, die keine Preisschwankungen durch variable Beschaffungsoptionen berücksichtigt. Ebenso verhält es sich mit der Zielgröße der CO₂-Emissionen. Diese wird, sofern im Betrachtungsrahmen, in direkter Abhängigkeit mit dem Energieeinsatz zu einer fixierten Beschaffung beschrieben. Die *Systemgrenzen* der vorgestellten Arbeiten umfassen in den meisten Fällen die gesamte Fabrikinfrastruktur. Das bedeutet, dass neben den Produktionsanlagen Nebenanlagen oder Klimatisierung und Beleuchtung einbezogen werden. Folglich ist die *Auftragsplanung* meist lediglich in Teilaspekten von Bedeutung. Hinsichtlich der Reihenfolgeplanung fällt auf, dass diese unter der Zielgröße der Energieeffizienz ein bereits stark durchdrungenes Gebiet darstellt. Im Gegensatz dazu finden die Losgrößenplanung sowie Termin- und Kapazitätsplanung nur in wenigen Ansätzen Betrachtung. Ein *abgestimmter sequenzieller Ablauf*, der die Losgrößenplanung mit der Termin- und Kapazitätsplanung vereint und mit einer angepassten Maschinenbelegung auf die einzelnen Produktionsressourcen einplant, findet sich in der Literatur nur selten. Auch eine Beschreibung der unterschiedlichen *Energiebezugsoptionen* ist erst in kürzlich erschienenen Veröffentlichungen erfasst. Ein wesentlicher Aspekt ist hier die variable Beschaffung und Erzeugung von Energie. Diese fehlen in den meisten Arbeiten oder werden lediglich am Rande thematisiert. Stattdessen wird meist von einer fixierten Energiebeschaffung unter

konstanten Kosten und Emissionen ausgegangen. Aus den genannten fehlenden Teilaspekten der aktuellen Literatur leitet sich der Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit ab.

Abbildung 21 zeigt die Einordnung und die Bewertung der ausgewählten Arbeiten aus Abschnitt 3.3.2 zu den genannten Kriterien.

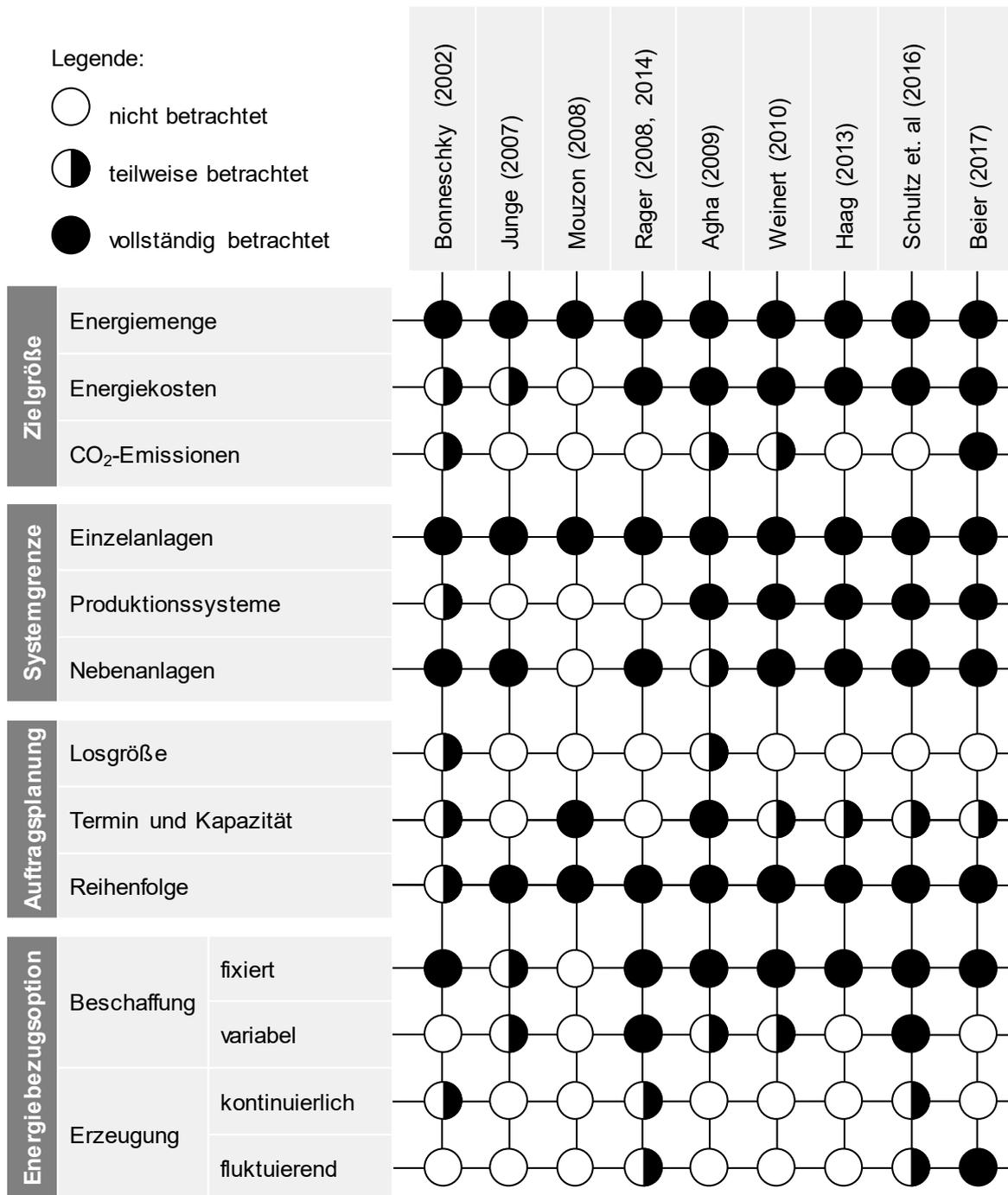


Abbildung 21: Bewertung der ausgewählten Ansätze im Kontext der energieorientierten Auftragsplanung

3.5 Ableitung des Handlungsbedarfs und Formulierung der Anforderungen

Die Analyse des aktuellen Erkenntnisstandes zeigt, dass die Ausrichtung eines Produktionssystems an eine bestehende Energiesituation häufig durch eine Anpassung der Reihenfolgeplanung – bezogen auf die Auftragsplanung – umgesetzt wird. Jedoch ist der Lösungsraum für die Reihenfolgeplanung an den Produktionsressourcen durch die vorab definierten Losgrößen und Terminvorgaben eingeschränkt. Dementsprechend ist nur eine marginale Veränderung der Energienachfrage oder ein Spitzenlastmanagement im Rahmen der bspw. Maschinenbelegung umsetzbar. Überdies ist zu beobachten, dass die Mehrzahl der aktuellen Ansätze ausschließlich eine Betrachtung von externen Energiebezugsoptionen fokussiert. Zwar werden in jüngster Zeit auch variable Bezugsoptionen untersucht, dennoch fehlt ein umfassender Ansatz, der Beschaffungs- und Erzeugungsoptionen auf Basis eines energieorientierten Zielsystems vereint und in einem variablen Lastmanagement abbildet (z. B. in Form von abgestuften Energieverfügbarkeiten). Dies stellt allerdings die Eingangsgröße dar, die für eine Ausrichtung der Auftragsplanung herangezogen wird. Innerhalb der Auftragsplanung gilt es, Lösungsverfahren zu entwickeln, die den variablen Energiebezug sowie die daraus variierenden Energiekosten und -emissionen berücksichtigen. Zudem ist es erforderlich, neben den Einzelanlagen auch die Verknüpfung dieser zu einem Produktionssystem miteinzubeziehen, um die koordinative Funktion des variablen Lastmanagements in der PPS zu berücksichtigen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass im Kontext der energiebezugsorientierten Auftragsplanung folgende Handlungsbedarfe bestehen:

- *Handlungsbedarf 1: Beschreibung der Energiebezugsoptionen für die PPS*

Die Beschreibung der Energiebezugsoptionen ist der zentrale Aspekt, um die Energiesituation eines Produktionssystems zu modellieren. Speziell die variable Energiebeschaffung sowie die fluktuierende Eigenerzeugung sind in aktuellen Publikationen kaum abgebildet. Die Eigenschaften der Energiebezugsoptionen beeinflussen Mengen, Kosten und Emissionsaspekte, welche sich auf den Energieeinsatz der Produktion auswirken. Hieraus entstehen für die vorliegende Arbeit zwei Anforderungen:

- *Anforderung 1a: Parametrisierung der Energiebezugsoptionen*

Die unterschiedlichen Beschaffungs- und Erzeugungsmöglichkeiten von elektrischer Energie sind für ein Produktionsunternehmen zu erarbeiten. Geeignete Parameter und Kennzahlen sind zu identifizieren, welche die Bezugsoptionen nach Mengen-, Kosten- und Emissionsinformationen beschreiben.

- *Anforderung 1b: Generierung von zielgrößenorientierten Energieplänen*

Die Energiebezugsoptionen sind in Energieplänen in aggregierter Form zusammenzufassen. Informationen über Menge, Kosten und Emissionen, die in dem betrachteten Zeitraum über die einzelnen Optionen anfallen, sind anhand der sequenziellen Planungsfolgen zu erstellen. Des Weiteren sind die Anpassungsmöglichkeiten der Optionen zu beschreiben und kenntlich zu machen.

- *Handlungsbedarf 2: Abgestimmter sequenzieller Auftragsplanungsablauf*

Da die Reihenfolgeplanung den letzten Schritt in den Planungsaufgaben der PPS markiert, haben sich in der Vergangenheit diverse Autoren mit einer energieeffizienten Ausgestaltung der Maschinenbelegung befasst. Jedoch führen die Losgrößen und die gesetzten Termine zu einer wesentlichen Restriktion bei einer energieorientierten Verschiebung von Produktionsaufträgen. Somit erweist sich eine Umsetzung eines variablen Lastmanagements mit Produktionsanlagen als lediglich begrenzt möglich. Daraus resultieren für die vorliegende Arbeit zwei weitere Anforderungen:

- *Anforderung 2a: Beschreibung des Energiebedarfs eines Produktionssystems mit den Elementen der Auftragsplanung*

Die unterschiedlichen Elemente der Auftragsplanung sind um energieeinsatzbezogene Aspekte systematisch zu erweitern. Vor allem die Stammdaten sind hier von Interesse, da diese die Grundlage für den Planungsprozess bilden. Neben den produktionsabhängigen Energiebedarfen der Produktionsressourcen sind die weiteren Energiebedarfe (z. B. Stand-by-Zeiten) zu erfassen sowie dem Planungsablauf zur Verfügung zu stellen.

- *Anforderung 2b: Entwicklung eines sequenziellen energieorientierten Lösungsverfahrens*

Die vorhandenen Informationen der Energiebezugsoptionen sowie des Energiebedarfs der Produktionsressourcen sind in einem Entscheidungsmodell miteinander zu verbinden. Innerhalb dieses Modells werden Losgrößen, Termine und Reihenfolgen von Produktionsaufträgen anhand der zielgrößenorientierten Energiepläne ausgelegt. Diesbezüglich ist es notwendig, geeignete Lösungsverfahren zu identifizieren und im Bedarfsfall zu erweitern.

Die in diesem Kapitel identifizierten Handlungsfelder und Anforderungen motivieren die Entwicklung einer passenden Methodik zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung. Folgendes Kapitel erläutert den Aufbau und Ablauf der Methodik.

4 Aufbau und Übersicht der Methodik

Dieses Kapitel dient als Überblick der Methodik für die energiebezugsorientierte Auftragsplanung und bildet die Grundlage für den Aufbau und den Ablauf der unterschiedlichen Elemente. Dabei gilt es, den konventionellen Planungslauf der PPS um Informationen der standortspezifischen Energiebezugsoptionen zu ergänzen sowie für die Umsetzung eines Lastmanagements zu nutzen.

4.1 Allgemeines

Das Ziel der vorliegenden Methodik ist es, den Energiebezug mit den Produktionsaufträgen und -ressourcen eines Standortes ökonomisch und ökologisch abzustimmen. Dies geschieht konventionell mithilfe der Eigenfertigungsplanung, in welcher die Produktionsaufträge einer Periode in Abhängigkeit der gegebenen Ressourcen durch eine Losgrößenplanung, eine Termin- und Kapazitätsplanung sowie eine Reihenfolgeplanung verteilt werden. Aus dem Literaturüberblick in Kapitel 3 wird ersichtlich, dass Energiebezugsoptionen und ihre Schwankungen bislang nur unzureichend in den Methoden der PPS Berücksichtigung fanden. Diese stellen jedoch die Grundlage für die Anwendung eines Lastmanagements dar, welche eine zeitlich unstetige Energiemengenverfügbarkeit für die Produktionsplanung beschreibt.

Ein abgeleiteter Handlungsbedarf aus Abschnitt 3.4 bezieht sich auf die *Beschreibung der Energiebezugsoptionen für die PPS*. Hierzu gilt es, im ersten Schritt eine Beschreibung und Modellierung der internen und externen Bezugsoptionen für die PPS zu erarbeiten. Diese Modelle sollen anhand energetischer Zielgrößen, wie z. B. Energiekosten oder CO₂-Emissionen, beschrieben werden. Die daraus entstehenden konsolidierten Energiemodelle für eine Produktionsperiode bilden die Eingangsinformationen für die Umsetzung einer energiebezugsorientierten Auftragsplanung.

Als weiterer Handlungsbedarf wurde die Definition eines *abgestimmten sequenziellen Auftragsplanungsablaufs* identifiziert. Wie bereits in Kapitel 3 dargestellt, ist auch hier der Produktionsfaktor Energie bisher nicht als veränderliche Planungsgröße verankert. Demzufolge sind die unterschiedlichen Schritte der Eigenfertigungsplanung um die Energiebedarfe von Produkten und Anlagen zu erweitern und mithilfe geeigneter Lösungswerkzeuge zu optimieren. Das Ergebnis stellt eine Reihenfolgeplanung in Form einer Maschinenbelegung dar, welche an die Produktionssteuerung zur Auftragsfreigabe übergeben wird (KELLER ET AL. 2016A, SCHULTZ ET AL. 2016).

4.2 Aufbau der energiebezugsorientierten Auftragsplanung

Zur Umsetzung der in Abschnitt 3.4 beschriebenen Anforderungen bedarf es einer Erweiterung der Auftragsplanung um drei Aspekte:

1. Eine Methode zur Integration von Energiebezugsoptionen.
2. Eine Methode zur Integration energieorientierter Kennzahlen in Planungselemente.
3. Ein abgestimmtes mathematisches Lösungsverfahren.

Abbildung 22 fasst den Aufbau der Methodik zusammen.

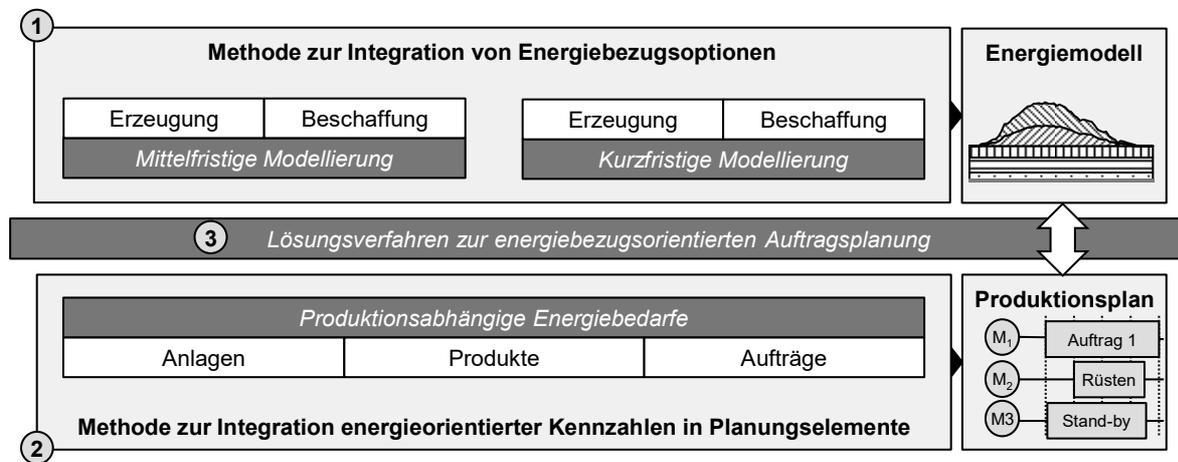


Abbildung 22: Aufbau der energiebezugsorientierten Auftragsplanung

Die *Methode zur Generierung von standortspezifischen Energiemodellen* (vgl. Kapitel 5) beginnt mit der Aufnahme und Beschreibung der standortspezifischen Bezugsoptionen des betrachteten Produktionssystems. Im Rahmen der Beschreibung werden Informationen über Bezugsart und deren Eigenschaften aufgenommen und in mittel- und kurzfristige Bestandteile kategorisiert. In Abhängigkeit von den energetischen Zielgrößen sind definierte Energiemodelle zu erstellen, die als Eingangsinformation für die PPS zur Nutzung gelangen können.

Bei der *Methode zur Erweiterung der Produktionsplanung um Energieaspekte* (vgl. Kapitel 6) soll in einem schrittweisen Vorgehen das zu betrachtende Produktionssystem aufgenommen werden. Die Betriebs- und Energiedaten der Anlagen sind mit den Stammdaten der Produktionsplanung zu verknüpfen. Zudem hat eine Beschreibung der Abhängigkeiten zwischen den Einzelzuständen einer Anlage zu erfolgen. Dies soll sicherstellen, dass die Anlagen und deren energiebedarfsabhängige Zustände modellhaft in der Datenstruktur hinterlegt sind.

Die beiden vorgestellten Methoden bilden die Grundlage für die *Entwicklung eines sequenziellen abgestimmten Lösungsverfahrens* (vgl. Kapitel 7). Mithilfe geeigneter mathematischer Werkzeuge gilt es, in sukzessiven Teilschritten Lösungsvorschläge zu erarbeiten, welche die Zielvorgaben des Produktionssystems (z. B. Auftragsbestand) sowie des Energiebezugs (z. B. Emissionsgrenzen) vereinen. Das Ergebnis bildet ein an ein variables Lastmanagement ausgerichteter abgestimmter Maschinenbelegungsplan. Folgender Abschnitt detailliert den schrittweisen Ablauf.

4.3 Ablauf der energiebezugsorientierten Auftragsplanung

Kernbestandteil der energiebezugsorientierten Auftragsplanung ist das Lösungsverfahren im Rahmen der Eigenfertigung. Dieses ist an den konventionellen Ablauf der PPS angelehnt, jedoch im Vorfeld um Energiebezugs- und Energiebedarfsmodelle des betrachteten Produktionssystems zu erweitern. Abbildung 23 veranschaulicht den Ablauf der Methodik.

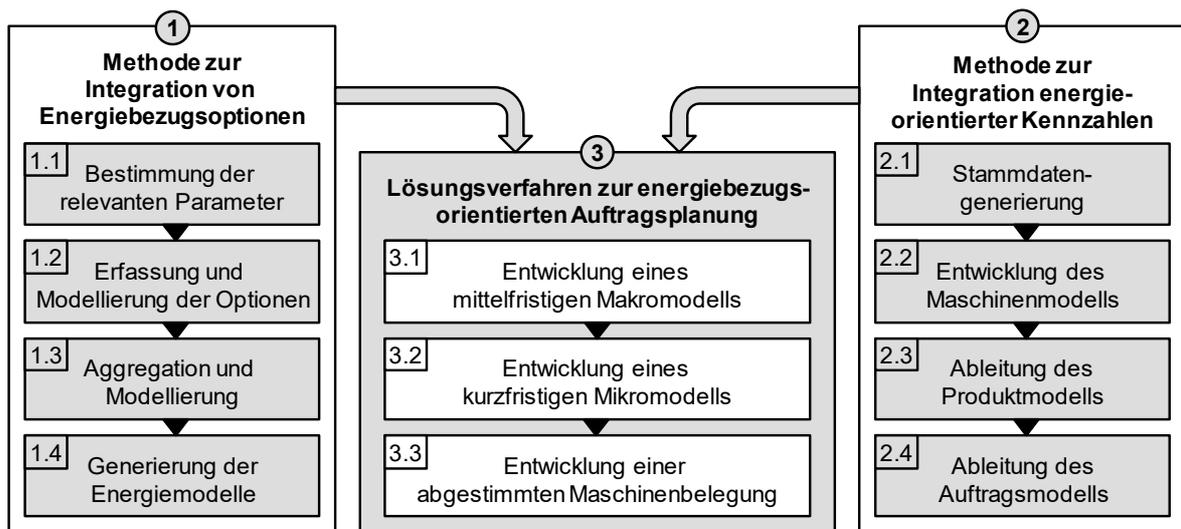


Abbildung 23: Ablauf der energiebezugsorientierten Auftragsplanung

Der Ablauf der *Methode zur Generierung von standortspezifischen Energiemodellen* zielt auf Formulierung des Produktionsfaktors elektrische Energie als planbare Ressource für die Auftragsplanung. Im ersten Schritt erfolgt die Definition von planungsrelevanten Parametern zur Beschreibung der Energiebezugsoptionen. Diese dienen im zweiten und dritten Schritt als Eingangsgrößen für die Erfassung und Darstellung sowie die Aggregation und Abbildung der Energiebezugsoptionen. Bei den Ergebnissen handelt es sich um standortspezifische Energiemodelle, welche die Grundlage für die Abstimmung im Rahmen des Lösungsverfahrens bilden.

Die *Methode zur Erweiterung der Produktionsplanung um Energieaspekte* untergliedert sich anhand der Zielsetzung, den Produktionsfaktor elektrische Energie als Gegenstand der Auftragsplanung zu beschreiben. Hierzu werden im ersten Schritt die relevanten Stammdaten definiert sowie um entsprechende Energiedaten erweitert. Eine Überführung in eine generische Modellierung findet im zweiten Schritt statt, bei welchem mittels arbeits- und leistungsbezogenen Daten der Energiebedarf und das Nachfrageverhalten eines Produktionssystems innerhalb einer Planungsperiode beschrieben werden. Das Resultat ist eine Modellierung des Energiebedarfs der Maschinen, Produkte und Aufträge, die für ein Planungssystem genutzt werden.

Die Modellierung des Lösungsverfahrens bildet eine rollierende Planung im Sinne der Losgrößen-, der Termin- und Kapazitätsplanung sowie der Reihenplanung ab. In jeder Planungssequenz werden aktualisierte Informationen der Modelle berücksichtigt. Dabei gilt es, in einem ersten Schritt die Aufträge, Auftragsprognosen und mittelfristigen Energiebezugsinformationen zu inkludieren. Diese stellen eine initiale Abstimmung zwischen dem Energiebedarf der Aufträge und dem Energiebezug dar, welche durch ein *Makromodell* berechnet wird. Aktualisierte Planungsinformationen des kurzfristigen Energiemodells sowie der Auftragssituation werden mithilfe eines *Mikromodells* berechnet. Das Ergebnis wird der *Maschinenbelegung* als Teillösung zur Verfügung gestellt. Aufgabe ist es, mittels einer zeitlichen Belegungsplanung die Produktionsaufträge in geeigneter Reihenfolge auf die Produktionsanlagen zu verteilen. Hier sind die elektrischen Leistungsbedarfe der Anlagen zu beachten und diese an den Leistungsgrenzen des variablen Lastmanagements auszurichten. Das Ergebnis stellt eine abgestimmte Maschinenbelegungsplanung dar, die der Auftragsfreigabe bzw. der Produktionssteuerung übergeben wird.

Mithilfe des integrierten Lösungsverfahrens, das auf der methodischen Datenbereitstellung der Energiepläne und der erweiterten Auftragsplanung aufbaut, wird eine Ausrichtung der Produktion an ein variables Lastmanagement umgesetzt. Die dafür notwendigen einzelnen Schritte werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

5 Integration der Energiebezugsoptionen in die Auftragsplanung

5.1 Überblick

Dieses Kapitel beschreibt den Produktionsfaktor *elektrische Energie* als Ressource für die Auftragsplanung. Wie bereits in Abschnitt 1.2.2 erläutert, unterliegt der Energiebezug von produzierenden Unternehmen individuellen Zielgrößen, wie u. a. der Wirtschaftlichkeit sowie der Nachhaltigkeit. In Abschnitt 5.2 werden planungsrelevante Parameter zur Beschreibung der Energiebezugsoptionen definiert. Diese dienen als Eingangsgrößen für die Erfassung und Modellierung (Abschnitt 5.3) sowie für die Aggregation und Abbildung (Abschnitt 5.4) von Energiebezugsoptionen im Kontext der PPS. Abschnitt 5.5 überführt die Optionen in standortspezifische Energiemodelle, welche die Grundlage für die Abstimmung im Rahmen des Lösungsverfahrens (vgl. Kapitel 7) darstellen. Abschnitt 5.5. bildet das Fazit dieses Kapitels.

5.2 Bestimmung der relevanten Parameter zur Beschreibung der Energiebezugsoptionen

5.2.1 Allgemeines

Im Rahmen der Planung steht die permanente und zuverlässige Deckung des im Produktionsprozess anfallenden Energiebedarfs im Vordergrund. Der benötigte Strom soll zu möglichst geringen Kosten sowie mit minimierten Emissionen der Produktion zur Verfügung gestellt werden (vgl. Abschnitt 1.3.1). Hieraus ergeben sich exemplarisch vier Parameter des Energiebezugs, die im Rahmen der Produktionsplanung im Fokus stehen und im Folgenden zur Erläuterung gelangen:

- Energiemenge [E], z. B. in kWh
- Leistungsniveau [P], z. B. in kW
- Betriebsabhängige Energiekosten [K], z. B. in $\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$
- Bezugsoptionsabhängige Emissionen [ε], z. B. in $\frac{\text{g}}{\text{kWh}}$

5.2.2 Energiemenge und Leistungsniveau

Die zentrale Zielgröße des Energiebezugs stellt E dar (vgl. Abschnitt 2.3.1). Als zentraler Parameter dient E als Beschreibung der Energiebezugsoptionen. Dabei ist zwischen der absoluten Energiemenge in definierten Perioden (z. B. Quartalen) sowie schwankenden Leistungsniveaus innerhalb bestimmter Zeitintervalle (z. B. 10:00 bis 10:15 Uhr) zu differenzieren. Mit den beiden Parametern P und E ist der Energiebezug demnach hinsichtlich der Zielgröße Energiemenge für die Produktionsplanung beschreibbar. E stellt dabei eine absolute Mengenkennzahl und P eine zeitabhängige Leistungskennzahl dar.

5.2.3 Energiekosten und Emissionen

Neben dem zentralen Parameter der Energiemenge lassen sich weitere Parameter identifizieren, welche direkt an E gekoppelt sind. Zur monetären Beschreibung einer Energiebezugsoption dient Parameter K . Dieser repräsentiert die Kosten einer spezifischen Energiebezugsoption. Die relative Darstellung der Kosten in Bezug zur Energiemenge E besitzt den Vorteil einer besseren Vergleichbarkeit dieser Kosten gegenüber einer absoluten Angabe. Sie zeigt somit die Abhängigkeit der gesamten Stromkosten von der bezogenen Energiemenge. Die Emissionen, die im Rahmen des Energiebezugs anfallen, stellen den vierten Parameter bei der Beschreibung des Energiebezugs dar. Als ein Parameter zur Bestimmung dieser Emissionen erweist sich ε (ICHA & KUHS 2016). Dieser beschreibt z. B. die Menge an CO_2 , welche bei der Erzeugung einer bestimmten Energiemenge E ausgestoßen wird. Ähnlich zu K drückt die relative Beschreibung der Emissionen die Abhängigkeit von der Energiemenge aus und sichert folglich eine exakte Vergleichbarkeit.

5.2.4 Abhängigkeiten der Parameter

Energiemenge, Leistungsniveau, optionsabhängige Energiekosten und Emissionen stellen die planungsrelevanten Parameter des Energiebezugs dar. Abbildung 24 zeigt die Parameter und deren Abhängigkeiten.

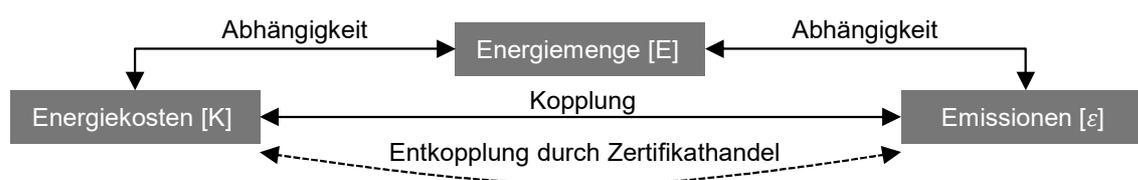


Abbildung 24: Optionsspezifische Abhängigkeiten der Parameter

K und ε stehen in direkter Beziehung zu E . Zwischen K und ε herrscht insofern eine Abhängigkeit, als dass einer bestimmten optionsspezifischen Energiemenge stets ein Preis und eine Emissionsmenge zugeordnet werden kann. Die beiden Zielgrößen sind also über E einer Energiebezugsoption verknüpft. Durch den Handel mit sog. Emissions-Zertifikaten kann diese Abhängigkeit bilanziell entkoppelt werden (MAUBACH 2013). Im Kontext des Energiebezugs ist dies bilanziell als Reduzierung der Emissionen durch eine Erhöhung der Kosten zu verstehen. In der vorliegenden Arbeit findet diese Zertifikate jedoch nicht weiter Betrachtung. Nach der Bestimmung der relevanten Parameter sind die Erfassung und Modellierung für die jeweiligen Bezugsoptionen zu erarbeiten.

5.3 Erfassung und Modellierung der Bezugsoptionen

5.3.1 Allgemeines

Folgender Abschnitt umfasst die Erhebung und allgemeine Modellierung von Parametern der Energiebezugsoptionen. Ziel ist es, mit der allgemeinen Beschreibung der parametrisierten Optionen die Grundlage für die Erstellung von Energieplänen bzw. standortspezifischen Energiemodellen zu schaffen. Wie in Abschnitt 2.3.5 beschrieben, sind die verschiedenen Energiebezugsoptionen in unterschiedliche Kategorien untergliedert. Diese Kategorien weisen Charakteristika auf, welche die Erfassung und Modellierung von zielgrößenspezifischen Parametern beeinflussen. Demzufolge widmen sich die Abschnitte 5.3.2 und 5.3.3 der standorteigenen Stromerzeugung, während Abschnitt 5.3.4 die Strombeschaffung betrachtet.

5.3.2 Kontinuierliche Stromerzeugungsoptionen

Eine allgemeine Definition kontinuierlicher Stromerzeugungsoptionen ist dem Abschnitt 2.3.3.1 zu entnehmen. Im Folgenden sind die verfügbaren Parameter kontinuierlicher Erzeugungsanlagen zu identifizieren sowie in einer geeigneten Form darzustellen.

5.3.2.1 Erfassung der Energiemenge und Leistung

Um E in der Kategorie der kontinuierlichen Erzeugungsanlagen zu beschreiben, kann i. d. R. zwischen unterschiedlichen betriebsabhängigen Werten unterschieden werden.

Zu nennen ist hier bspw.

- der Stromertrag, der am optimalen (opt) Betriebspunkt erzeugt wird, sowie
- der Ertrag, der bei maximalem (max) bzw.
- minimalem (min) Betrieb im Rahmen des definierten Bereichs erzeugt wird.

Da der Betrieb weitgehend konstant ist, stellt die an diesen Betriebspunkten generierte Energie kraftwerkspezifische Werte mit lang- und kurzfristiger Gültigkeit dar. Der Wert am optimalen Betriebspunkt steht im Vordergrund, während Maximal- bzw. Minimalwerte die Steuerbarkeit der Erzeugungsanlage beschreiben. Diese drei exemplarischen Betriebspunkte charakterisieren vereinfacht kontinuierliche Kraftwerke hinsichtlich des Parameters E . Im Fall der kontinuierlichen Erzeugungsoptionen lassen sich den drei Betriebspunkten jeweils die Leistungskennwerte P eindeutig zuordnen. Mit diesen beiden Parametern sind für kontinuierliche Erzeugungsanlagen sowohl mengen- als auch leistungsorientierte Parameter für die Planung verfügbar, mit denen die Charakteristik für beliebige Perioden und Intervalle beschrieben wird.

5.3.2.2 Erfassung der Energiekosten und Emissionen

Um eine bessere Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Optionen zu gewährleisten, ist der Parameter K auf die variablen Betriebskosten reduziert. Diese setzen sich vor allem aus den Kosten für die verwendeten Primärenergieträger sowie den Wartungskosten zusammen. Die Betriebspunkte kontinuierlicher Kraftwerke besitzen leistungsspezifische Werte für den Primärenergieverbrauch, die bei der jeweiligen Betriebsweise anfallen. Diese Parameter sind zu erheben und zu modellieren. Emissionen werden durch den Parameter ε beschrieben. Zur Erhebung von ε stehen Datenbanken, wie bspw. GEMIS (IINAS 2017), zur Verfügung, welche für sämtliche Brennstoffe sog. Emissionsfaktoren vorhalten. Aus den kraftwerkspezifischen und betriebsbedingten Brennstoffverbräuchen lassen sich somit die Emissionen der Stromerzeugung für die jeweilige Erzeugungsoption berechnen (SCHMITZ & SCHAUMANN 2010).

5.3.2.3 Modellierung der kontinuierlichen Stromerzeugungsoptionen

Eine allgemeine Modellierung für die Parameter kontinuierlichen Stromerzeugungsoptionen dient als Grundlage für die spätere Generierung von Energieplänen. Da der zeitliche Verlauf der Stromerzeugung das wesentliche Unterscheidungs-

merkmal der verschiedenen Energiebezugskategorien darstellt, sind die diversen Optionen mittels unterschiedlicher Zeitreihen mengenmäßig abzubilden. Es bieten sich bspw. jährliche, monatliche oder tägliche Zeitreihen an. Da die Leistung nicht von der Zeit, sondern von der Betriebsweise abhängig ist, ist für die Darstellung kein zeitliches Raster zu definieren, wodurch auch die Kontinuität der Stromerzeugung deutlich hervorgehoben wird. Die Parameter bezüglich der Kosten und der Emissionen werden mit den Leistungswerten verknüpft. Abbildung 25 zeigt eine tabellarische sowie grafische Darstellung der energiebezugsorientierten Parameter einer kontinuierlichen Erzeugungsanlage.

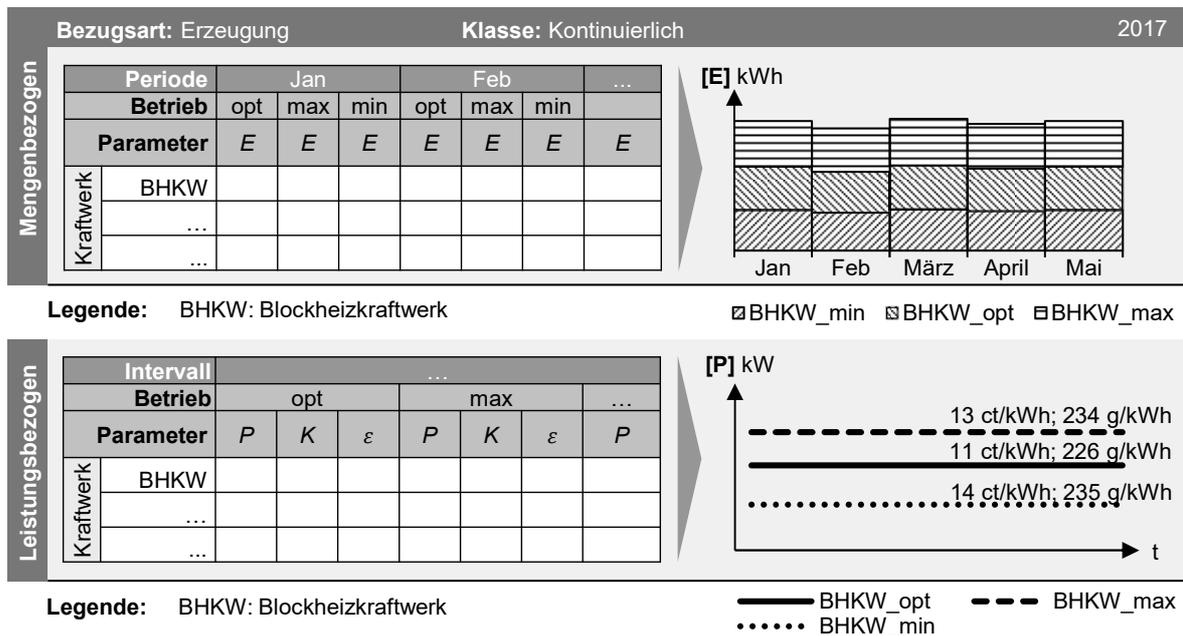


Abbildung 25: Modellierung der kontinuierlichen Stromerzeugungsoptionen

Neben den kontinuierlichen Erzeugungsanlagen stehen u. U. weitere Bezugsoptionen zur Verfügung. Daher behandelt der folgende Abschnitt die Parametererfassung und -darstellung für fluktuierende Erzeugungsanlagen.

5.3.3 Fluktuierende Stromerzeugungsoptionen

Eine allgemeine Definition fluktuierender Stromerzeugungsoptionen ist Abschnitt 2.3.3.2 zu entnehmen. Im Folgenden sind relevante Parameter zu identifizieren sowie in eine geeignete Modellierung zu überführen.

5.3.3.1 Erfassung der Energiemenge und Leistung

Aufgrund der stochastischen Energiebereitstellung ermöglichen fluktuierende Kraftwerke wie PVA und WKA keine planbare Energieerzeugung. Der zeitliche Verlauf der Energieerzeugung kann deshalb nicht anhand von konstanten Parametern, sondern lediglich mithilfe von Prognosedaten dargelegt werden. Bei der Prognostizierung wird hier zwischen zwei Arten differenziert:

- Abschätzung aus historischen Erzeugungsdaten
- Prognose aus zukünftigen Wetterdaten

Bei einer vergangenheitsbasierten Ertragsprognose werden monatliche Durchschnittswerte der vergangenen Jahre für die Vorhersage der erzeugten Energiemenge herangezogen. Allerdings weisen diese Werte eine hohe Ungenauigkeit auf, da sich die Wetterlage von Jahr zu Jahr stark unterscheidet. Aufgrund dieses Mangels ist eine Verwendung der Vergangenheitswerte lediglich mittel- bis langfristig sinnvoll. Kurzfristig bieten sich zukunftsorientierte Ertragsprognosen auf Basis von Wettervorhersagen an. Kleine Zeitraster von Stunden bis Minuten beschreiben die durchschnittliche Kraftwerksleistung bzw. den zu erwartenden Energieertrag. Die Werte werden von verschiedenen Dienstleistern zur Verfügung gestellt (METEOCONTROL 2017, SOLARSERVER 2017). Jedoch weisen die Prognosen nur bis zu vier Tage im Voraus eine ausreichende Genauigkeit auf und unterliegen einer beschreibbaren Unsicherheit (KELLER ET AL. 2016B; KELLER ET AL. 2016C). Diese Unsicherheit wird durch verschiedene Kennzahlen ausgedrückt sowie dem Prognosewert hinzugefügt. Beispiele hierfür sind

- die Standardabweichung σ (Sigma),
- der Root Mean Squared Error (RMSE) (BÜHRER ET AL. 2014) oder
- der Mean Absolut Error (MAE) (PELLAND ET AL. 2013).

Analog zu den minimalen und maximalen Werten der kontinuierlichen Kraftwerke spielen die Abweichungen zunächst eine untergeordnete Rolle. Für E und P der fluktuierenden Erzeugungsanlagen stehen somit die benötigten Informationen inkl. deren Abweichungen durch Prognosedienste zur Verfügung. Im Gegensatz zu den kontinuierlichen Erzeugungsanlagen beschreiben die Parameter der zukunftsorientierten Prognosen nicht nur errechnete Energiemengen für bestimmte Perioden, sondern drücken vordergründig aus, welches Leistungsniveau P zu bestimmten Zeitintervallen vorliegt. In der weiteren Darstellung ist dies zu berücksichtigen.

5.3.3.2 Erfassung der Energiekosten und Emissionen

Ähnlich wie bei den kontinuierlichen werden die fluktuierenden Kraftwerke im Rahmen des Energiebezugs nach ihren variablen Kosten und Emissionen erfasst. Da fluktuierende Energieerzeugungsoptionen auf regenerativer Basis betrieben werden, spielen die Parameter K und ε eine untergeordnete Rolle. Betrachtet man analog zu kontinuierlichen Kraftwerken ausschließlich die unmittelbar bei der Stromerzeugung anfallenden Betriebskosten sowie Emissionen, ergeben sich für fluktuierende Kraftwerken Erzeugungskosten und -emissionen gegen Null. Auch beim Betrieb der Erzeugungsanlagen anfallende Wartungskosten treten dabei in einer vernachlässigbaren Größenordnung auf. Deshalb werden für die Parameter K und ε von fluktuierenden Anlagen als Näherung keine Werte für die Planung erfasst.

5.3.3.3 Modellierung der fluktuierenden Stromerzeugung

Die allgemeine Modellierung der Parameter fluktuierender Bezugsoptionen erfolgt ähnlich zu kontinuierlichen Kraftwerken. Für jede Erzeugungsanlage ist lediglich ein Leistungs- bzw. ein Mengenwert darzustellen. Abbildung 26 zeigt die tabellarische und grafische Darstellung mit einem exemplarischen Zeitraster von Monatswerten für E sowie mit 15-minütigen Werten für Parameter P .

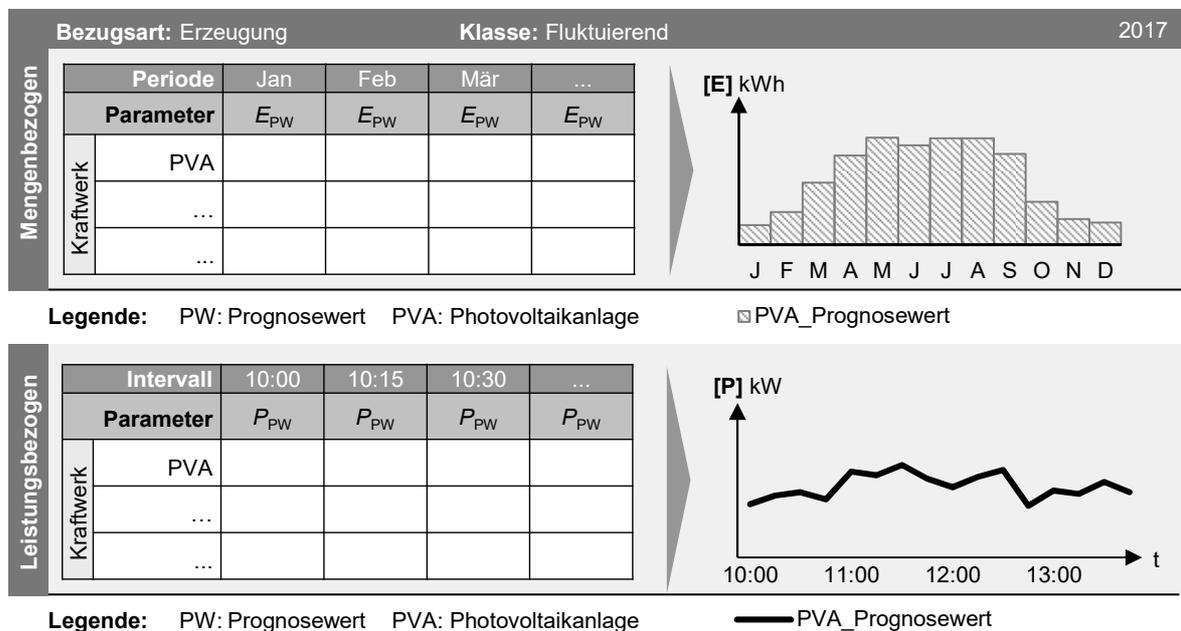


Abbildung 26: Modellierung der fluktuierenden Stromerzeugungsoptionen

Nach der allgemeinen Darstellung der Kennzahlen der beiden Bezugskategorien der Energieerzeugung folgen nun die Erfassung und Abbildung der Kennzahlen der Energiebeschaffungsoptionen. Diese werden im folgenden Abschnitt zusammengefasst und für die Planung beschrieben.

5.3.4 Preisfixierte und -variable Strombeschaffungsoptionen

Eine allgemeine Definition der Strombeschaffung ist Abschnitt 2.3.4 zu entnehmen. Im Folgenden sind relevante Parameter zu identifizieren sowie in eine geeignete Darstellung zu überführen. Wesentlicher Unterschied zwischen der Strombeschaffung und der Stromerzeugung am Standort besteht darin, dass sich bei der Beschaffung die Beurteilung und Vergleichbarkeit der Optionen hinsichtlich K und ε im Vordergrund befinden. Abgesehen von allgemeinen technischen und finanziellen Restriktionen kann die Planung dabei theoretisch auf Energie in unbestimmter Höhe zurückgreifen. Somit sind im Rahmen der Planung die Beschaffungsentscheidungen anhand vorgegebener Zielgrößen abzustimmen.

5.3.4.1 Erfassung der Energiekosten und Emissionen

Die Energiekosten werden allgemein durch den Beschaffungspartner (z. B. Erzeuger oder Händler) angegeben bzw. den verschiedenen Tarifen charakteristisch zugeordnet. Weitere Preisinformationen werden von den verschiedenen Märkten vorgegeben und sind öffentlich verfügbar (EEX 2017, EPEX 2017). Alle Beschaffungsoptionen besitzen somit spezifische Werte für ihre Kosten, wodurch der Parameter K beschrieben wird. Informationen über die CO₂-Emissionen sind anhand des Emissionsgehalts im deutschen Strommix ermittelbar. Der Jahresdurchschnittswert errechnet sich aus den jährlichen Emissionen des deutschlandweiten Kraftwerkparks (ICHA & KUHS 2016). Die stetige Erhöhung erneuerbarer Energieträger führt dazu, dass innerhalb eines Jahres bzw. eines Tages ebenfalls der Verlauf der Emissionen im deutschen Stromsystem schwankt. Derzeit bieten Stromanbieter kaum Informationen über spezifische und zeitliche Emissionsaufkommen an. Diese sind allerdings analog zum bundesweiten Emissionsgehalt auf Basis der vom Stromhändler beschafften Strommarktprodukte berechenbar und den spezifischen Beschaffungsoptionen neben den Kosten hinzuzufügen. Eine tabellarische und grafische Darstellung ist dem nächsten Abschnitt zu entnehmen.

5.3.4.2 Modellierung der Strombeschaffung

Die allgemeine Modellierung der Beschaffungsoptionen zeigt Abbildung 27 exemplarisch. Hierbei wird zum einen ein fixiertes Terminmarktprodukt über einen Zeitraum von mehreren Monaten dargestellt. Zum anderen findet sich darunter die Darstellung eines variablen Spotmarktproduktes, welches in einer stündlichen Zeitreihe abgebildet wird. Die verschiedenen Optionen unterscheiden sich durch das Zeitraster, nicht jedoch durch die Art und Weise der Darstellung. Wesentliches Kriterium zur Darstellung der unterschiedlichen Beschaffungsoptionen ist die Informationsbereitstellung. Während Informationen von fixierten Optionen bereits Monate oder Jahre im Voraus vorliegen, sind die Daten für variable Preisinformationen erst sehr kurzfristig (z. B. einen Tag im Voraus) verfügbar.

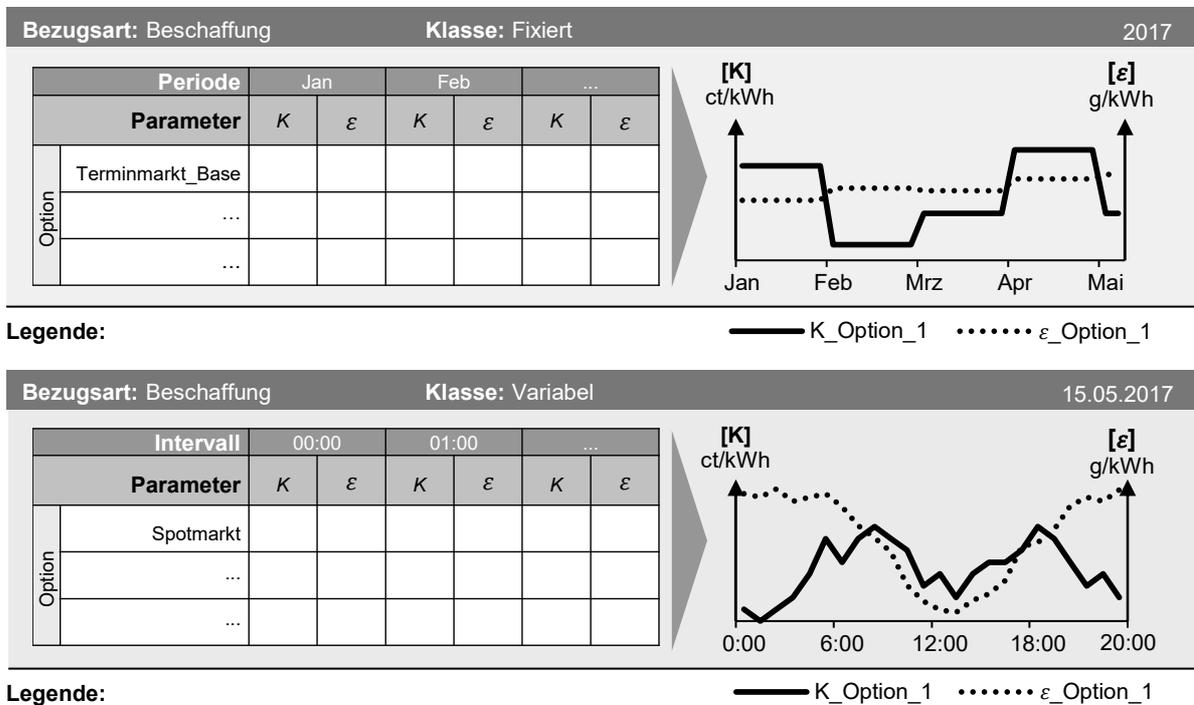


Abbildung 27: Modellierung der Strombeschaffung

Im nächsten Schritt sind die Stromerzeugungs- und Strombeschaffungsoptionen in aggregierter Form der Planung zur Verfügung zu stellen. Mit dem Vergleich unterschiedlicher Optionen lassen sich diese zur Kaufentscheidung heranziehen.

5.4 Aggregation und Modellierung des standortspezifischen Energiebezugs für die Auftragsplanung

5.4.1 Allgemeines

Die wesentliche Zielstellung der Aggregation und Modellierung des standortspezifischen Energiebezugs bezieht sich auf die Kombination von Energiebezugsoptionen sowie eine zweckmäßige, zeitliche Ausrichtung hinsichtlich der Anforderungen der Planung. Dies umfasst die mengen- und leistungsorientierte Darstellung des Energiebezugs in unterschiedlichen Zeitreihen.

5.4.2 Aggregation der Stromerzeugung

Durch die Parametererfassung und -darstellung in Abschnitt 5.3 wird deutlich, dass bei den Erzeugungsoptionen die Parameter E und P im Fokus der Aggregation stehen. Beide Erzeugungskategorien weisen eine weitgehend identische Abbildung auf, weshalb der Verlauf der erbrachten Stromerträge unterschiedlicher Erzeugungsanlagen über eine definierte Zeitreihe darstellbar ist. Durch die kumulierte Betrachtung der Erzeugungsoptionen wird ersichtlich, welcher Gesamtstromertrag in welcher Periode bzw. welches Leistungsniveau in einem Zeitintervall zur Verfügung steht.

5.4.2.1 Mengenbezogene Aggregation der Stromerzeugung

Die mengenbezogene Aggregation weist einen Horizont von mehreren Schichten bis Jahren auf. Damit stellt diese die Basis für eine mengenorientierte Produktionsplanung dar. Die Erzeugungsoptionen liefern geeignete Parameter, um die Auftragsplanung an dem Energiebezug auszurichten. Die Kennzahlen der kontinuierlichen Erzeugungsanlagen haben lang- und kurzfristige Gültigkeit. Der Energieertrag fluktuierender Erzeugungsanlagen lässt sich anhand von vergangenheitsbasierten Vorhersagen monatsgenau für das gesamte Jahr prognostizieren. Um die Zusammenführung zu vereinfachen, werden bei der Aggregation die Parameter auf ein Mindestmaß an Informationen reduziert.

So wird von kontinuierlichen Kraftwerken lediglich die am optimalen Betriebspunkt erzeugte Energie abgebildet. Die Maximal- bzw. Minimalwerte werden nicht dargestellt, können aber im Rahmen einer expliziten Betrachtung einzelner Szenarien abgebildet werden. Die Aggregation für die optimalen Betriebspunkte enthält zudem die Kosten sowie die Emissionen der Erzeugung. Der Stromertrag der fluk-

tuerenden Kraftwerke wird anhand der übermittelten Prognosewerte hinterlegt. Ähnlich werden bei den minimalen und maximalen Betriebspunkten die Prognoseabweichungen gesondert dokumentiert und für etwaige Szenariorechnungen genutzt. Neben der langfristigen mengenbezogenen Aggregation gilt es, die Stromerzeugung für eine kurzfristige leistungsorientierte Betrachtung für die Planung aufzubereiten. Dies findet im folgenden Abschnitt statt.

5.4.2.2 Leistungsbezogene Aggregation der Stromerzeugung

Die leistungsbezogene Aggregation weist einen Horizont von mehreren Tagen bis Minuten auf. In diesem Zeitraum erfolgt im Rahmen der Produktionsplanung u. a. die Feinterminierung bzw. Reihenfolgeplanung. Kontinuierliche Kraftwerke stellen dazu P zur Verfügung. Die Erträge fluktuierender Anlagen werden kurzfristig anhand von Wetterprognosen integriert. Der Zeithorizont dieser Vorhersagen umfasst Zeitreihen von fünf Minuten bis zu einer Stunde. Somit ist eine leistungsorientierte Aggregation der standortspezifischen Stromerzeugung realisiert.

5.4.2.3 Modellierung der aggregierten Stromerzeugung

Der grafischen Aufbereitung liegen Datentabellen der benötigten Parameter zugrunde, welche als Eingangsinformationen für die Planung genutzt werden. Exemplarisch zeigt die Abbildung ein Kraftwerkspark mit vier Erzeugungsanlagen. Der Zeithorizont des kurzfristigen Energieplans beträgt beispielhaft vier Tage und weist ein stündliches Zeitraster auf. Abbildung 28 bietet eine mengen- und leistungsbezogene Darstellung der Energieerzeugungsoptionen.

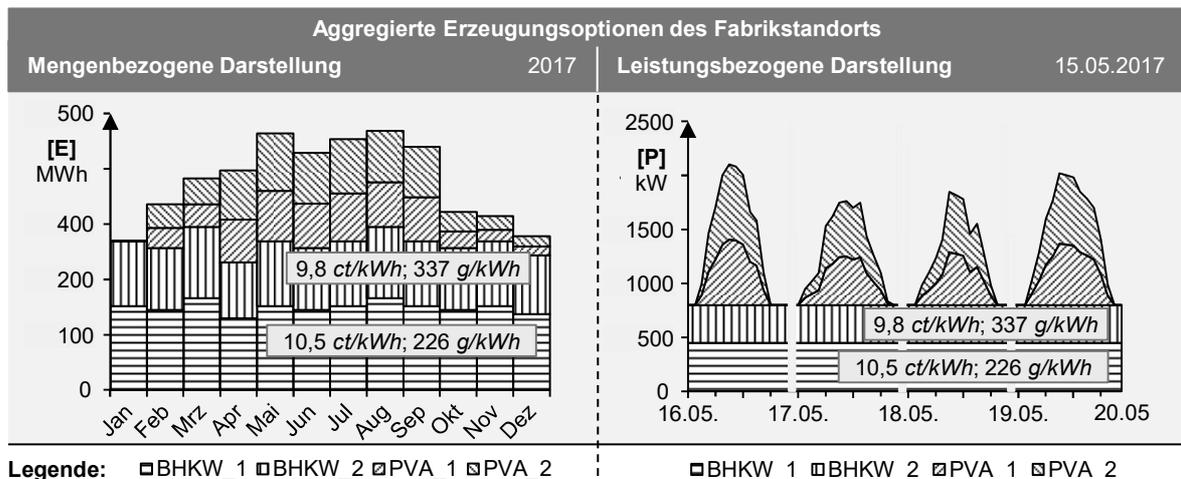


Abbildung 28: Aggregierte Modellierung der Stromerzeugung

Im Anschluss an die Modellierung der aggregierten internen Energiebezugsoptionen beschreibt folgender Abschnitt die Aggregation der Energiebeschaffung für die Planung.

5.4.3 Aggregation der Strombeschaffung

Die Parameterdarstellungen sowohl der fixierten als auch der variablen Beschaffung haben einen weitgehend identischen Aufbau. Da sich die Betrachtungszeiträume der preisfixierten und der preisvariablen Optionen voneinander unterscheiden, ist eine gemeinsame Darstellung der beiden Kategorien lediglich bedingt möglich. Dennoch ist es sinnvoll, eine für beide Kategorien gültige Darstellungsform zu definieren, um damit eine durchgängige Planung realisieren zu können. Wie die internen Energieerzeugungsoptionen stellen auch die Energiebeschaffungsoptionen teils lang- und teils kurzfristige Informationen in Form von Parametern zur Verfügung. Im Gegensatz zu den Erzeugungsoptionen treten bei der Beschaffung andere Parameter in den Vordergrund. Jedoch ist in der Darstellung zwischen den fixierten und variablen Beschaffungsoptionen zu differenzieren.

5.4.3.1 Aggregation der fixierten Strombeschaffung

Die Aggregation der fixierten Optionen gilt für einen Zeitraum von mehreren Wochen bis zu einem Jahr. Während einige Beschaffungsoptionen über das gesamte Jahr konstante Kostenparameter vorweisen, zeichnen sich andere durch unterjährig Preisabstufungen aus. Um die zeitlichen Verläufe der Parameter K und ε darzustellen, sind diese über der gemeinsamen Zeitachse anzutragen. Lediglich der betrachtete Zeithorizont ist aufgrund der Ausrichtung auf die Produktionsplanung auf eine Planungsperiode (z.B. ein Jahr) zu normieren.

5.4.3.2 Aggregation der variablen Strombeschaffung

Die Aggregation der variablen Optionen ist analog zum vorherigen Abschnitt 5.4.3.1 aufgebaut. Einzig der betrachtete Zeitraum unterscheidet sich. Preisvariable Beschaffungsoptionen besitzen i. d. R. nur einen Zeithorizont von weniger als 24 Stunden (z. B. der Day-ahead-Spotmarkt). Für diese Zeitspanne werden sämtliche vorhandenen preisvariablen (pv) Beschaffungsoptionen angezeigt. Neben den preisvariablen Optionen können in der kurzfristigen Aggregation der variablen Tarife auch bereits beschaffte preisfixierte (pf) Optionen dargestellt werden. Sie stellen keine alternative Möglichkeit dar, Energie zu beschaffen, sondern dienen vielmehr

als Vergleich zu den variablen Optionen. So ist aus der Aggregation ersichtlich, ob der bereits beschaffte Strom verglichen mit den preisvariablen Optionen zu einem günstigeren oder teureren Preis gekauft wird. Dadurch lassen sich die preisvariablen kurzfristigen Beschaffungsoptionen zusätzlich bewerten.

5.4.3.3 Modellierung der aggregierten Strombeschaffung

Abbildung 29 zeigt die aggregierte Modellierung der Strombeschaffung. Exemplarisch sind zwei verschiedene preisfixierte (pf) Beschaffungsoptionen abgebildet, welche auf der rechten Seite miteinander verglichen werden. Links befindet sich ein Vergleich unterschiedlicher preisvariabler (pv) Optionen. Diese werden durch die Parameter einer preisfixierten Beschaffungsoption ergänzt. Neben der grafischen Darstellung liegen die Datensätze der Planung vor, welche diese als Eingangsinformationen für die Auftragsplanung nutzt.

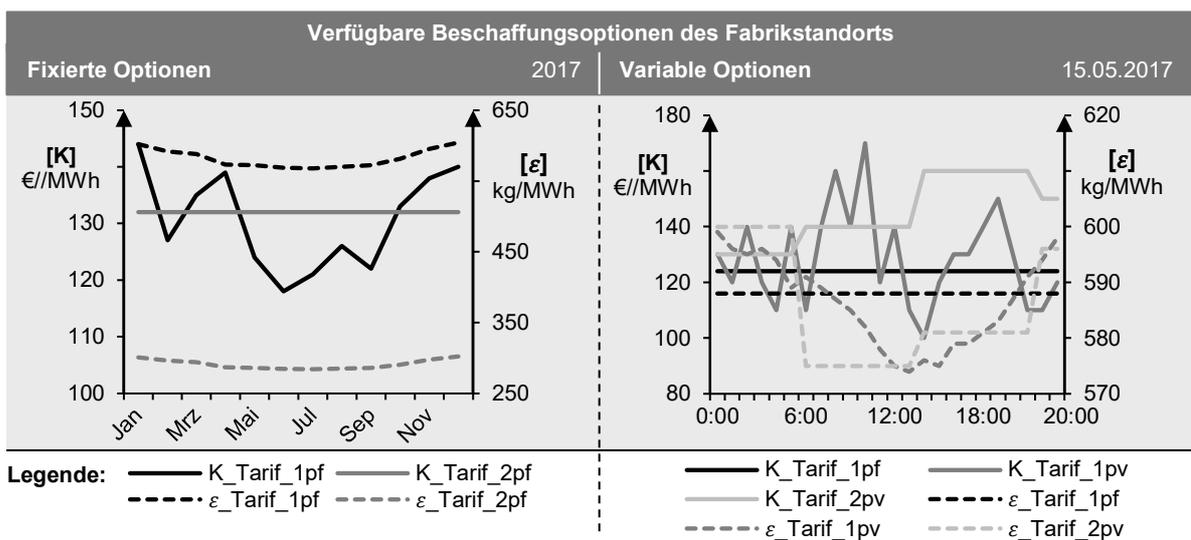


Abbildung 29: Modellierung Darstellung der Strombeschaffung

Die aggregierte Darstellung der Bezugsoptionen dient im Folgenden als Grundlage, um beide Bezugskategorien im Rahmen der Planungsaufgaben zu verknüpfen. Im nächsten Abschnitt werden aus diesen Informationen Energiemodelle für die sequenzielle Abstimmung des Lösungsverfahrens (vgl. Kapitel 7) erstellt. Die erarbeiteten Modelle bilden die Eingangsinformationen für eine Entscheidungsfindung in der Losgrößen-, der Termin- und Kapazitäts- sowie der Reihenfolgeplanung.

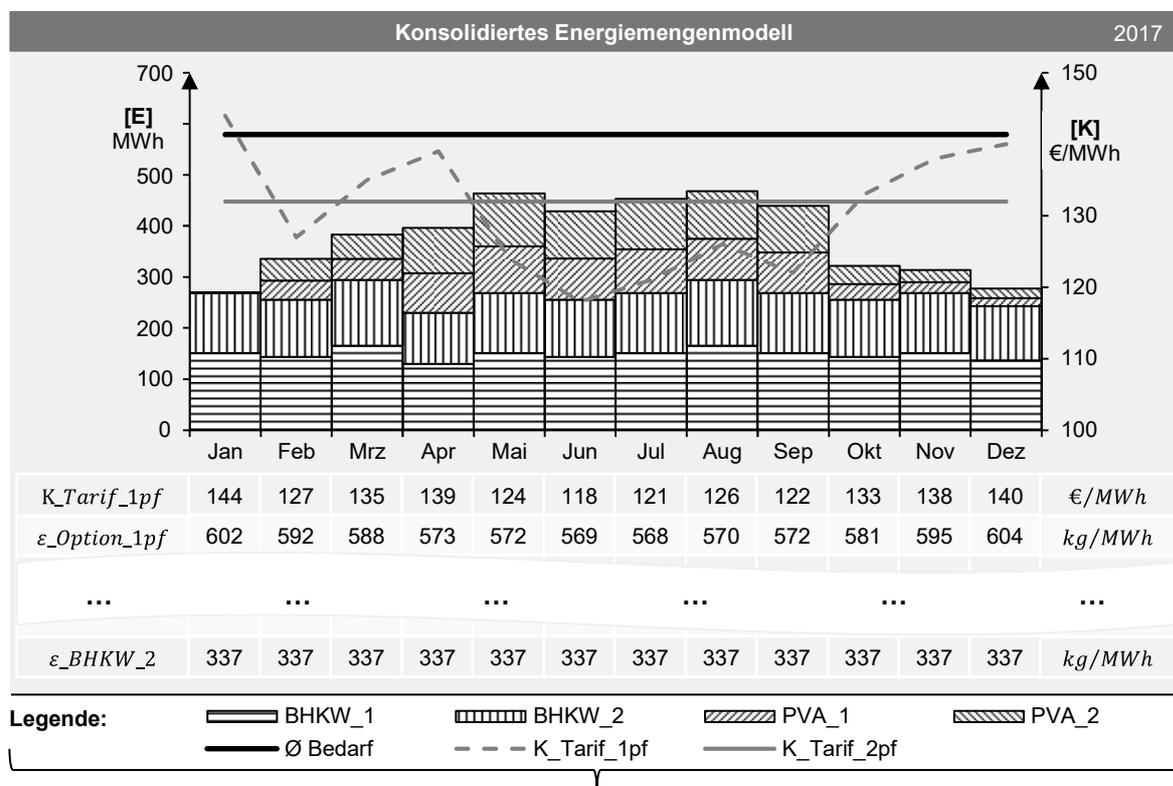
5.5 Generierung der Energiemodelle für die Auftragsplanung

5.5.1 Allgemeines

Ziel der Generierung von Energiemodellen ist die Zusammenfassung der aggregierten Energiebezugsinformationen in einer übergreifenden Darstellung, die als Planungsgrundlage dient. Damit werden der Produktionsplanung vorhandene Beschaffungsoptionen als Erzeugungsoptionen eines Standortes in konsolidierter Form zur Verfügung gestellt. Sämtliche erfassten Parameter sind hier vollständig darzustellen, um für den betrachteten Zeitraum eine zusätzliche Energiebeschaffung bzw. eine abgestimmte Auftragsplanung zu veranlassen. Dazu wird als Eingangsgröße zwischen einem Energiemengen- sowie einem Leistungsmodell differenziert.

5.5.2 Erstellung des Energiemengenmodells

Das Energiemengenmodell leitet sich aus den Daten der mengenbezogenen Erzeugungs- sowie der fixierten Beschaffungsoptionen ab. Abbildung 30 veranschaulicht ein Mengenmodell mit zwei Erzeugungsoptionen und einer Beschaffungsoption.



Energie als mengenbezogenes Planungselement in der PPS

Abbildung 30: Darstellung des konsolidierten Energiemengenmodells

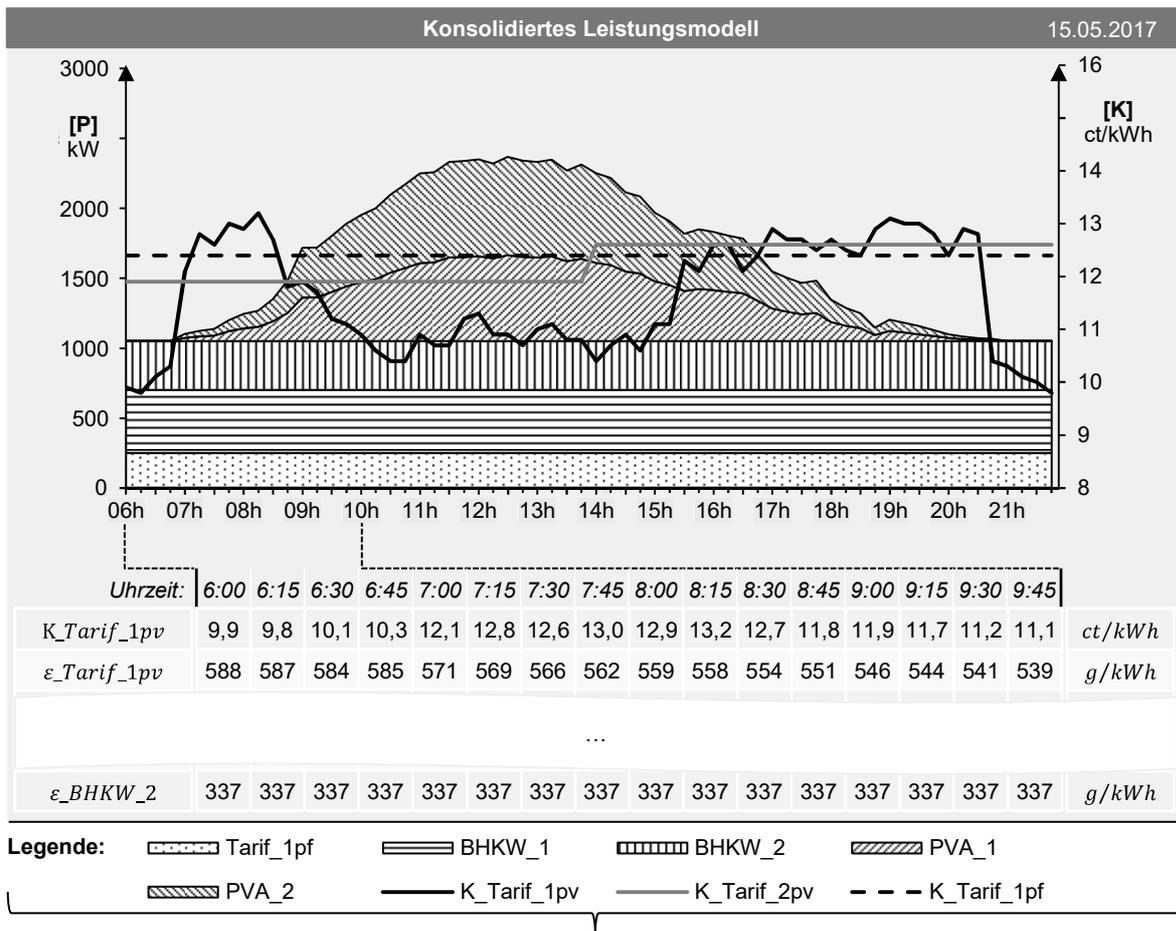
Der betrachtete Zeithorizont umfasst hier Zeitreihen von mehreren Schichten bis zu einem Jahr. Der Aufbau der Energiemengenmodelle beruht grundsätzlich auf der mengenbezogenen Darstellung der Erzeugungsoptionen. So wird die kumulierte Energiemenge E der einzelnen Erzeugungsanlagen in einer Balkendarstellung zusammengefasst. Aufgrund der Mengenorientierung der Losgrößen- sowie Termin- und Kapazitätsplanung erfolgt auf Basis dieser Eingangsdaten ein Bestandsabgleich. In dieser Konsolidierung sind die Parameter der Beschaffungsoptionen hinsichtlich K und ε zu integrieren. Dies ist in einer tabellarischen, jedoch nicht in einer grafischen Darstellung realisierbar. Da es sich bei den Energiekosten für produzierende Unternehmen i. d. R. um die wichtigeren Kennzahlen beim Energiebezug handelt, finden diese in der Darstellung Berücksichtigung. Die Emissionen werden unterhalb der grafischen Darstellung durch eine Datentabelle eingefügt, welche die Parameter K und ε einer Beschaffungsoption dokumentiert. Außerdem ist es zweckmäßig, die Kennzahlen der Kosten und Emissionen der kontinuierlichen Erzeugungsanlagen zu integrieren. Dies gewährleistet einen ganzheitlichen Überblick über K und ε sämtlicher Bezugsoptionen. Für die Reihenfolgeplanung eignet sich das Modell nicht, daher gilt es im nächsten Abschnitt, das Leistungsmodell zu definieren.

5.5.3 Erstellung des Leistungsmodells

Analog zu dem Mengenmodell lässt sich das Leistungsmodell aus den aggregierten Informationen der Beschaffungs- und Erzeugungsoptionen erstellen. Der Betrachtungszeitraum umfasst bis zu vier Tage, da für diesen Zeitraum weitgehend zuverlässige Prognosen für den Ertrag fluktuierender Erzeugungsanlagen gegeben sind (KELLER ET AL. 2016B). Die Parameter K und ε der variablen Beschaffungsoptionen liegen jedoch i. d. R. lediglich mit einem Zeithorizont von maximal 24 Stunden vor. Zudem besteht die Möglichkeit, mittels Kaufoptionen auch über diese 24 Stunden hinaus Energie zu beschaffen. Je kürzer der Horizont ist, desto zuverlässiger sind die Parameter der fluktuierenden Erzeugungsanlagen und der Beschaffungsoptionen. Das Zeitraster liegt bspw. im Bereich von fünf Minuten, 15 Minuten oder einer Stunde. Der Aufbau des Leistungsmodells orientiert sich an der in Abschnitt 5.5.2 definierten Mengendarstellung. Wesentlicher Unterschied ist der Parameterwechsel von E zu P über der Zeitachse. Eine Besonderheit bei diesem Leistungsmodell besteht darin, dass fixierte Beschaffungsoptionen ebenfalls abgebildet werden. Das bedeutet, dass die bereits am Strommarkt gekaufte kontinuierliche Leistungsabnahme gemeinsam mit den Erträgen der Erzeugungsanlagen abgebildet wird. Abbildung 31 zeigt exemplarisch ein konsolidiertes Leistungsmodell. Überdies werden eine bereits gekaufte Beschaffungsoption sowie zwei mögliche preisvariable Be-

schaffungsoptionen dargestellt. Das Modell umfasst einen Zwei-Schicht-Horizont im 15-Minuten Zeitraster.

Mit der konsolidierten Darstellung liegen der Planung nun alle relevanten Parameter für die Entscheidungsfindung im Rahmen der Lösungsverfahren vor. Zwischenzeitliche Energiebeschaffungsentscheidungen beeinflussen die Modelle und bedingen eine Aktualisierung. Abschließend sind für die Reihenfolgeplanung der Aufträge definierte Lastmanagementstufen abzuleiten, welche die standortspezifische Erzeugung durch den Energieeinkauf ergänzen.



Energie als leistungsbezogenes Planungselement in der PPS

Abbildung 31: Darstellung des konsolidierten Leistungsmodells

5.5.4 Ableitung variabler Lastmanagementstufen für die Reihenfolgeplanung

Das Mengen- und Leistungsmodell dient einerseits zur Grobplanung und Abstimmung zwischen Energieangebot und -bedarf, andererseits zur Visualisierung und zum Vergleich unterschiedlicher Beschaffungsoptionen. Das Mengenmodell eignet

sich besonders für die Losgrößen- sowie die Termin- und Kapazitätsplanung, um Beschaffungsentscheidungen auf Basis des Produktionsprogramms zu treffen. Allerdings besteht bei der Reihenfolgeplanung die Herausforderung, die veranschlagte Energiemenge z. B. eines Tages durch eine abgestimmte Auftragsplanung abzunehmen. In diesem Zusammenhang dient das Leistungsmodell als erster Anhaltspunkt für den Energieeinkauf. Mithilfe aktueller Planungsdaten der Produktion wird dem Energieeinkauf der durchschnittliche Leistungsbedarf der Anlagen für den Tag übermittelt. Aus den Daten der Produktion sowie der variablen Beschaffungsoptionen wird ein abgestuftes Lastmanagement erstellt, welches der Reihenfolgeplanung als Eingangsgröße übermittelt wird. Abbildung 32 stellt diesen Vorgang exemplarisch dar. Aus dem kontinuierlichen Leistungsbedarf werden bspw. auf Basis der Kosteninformationen weitere Laststufen definiert, welche bei höheren Kosten geringe und bei geringeren Kosten höhere Leistungsabnahmen vorschlagen (KELLER ET AL. 2015).

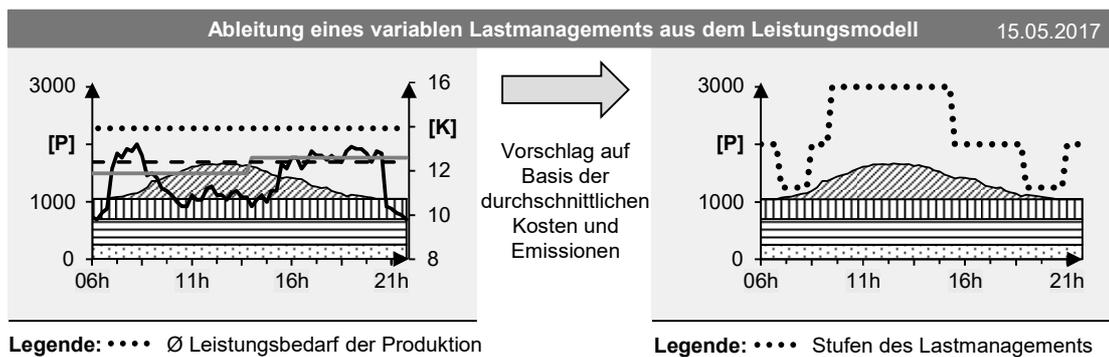


Abbildung 32: Definition der Leistungsstufen auf Basis des Leistungsmodells

Auf Basis dieser Informationen entscheidet der Energieeinkauf über eine mögliche zusätzliche Beschaffung. Dabei finden die Resultate aus dem Lösungsverfahren Berücksichtigung, da diese die Realisierbarkeit der Laststufen ermitteln.

5.6 Fazit

Vorliegender Abschnitt zeigt ein methodisches Vorgehen auf, um planungsrelevante Parameter der unterschiedlichen Energiebezugsoptionen in die Aufgaben der Auftragsplanung zu integrieren. Im ersten Schritt werden relevante Parameter definiert, welche die Charakteristik des Energiebezugs beschreiben, bevor im zweiten Schritt für die spezifischen Bezugsoptionen Planungsparameter erfasst und dargestellt werden. Im Anschluss werden diese in einer aggregierten Darstellung zusammengeführt, um eine bessere Vergleichbarkeit zu realisieren. Diese Informationen bilden

Integration der Energiebezugsoptionen in die Auftragsplanung

die Basis für die konsolidierten Energiemodelle, welche für die unterschiedlichen Entscheidungsmodelle des Lösungsverfahrens als Eingangsgröße dienen. Abbildung 33 ordnet die generierten Modelle dem Ablauf der Auftragsplanung zu. Damit wird ein Planungsablauf dazu befähigt, zum einen das mengenmäßige Energieangebot zwischen Planungsperioden zu berücksichtigen sowie zum anderen die Abstimmung der Leistungsgrenzen innerhalb einer Planungsperiode durch die Vorgabe eines variablen Lastmanagements auszurichten.

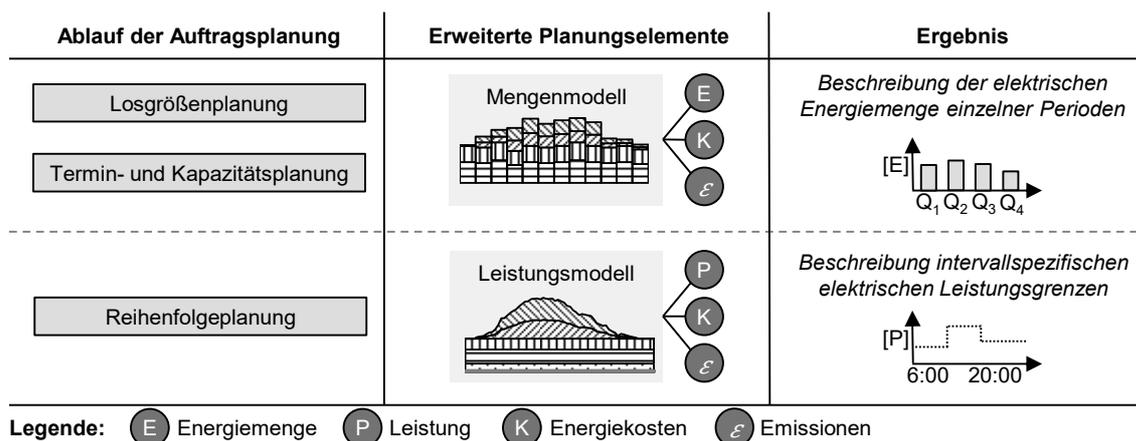


Abbildung 33: Erweiterter Ablauf der Auftragsplanung um Energiebezugsoptionen

Bei der Abstimmung der Energiebeschaffung handelt es sich um einen Teil des sequenziellen Lösungsverfahrens, welches in Kapitel 7 behandelt wird. Die kennzahlenbasierte Beschreibung des Energiebedarfs von Produktionssystemen ist dafür eine wesentliche Voraussetzung und Bestandteil des folgenden Kapitels.

6 Integration energieorientierter Kennzahlen in auftragsbezogene Planungselemente

6.1 Übersicht

Ziel dieses Kapitels ist es, den Produktionsfaktor *elektrische Energie* als Gegenstand der Auftragsplanung zu formulieren. In Abschnitt 6.2 werden die relevanten Stammdaten definiert sowie um entsprechende Energiedaten erweitert. Eine Überführung in eine generische Modellierung erfolgt in den Abschnitten 6.3 und 6.4. Die vorgestellten Modellierungsansätze erlauben es, mithilfe arbeits- und leistungsbezogener Daten den Energiebedarf und das Nachfrageverhalten eines Produktionssystems innerhalb einer Planungsperiode zu beschreiben. Das Resultat wird in einem geeigneten Lösungsverfahren (vgl. Kapitel 7) genutzt, um die Produktion an ein definiertes Energieangebot (vgl. Kapitel 5) anzupassen. Abschnitt 6.5 schließt mit einem Fazit dieses Kapitels.

6.2 Stammdatengenerierung der Planungselemente

6.2.1 Allgemeines

Die Grundlage für die Ausrichtung eines Produktionssystems an die Charakteristika des Energiebezugs setzt die Kenntnis von spezifischen Betriebs- und Energiezuständen voraus. Hier sind die Betriebsdaten systematisch zu erfassen sowie die Elemente der Auftragsplanung (vgl. Abschnitt 2.2.6) zu ergänzen. Abschnitt 6.2.2 führt dazu Ansätze der Betriebs- und Energiedatenerfassung ein. Anschließend gelangen in den Abschnitten 6.2.3 und 6.2.4 die Erfassung und Darstellung vom Anlagen- und Energiedaten zur Erläuterung. Schließlich werden die Daten mit den relevanten Elementen der Auftragsplanung in Beziehung gesetzt (Abschnitt 6.2.5). Dies bildet die Basis für den Ablauf zur Generierung der Energiebedarfsmodelle.

6.2.2 Betriebsdatenerfassung

Die Erfassung von Betriebsdaten in einer Produktion soll eine höhere Transparenz hinsichtlich der Produktionssituation sicherstellen (KURBEL 2016). Aufgabe der BDE ist es, Daten der Produktion aufzunehmen und diese, bspw. einem PPS-System, für die weitere Verarbeitung zur Verfügung zu stellen. In Bezug auf die Auftragsplanung werden die Daten der BDE in Form von Stammdaten zusammen-

Integration energieorientierter Kennzahlen in auftragsbezogene Planungselemente

geführt, welche zur Erstellung realistischer Produktionspläne bzw. zur Aktualisierung historischer Stammdaten eingesetzt werden (KURBEL 2016). Eine realistische Erstellung von Produktionsplänen sowie eine regelmäßige Datenaktualisierung sind nach GEIGER (2015) notwendig, um die Planungsgenauigkeit zu erhöhen sowie den Einsatz von aufwendigen Korrekturmaßnahmen in der Produktionssteuerung zu reduzieren. Die erfassten Betriebsdaten lassen sich nach SCHEER (1997) u. a. in *auftrags-* und *maschinenbezogene Daten* unterteilen. Abbildung 34 zeigt die geschilderte Unterteilung der Betriebsdaten. Die Erfassung der anlagenspezifischen Betriebszustände erfolgt mittels MDE-Systemen, welche meist an die BDE gekoppelt sind (vgl. Abschnitt 2.2.6.1). Im Unterschied dazu findet die Energiedatenerfassung (EDE) im Rahmen von Energiemanagementsystemen (EMS) statt und wird i. d. R. getrennt von der MDE vollzogen (WAHREN 2013).

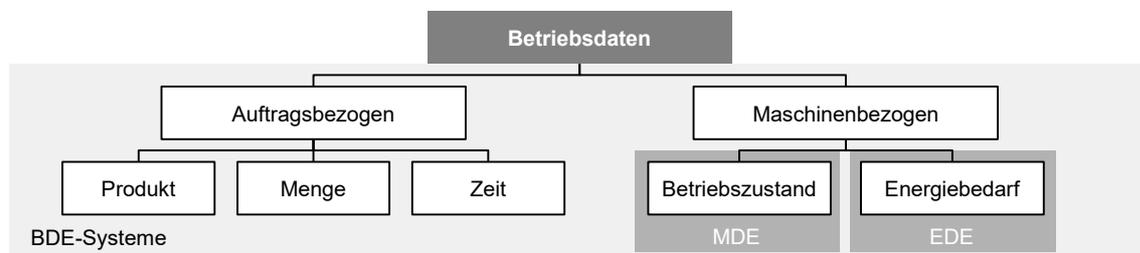


Abbildung 34: Unterteilung der Betriebsdaten (in Anlehnung an SCHEER 1997)

Aus den ermittelten Daten werden für die Auftragsplanung Stammdaten generiert. Diese setzen sich aus produktspezifischen (Sachnummer, Bezeichnung etc.), mengen-spezifischen (Stückzahl, Personal- und Materialeinsatz etc.) und zeitlichen Komponenten (Bearbeitungs-, Transport- oder Liegezeiten etc.) zusammen. In den Planungselementen, z. B. Stückliste oder Arbeitsplan, sind die Daten dokumentiert. Hinsichtlich der Maschinen lassen sich verschiedene Energiebedarfe (elektrisch, thermisch etc.) unterscheiden, welche den definierten Maschinenzuständen (Rüsten, Produktion etc.) zugeordnet werden. Speziell die Kopplung der Daten von MDE und EDE erweist sich als essenziell für die Generierung von Energiebedarfsmodellen. Hierzu werden im Folgenden unterschiedliche Verfahren zur Ermittlung und Darstellung von Maschinen- und elektrischen Energiedaten eingeführt.

6.2.3 Maschinendaten

Zur Systematisierung der Anlagendaten wird im Folgenden zwischen Online- und Offline-Erfassungsverfahren sowie zeit- und zustandsbezogenen Einordnungen differenziert.

Verfahren zur Anlagendatenermittlung

Die Art und Weise der MDE sowie deren Verarbeitung und Übermittlung wird in Abhängigkeit vom notwendigen Aktualisierungsgrades der Betriebsdaten definiert (KURBEL 2016). Dabei unterscheidet man zwischen einer Online- und Offline-Erfassung. Die Online-Erfassung ist durch eine direkte Datenverbindung zwischen Erfassungs- und Verarbeitungsgerät (z. B. PPS-System) gekennzeichnet. In einer Offline-Erfassung werden die Betriebsdaten entweder manuell oder an einem Erfassungsgerät aufgenommen, zwischengespeichert und zeitversetzt für eine weitere Verarbeitung übermittelt. Die Auftragsplanung ist jedoch nicht zwingend auf eine Online-Erfassung angewiesen (GEIGER 2015). Die gesammelten Daten werden in unterschiedlichen Darstellungsformen zusammengefasst, verknüpft sowie in der weiteren Datenverarbeitung als Stammdaten in den Planungselementen hinterlegt, z. B. im Arbeitsplan.

Zeitbezogene Einordnung der Maschinendaten

Die aufgenommenen Daten der MDE lassen sich anhand der Anlagenzustände in unterschiedliche Zeitachsen unterteilen. Anlagenzustände werden laut BINNER (2008) und in Anlehnung an den VDMA (2009) in die Hauptnutzungszeit, die Betriebszeit und die Grundzeit eingeordnet. Die *Hauptzeit* umfasst sämtliche Prozessschritte einer Anlage, welche zur Herstellung des Produktes erforderlich sind. Diese werden durch Zustände der *Nebennutzungszeit* (z. B. Rüstvorgänge) zur *Betriebszeit* ergänzt. Geplante Stillstände werden durch die *Brachzeit* ausgedrückt, welche die Betriebszeit zur Grundzeit ergänzt. Abbildung 35 zeigt die Darstellung der Zeitachsen bezogen auf den Maschinenzustand.

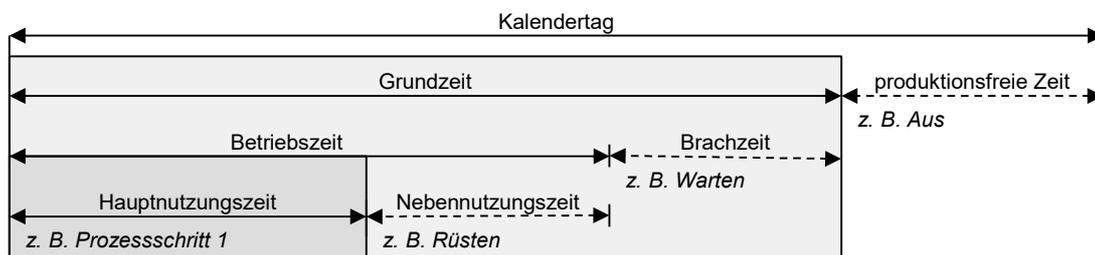


Abbildung 35: Zeitbezogene Darstellung von Anlagenzuständen
(in Anlehnung an BINNER 2008)

Verfahren zur Energiedatenermittlung

Die Ermittlung von anlagenspezifischen Energiedaten lässt sich in theoretische und praktische Verfahren unterteilen (WEINERT 2010). Tabelle 5 fasst die unterschiedlichen Möglichkeiten der Energiedatenerfassung in einer Bewertung zusammen.

Tabelle 5: Verfahren zur Ermittlung von Energiedaten (nach WEINERT 2010)

Ermittlung	Verfahren	Datengenerierung	Eignung
Theoretisch	Analytische Bestimmung	<ul style="list-style-type: none"> • Einmalige Berechnung • Bekannte Anlagenparameter • Mathematische Modellierung 	
	Numerische Simulation	<ul style="list-style-type: none"> • Kontinuierliche Berechnung • Bekannte Anlagenparameter • Mathematische Modellierung 	
Praktisch	Analyse-Messung	<ul style="list-style-type: none"> • Definierter Messintervall • Reale Prozessdaten • Mobiles Messequipment 	
	Betriebsbegleitende Erfassung	<ul style="list-style-type: none"> • Kontinuierliche Erfassung • Reale Prozessdaten • Stationäres Messequipment 	

Da im Regelfall nicht alle Anlagen mit Energiemesssystemen ausgestattet sind, greift eine theoretische Ermittlung auf Schätzverfahren, eine analytische Bestimmung sowie die numerische Simulation zurück. Die theoretische Bestimmung des Energiebedarfsverhaltens ist sowohl bei existierenden als auch an in Planung befindlichen Ressourcen möglich. Die analytische Bestimmung nutzt dabei vorhandene Informationen (z. B. Anlagenparameter) zur Modellierung. Dieses Vorgehen liefert ausschließlich mit sehr hohem Aufwand sowie umfangreicher Informationskenntnis genaue Ergebnisse und eignet sich daher nicht für alle Anwendungsfälle (WEINERT 2010). Eine Möglichkeit, genauere Ergebnisse zu erhalten, stellt die numerische Simulation dar, bei welcher durch eine Vorausberechnung mithilfe eines virtuellen Abbildes der Anlage das Energiebedarfsverhalten ermittelt wird. Auch dieses Verfahren ist mit einem hohen Aufwand verbunden, um genaue Energiedaten zu erhalten (WEINERT 2010). Aufgrund der zahlreichen Nebenbedingungen und Abhängigkeiten herrscht dabei jedoch für beide Varianten das Risiko, dass berechnete Energiedaten nicht mit der realen Leistungsaufnahme übereinstimmen. Zur praktischen Ermittlung von Energiedaten bedarf es einer real existierenden Anlage, an welcher eine Energiedatenerfassung vollzogen wird. Mithilfe einer Analyse-Messung wird in einem definierten Zeitintervall das Energiebedarfsverhalten einer Anlage aufgenommen. Die Messung erfolgt einmalig, unregelmäßig oder zyklisch, bspw. durch den Einsatz von mobilen Messsystemen (WEINERT 2010). Eine genauere Möglichkeit ist die betriebsbegleitende Erfassung (z. B. im Rahmen eines

EMS). In diesem Fall ist die Messtechnik stationär in der Anlage integriert und stellt permanent Energiedaten bereit (WEINERT 2010).

Mit Ausnahme der Schätzung eignen sich die genannten Verfahren, um Stammdaten für die Auftragsplanung zu generieren. Die aufgenommenen Energiedaten lassen sich für die Auftragsplanung in einer arbeits- und leistungsbezogenen Darstellung verwenden.

Arbeits- und leistungsbezogene Abbildung der Energiedaten

Im Rahmen der Auftragsplanung lassen sich die ermittelten elektrischen Energiedaten in arbeits- und leistungsbezogene Informationen differenzieren (vgl. Abschnitt 2.3.1). Leistungsdaten werden in einem definierten Beobachtungszeitraum ermittelt sowie in Anlehnung an das Lastmanagement in zeitliche Raster, z. B. 15 Minuten, unterteilt. Der Durchschnitt der ermittelten Werte bildet den Leistungsbedarf einer Maschine innerhalb des definierten Intervalls ab. Somit leitet sich aus dieser Information die Höhe an *elektrischer Leistung* ab, welche eine Anlage in einem spezifischen Zustand benötigt. Sind verschiedene Zustände und Messintervalle aggregiert darzustellen, bietet sich die Überführung der Darstellung in elektrische Arbeit an. Somit kann eine Aussage über die Menge an *elektrischer Arbeit* innerhalb eines Beobachtungszeitraumes getätigt werden. Abbildung 37 zeigt die beiden Darstellungsformen von gemessenen Energiedaten.

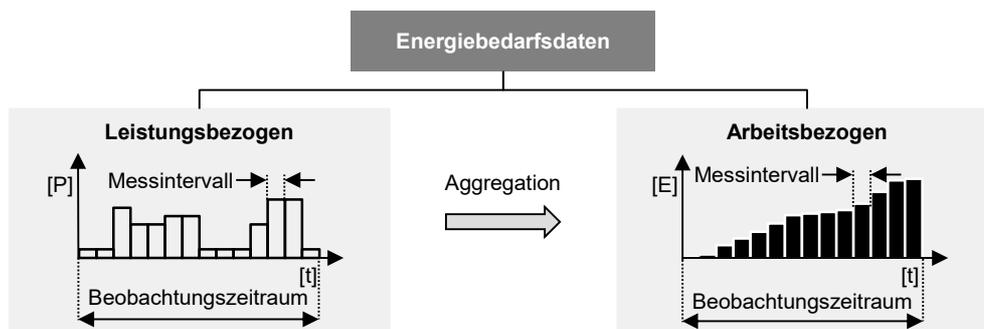


Abbildung 37: Darstellung der ermittelten Energiedaten

Die Differenzierung zwischen der arbeits- und leistungsbezogenen Darstellung erweist sich als notwendig, um ein Produktionssystem im Rahmen der Auftragsplanung in Bedarfshöhe und -menge an elektrischer Energie zu beeinflussen. Dabei stellt die Erweiterung der Stammdaten für die Planungselemente Stückliste, Auftrag und Arbeitsplan einen Ansatz dar, um die Energiedaten in der Auftragsplanung zu berücksichtigen.

6.2.5 Auftragsbezogene Planungselemente

Die Aufgabe der Auftragsplanung umfasst die Realisierung der Kundenaufträge durch die Ableitung von Beschaffungs- und Produktionsaufträgen (vgl. Abschnitt 2.2.5). Für eine energiebezugsorientierte Auftragsplanung ist es nötig, die Planungselemente um die benötigte Energiemenge aus Haupt- und Nebenzeiten sowie um den Bedarf eines Produktionsauftrags an elektrischer Arbeit zu erweitern. Abbildung 38 verdeutlicht diese Strukturierung. Zur Umsetzung der Produktionsaufträge durch die Produktionssysteme sind drei Planungselemente essenziell:

- die Stückliste, welche das zu fertigende Produkt nach Menge und Bestandteilen gliedert,
- der Arbeitsplan, welcher den Fertigungsablauf an den einzelnen Produktionsanlagen in zeitlicher Abfolge definiert (vgl. Abschnitt 2.2.6) sowie
- der Auftrag selbst, der das Produkt, die Zeit und die Menge bestimmt.

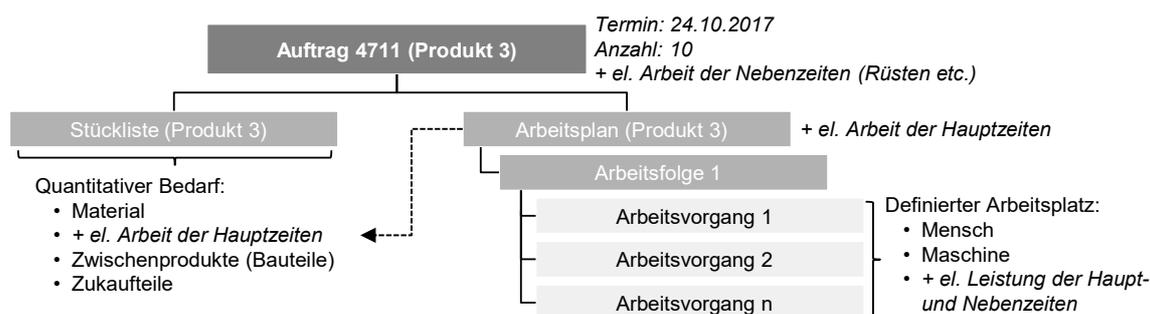


Abbildung 38: Auftragsbezogene Planungselemente

Die Hauptzeiten, welche an jedem Produkt einzeln durchgeführt werden, sind im Arbeitsplan als Bedarf an elektrischer Arbeit zu hinterlegen. Diese Information wird in die Stückliste eingesetzt (dargestellt durch die gestrichelte Linie in Abbildung 38), um dort den hauptzeitspezifischen Bedarf eines Produktes an elektrischer Arbeit zu dokumentieren. Darüber hinaus gilt es, den Energiebedarf der Nebenzeiten der einzelnen AVOs (wie z. B. den Rüstzeiten) dem Auftrag zuzuordnen. Sofern das Produktionssystem Prozessschritte beinhaltet, welche mehrere Produkte gleichzeitig bearbeiten, sind diese ebenfalls dem Auftrag zuzuordnen. Folglich sind arbeitsbezogene Energiedaten der Stückliste, dem Auftrag und dem Arbeitsplan zugeordnet. Dies ermöglicht die mengenmäßige Abstimmung eines Produktionssystems im Rahmen der Losgrößen sowie der Termin- und Kapazitätsplanung. Leistungsbezogene Energiedaten der Haupt- und Nebenzeiten werden den einzelnen AVOs einer Arbeitsfolge hinterlegt (KELLER & REINHART 2016A).

Die AVOs drücken innerhalb des Arbeitsplans z. B. durch alternative Fertigungsverfahren unterschiedliche Fertigungsabläufe aus (KURBEL 2016). Eine Arbeitsfolge stellt einen in sich abgeschlossenen Fertigungsablauf dar, welcher in unterschiedliche AVOs gegliedert ist. Die Hauptzeit eines spezifischen Fertigungsschritts (z. B. gegliedert nach DIN 8580) wird in der AVO durch die Bearbeitungszeit repräsentiert. Jede AVO ist einem Arbeitsplatz zugeordnet, welcher Informationen über die benötigten Kapazitäten (z. B. Maschinen und Personal) zusammenfasst (KURBEL 2016). Dies ermöglicht es, die Energiedaten in den AVOs im Rahmen der Reihenfolgeplanung zu nutzen, um ein Produktionssystem an einem variablen Lastmanagement auszurichten. Für eine energieorientierte Auftragsplanung gilt es im Folgenden, die Stückliste und den Auftrag um arbeitsbezogene Energiebedarfsinformationen zu ergänzen. Leistungsbezogene Daten sind im Speziellen in den AVOs zu hinterlegen. Realisiert wird dies durch arbeits- und leistungsbezogene Bedarfsmodelle, welche in den folgenden Abschnitten Erläuterung finden.

6.3 Generierung eines leistungsbezogenen Maschinenmodells

6.3.1 Allgemeines

Die Generierung eines leistungsbezogenen Maschinenmodells bildet die Grundlage, um ein Produktionssystem anhand dessen Arbeits- und Leistungsbedarfs an eine gegebene Energiesituation auszurichten. Hierzu werden in Abschnitt 6.3.2 Energie- und Maschinendaten miteinander verknüpft sowie in einem schrittweisen Vorgehen zu einem Maschinenmodell zusammengefasst. Das Ergebnis findet Anwendung in einem erweiterten Arbeitsplan, welchen Abschnitt 6.3.3 vorstellt.

6.3.2 Verknüpfung von Energie- und Maschinendaten

Als Datengrundlage dienen dem Anlagenmodell die erfassten Daten aus der MDE sowie der EDE. Diese werden mithilfe aufgenommener Zeitwerte miteinander verknüpft, sodass die ermittelten Leistungsdaten mit den Zustandsdaten übereinstimmen. Überdies gilt es, die erfassten Maschinen- und Betriebsinformationen mit Energiedaten anzureichern, um diese für ein variables Lastmanagement nutzen zu können.

6.3.2.1 Aufbereitung der Anlagendaten

Den ersten Schritt zur Aufbereitung der Anlagendaten bilden die zeitliche Erfassung der Betriebszustände einer Anlage sowie deren zeitliche Zuordnung. Zwar können die Zustände und die Informationen je nach Ermittlungsverfahren und Anlagenart variieren, allerdings lassen sich diese im Regelfall in fünf Grundzustände zusammenfassen, welche ggf. durch spezifische Zustände ergänzt werden. Um Rückschlüsse auf die produktabhängigen Fertigungsprozesse zu erhalten, werden die Betriebszustände mithilfe der Informationen aus dem Arbeitsplan ergänzt. Dadurch werden die unterschiedlichen Betriebszustände mit den spezifischen Zeitangaben (Rüstzeit oder Bearbeitungszeit) der AVOs bzw. dem Fertigungsschritt verknüpft. Gleichzeitig findet somit eine Zuordnung zu dem gefertigten Produkt statt. Im letzten Schritt werden die Zustände anhand der Grundzeiten einer Anlage klassifiziert, welche Tabelle 6 verdeutlicht.

Tabelle 6: Exemplarische Zustände einer Anlage

Anlagenzustand	Charakteristik	Zeitbezug
Aus	Ausgeschaltet	Brachzeit
Hochfahren	Überführen in einen betriebsbereiten Zustand	Nebenzeit
Rüsten	Rüsten für ein spezifisches Produkt/Werkstück	Nebenzeit
Betrieb	Verrichtung eines Fertigungsprozesses	Hauptzeit
Warten	Betriebsbereit	Brachzeit

Der Zustand *Betrieb* mit seinen produktspezifischen AVOs ist der Hauptnutzungszeit zuzuweisen. Der Zustand *Aus* sowie *Warten* ist der Brachzeit zuzuordnen, da in diesem Fall keine Wertschöpfung oder die Vorbereitung dazu an einer Maschine vorgenommen werden. Alle weiteren Zustände werden der Nebennutzungszeit zugeschrieben. Im Folgenden gilt es, die Energiedaten entsprechend aufzubereiten sowie mit den Betriebsdaten zu synchronisieren.

6.3.2.2 Aufbereitung der Energiedaten

Die Aufbereitung der Energiedaten erfolgt analog zu den Anlagendaten. Abbildung 39 zeigt beide Aufbereitungsabläufe. Den ersten Schritt bildet eine zeitlich hochaufgelöste Messung oder Simulation des Energiebedarfsverhaltens (z. B. mittels sekundlicher Messdaten), welche über einen definierten Beobachtungszeitraum stattfindet. Idealerweise werden die Energiedaten im Rahmen einer kontinuierlichen

Integration energieorientierter Kennzahlen in auftragsbezogene Planungselemente

stationären Messung direkt an der Anlage erfasst. Somit besteht die Möglichkeit, diese direkt an ein online-BDE zu koppeln.

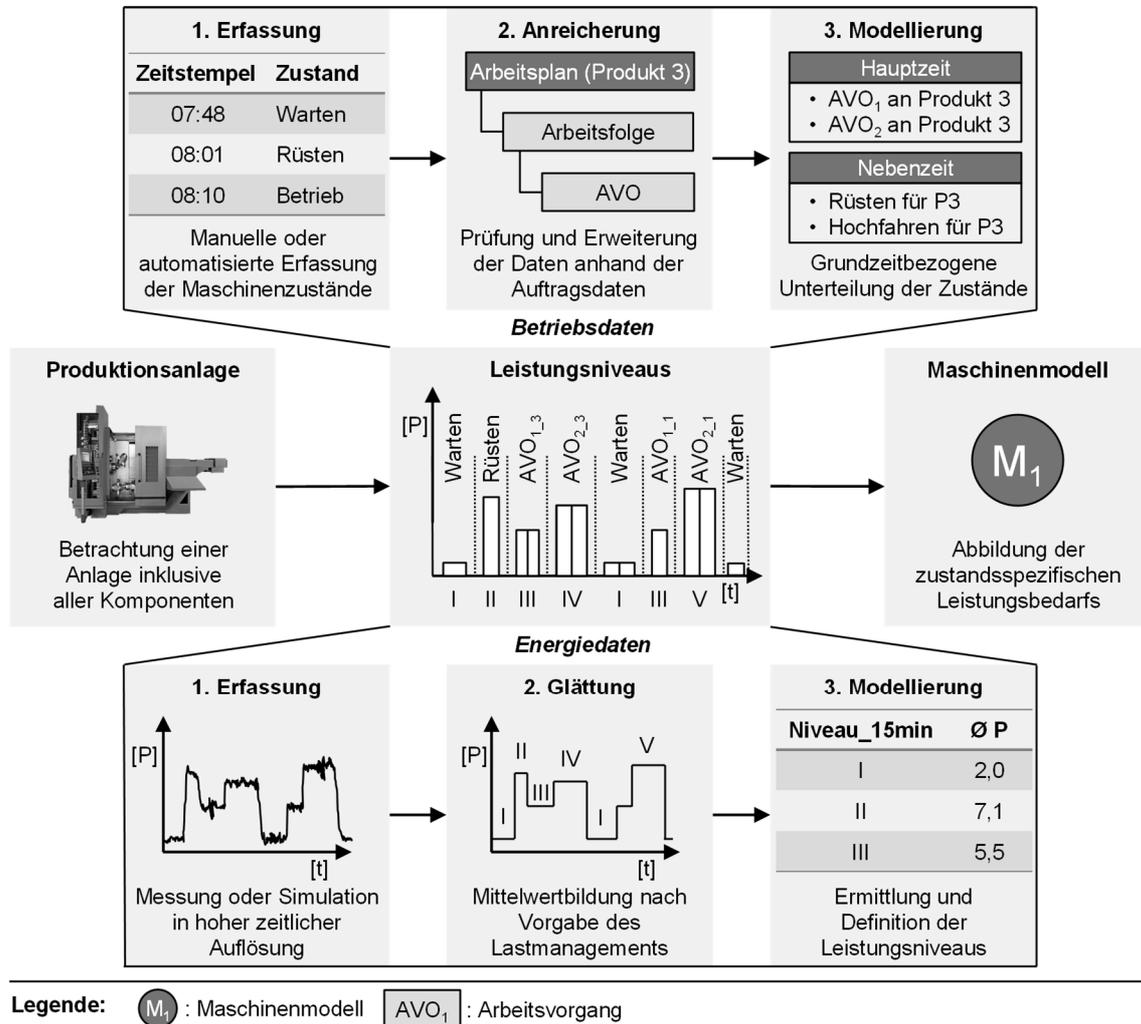


Abbildung 39: Ablauf zur Datenaufbereitung des Maschinenmodells

Die erfassten Energiedaten dienen im Glättungsschritt zur Bildung von Leistungsmittelwerten, welche durch das Lastmanagement vorgegeben oder an diesem ausgerichtet sind. Als Beispiel zur Mittelwertausrichtung ist das 15-Minuten-Intervall zur registrierenden Leistungsmessung (RLM) anzuführen, welche die Kosten der Netznutzung für ein Unternehmen bestimmt (SCHUHMACHER & WÜRFEL 2015). Die daraus resultierenden Mittelwerte ergeben spezifische *Leistungsniveaus*, welche den Messintervallen des Lastmanagements zugeordnet werden. Die gemessenen Niveaus werden anhand ihrer durchschnittlichen Leistungsaufnahme klassifiziert, sodass eine Aussage über die Anzahl der Leistungsniveaus und deren Ausprägung möglich ist.

Zusammen mit den aufgenommenen Betriebsdaten wird das leistungsbezogene Maschinenmodell generiert, das die Daten der AVOs mit den ermittelten Leistungsniveaus verknüpft. Dementsprechend beinhaltet das Modell sowohl den Maschinenzustand und den Leistungsbedarf als auch den spezifischen Rüst- und Prozessschritt der AVO des gefertigten Produktes. Abbildung 39 verdeutlicht die Aufbereitung der Betriebs- und Energiedaten zur Generierung des Maschinenmodells. Das generierte Modell gilt es, im Folgenden mit den entsprechenden Stammdaten des Planungssystems zu verknüpfen.

6.3.3 Verknüpfung des leistungsbezogenen Maschinenmodells mit bestehenden Stammdaten

Das Maschinenmodell bildet das zentrale Element zur Verknüpfung von produkt- und anlagenbezogenen Daten, welche für eine energieorientierte Auftragsplanung benötigt werden. Abbildung 40 fasst die Zusammenhänge des Maschinenmodells in der Unified Modeling Language (UML) Notation zusammen (vgl. FOWLER & SCOTT 2000). Die Klasse *Auftrag* beinhaltet sämtliche Informationen, die dem Produktionsauftrag zugeordnet sind (z. B. Auftragsnummer, Anzahl und Art der Produkte sowie Liefertermin) sowie zur eindeutigen Identifikation dienen. Die Klasse *Produkt* umfasst alle Produktinformationen (z. B. Sachnummer, Bezeichnung und Beschreibung), die ein Produkt bzw. ein Zwischenprodukt eindeutig bestimmen. Der Arbeitsplan beinhaltet alle Daten zum Fertigungsablauf, welche in unterschiedlichen Arbeitsfolgen aggregiert sind. Diese beschreiben den spezifischen Ablauf der Rüst- und Fertigungsschritte zur Erstellung eines Produktes bzw. eines Zwischenproduktes in Form der AVOs (vgl. Abschnitt 6.2.5). Die produktbezogenen Daten aus der Klasse *Produkt* und *AVO* werden in der Klasse *Maschine* mit den Daten des Anlagenzustands und des Leistungsniveaus verknüpft.

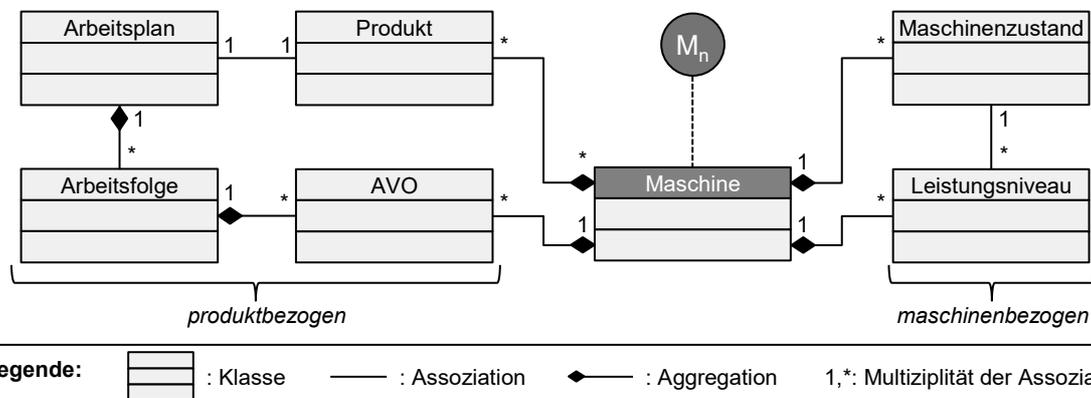


Abbildung 40: Maschinenmodell in einer UML-Darstellung

Die Klasse *Maschinenzustand* fasst dabei alle spezifischen Zustände der Anlage zusammen (z. B. Grundzustände, weitere Zustände, zeitlicher Bezug, Beschreibung der Zustände etc.). Diese sind mit der Klasse *Leistungsniveau* verknüpft, welche die Daten des gemessenen Leistungsbedarfs beinhaltet (z. B. Niveaunummer, durchschnittliche Leistung und Messintervall). Somit bildet das energieorientierte Maschinenmodell die Aggregation sämtliche Produkt- und Maschinendaten. Diese Informationen gelangen zur Erweiterung der Arbeitspläne zur Nutzung, um den Herstellungsablauf an der verfügbaren Höhe der elektrischen Leistung auszurichten. Hierzu wird den Bearbeitungszeiten der produktspezifischen AVOs das Attribut des maschinenspezifischen Hauptzeiten-Leistungsniveaus zugeordnet. Zusätzlich werden die Rüstzeiten um das Attribut der maschinenspezifischen Nebenzeiten-Leistungsniveaus ergänzt. Dabei handelt es sich um eine energieorientierte Erweiterung des Arbeitsplans über das Maschinenmodell, da bislang dieses Planungselement lediglich Bearbeitungs- und Rüstzeiten abgebildet.

6.4 Ableitung des arbeitsbezogenen Auftrags- und Produktmodells

6.4.1 Allgemeines

Die Generierung eines arbeitsbezogenen Auftrags- und Produktmodells ermöglicht der Auftragsplanung die Berücksichtigung von variierenden Energiebezugsmengen. Hierzu wird in Abschnitt 6.4.2 auf Basis der erweiterten Arbeitspläne aus Abschnitt 6.3.3 ein Auftrags- und Produktmodell generiert. Dieses beinhaltet die spezifischen Energiedaten der Vorbereitungs- und Herstellungsprozesse eines Produktes und führt diese zusammen. Jene Daten werden den Planungselementen der Stückliste sowie des Auftrags hinzugefügt.

6.4.2 Verknüpfung von arbeitsbezogenen Energie- und Auftragsdaten

Die Grundlage für die Erstellung eines arbeitsbezogenen Auftrags- und Produktmodells bildet das in Abschnitt 6.3.2 generierte Maschinenmodell. Abbildung 41 zeigt die beiden Modelle in Abhängigkeit ihres Betrachtungsumfangs.

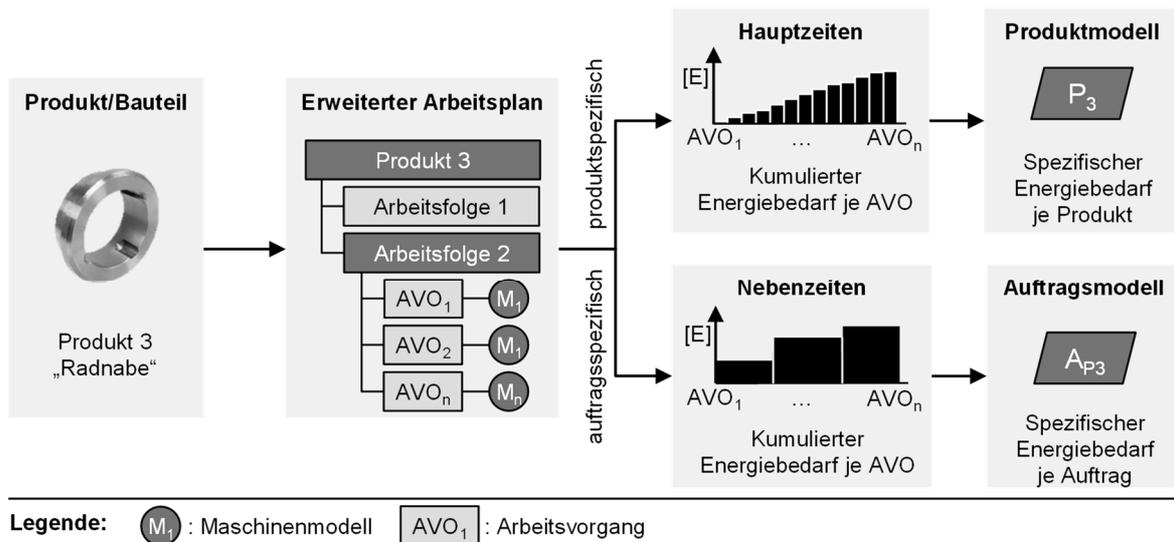


Abbildung 41: Ableitung des Auftrags- und Produktmodells

In beiden Modellen sind alle zustandsspezifischen Daten der Maschinen hinterlegt. Das Auftrags- und Produktmodell generiert sich aus dem erweiterten Arbeitsplan, welcher neben der Abfolge und der Zeitanteile der AVOs das entsprechende Maschinenmodell (bzw. das Leistungsniveau) inkludiert. Um das Auftrags- und Produktmodell zum Zweck der mengenmäßigen Planung abzuleiten, ist zwischen einer produkt- und auftragsabhängigen Erstellung zu unterscheiden.

6.4.2.1 Aufbau des energieorientierten Produktmodells

Den Ausgangspunkt der Mengenplanung bilden das Produkt und dessen Nachfrage (vgl. Abschnitt 2.2.4). Hierzu werden i. d. R. die Informationen der Stückliste genutzt, um anhand der Erzeugnisgliederung eines Produktes die Bedarfsmengen für Materialien und Zwischenprodukte zu errechnen (sog. Stücklistenauflösung). Eine Berücksichtigung der Ressource Energie findet hierbei allerdings nicht statt. Um den Energiebedarf eines Produktes aus den Planungselementen zu modellieren, erfolgt dies durch die Betrachtung des erweiterten Arbeitsplans (vgl. Abschnitt 6.3.3). Abbildung 42 zeigt die Beziehung und den Ablauf vom erweiterten Arbeitsplan bis zum Produktmodell für die weiteren Planungsaufgaben.

Integration energieorientierter Kennzahlen in auftragsbezogene Planungselemente

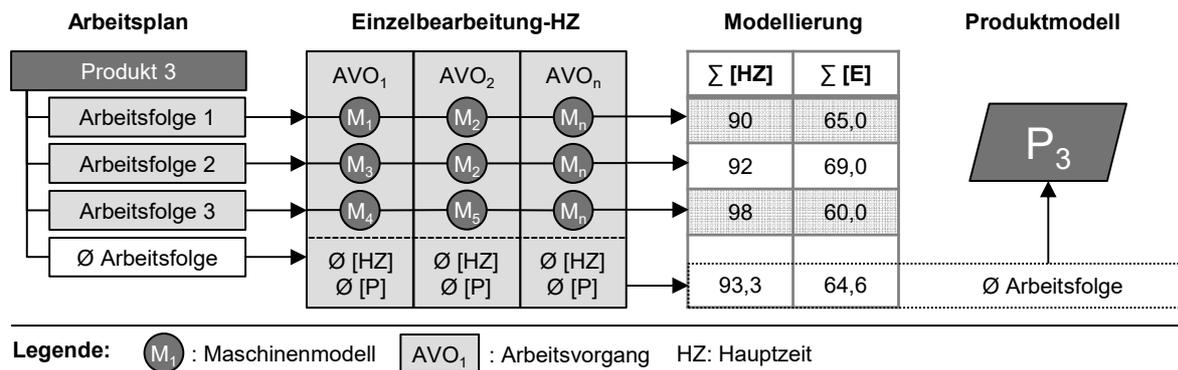


Abbildung 42: Aufbau des Produktmodells zur energieorientierten Auftragsplanung

Der Arbeitsplan enthält die Informationen aus den einzelnen Arbeitsfolgen, welche die produktspezifischen AVOs in Form einer Einzelbearbeitung mit ihren Leistungsniveaus aggregieren. Durch die Multiplikation von Bearbeitungsdauer und Leistungsniveau der Maschine errechnet sich die benötigte elektrische Arbeit für die spezifische AVO. Für alle weiteren AVOs einer Arbeitsfolge wird das analog gehandhabt. Sollte der Fall bestehen, dass ein Produkt mit verschiedenen Arbeitsfolgen gefertigt werden kann, so ist der Durchschnitt aus allen möglichen Arbeitsfolgen zu bilden. Dies erweist sich als notwendig, da bei der Mengenplanung noch nicht bekannt ist, welche Arbeitsfolge im späteren Verlauf gewählt werden wird. Die Zusammenfassung der AVO-Alternativen wird arbeitsfolgenübergreifend zusammengestellt und die einzelnen Hauptzeiten sowie der Leistungsbedarf der Maschinen gemittelt. Alternativ kann auch eine Arbeitsfolge als Referenz ausgewählt werden (z. B. Arbeitsfolge 2), wenn diese überwiegend zur Herstellung des Produktes herangezogen wird. Das Resultat aus der Auflösung der Arbeitsfolgen stellt die Summe der elektrischen Arbeit dar, welche in den Hauptzeiten der Einzelprozesse an den unterschiedlichen Maschinen zur Fertigung eines Produktes benötigt wird.

6.4.2.2 Aufbau des energieorientierten Auftragsmodells

Das Planungselement des Auftrags vereint die Informationen über das herzustellen- de Produkt, die benötigte Menge sowie den Termin zur Fertigstellung. Die auftragsbezogene Erstellung eines Energiebedarfsmodells erfolgt ähnlich zum Produktmodell. Die Basis hierfür bildet der erweiterte Arbeitsplan. Die darin enthaltenen Arbeitsfolgen mit den spezifischen Rüstzeiten der AVOs sind um die maschinenspezifischen Leistungsniveaus ergänzt. Neben den Rüstvorgängen werden auch die Nebenzeiten für Hochfahrprozesse berücksichtigt und dem Auftragsmodell hinzugefügt. Sollten innerhalb der Arbeitsfolgen einzelne AVOs in Form einer Sam-

melbearbeitung vorgesehen sein (z. B. Reinigungsprozesse), sind diese nicht dem Produktmodell, sondern dem Auftragsmodell zuzuordnen. Dies begründet sich damit, dass die Energie- und Zeitaufwände von Sammelprozessen nicht einem Produkt direkt zugeordnet werden können, sofern die Anzahl der Produkte innerhalb des Bearbeitungsschrittes einer AVO variiert. Somit kann keine adäquate produktbezogene Berücksichtigung erfolgen. Abbildung 43 zeigt den Weg vom dem erweiterten Arbeitsplan bis zum Auftragsmodell für die weiteren Planungsaufgaben.

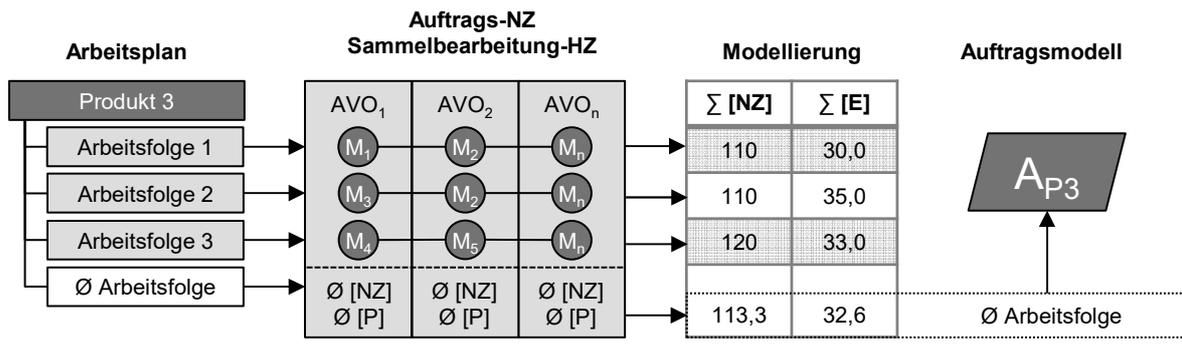


Abbildung 43: Aufbau des Auftragsmodells zur energieorientierten Auftragsplanung

Das Auftragsmodell bildet sich wie das Produktmodell durch die Kumulation der maschinenspezifischen Energiebedarfe in den Nebenzeiten bzw. in den Hauptzeiten der Sammelbearbeitungen. Analog zum Produktmodell verhält es sich, wenn mehrere Arbeitsfolgen mit unterschiedlichen Arbeitsplätzen bzw. Maschinen vorliegen. Gewählt werden kann zwischen einer Referenz-Arbeitsfolge oder dem Durchschnitt der Arbeitsfolgen für die weitere Planung. Das Resultat aus der auftragsbezogenen Auflösung der Arbeitsfolgen über das Maschinenmodell ist die Summe der elektrischen Arbeit, welche zur Durchführung eines Auftrages in Form von Haupt- und Nebenzeiten an den Maschinen benötigt wird.

6.4.3 Verknüpfung der Energiebedarfsmodelle mit den Planungselementen der Ablauforganisation

Die Erweiterung der auftragsbezogenen Planungselemente um energieorientierte Kennzahlen bildet die Grundlage für die Realisierung eines variablen Lastmanagements innerhalb eines PPS-Systems.

Mithilfe der Erweiterung der Arbeitsvorgänge um die Informationen des Maschinenmodells können zusätzlich zu den zeitlichen Informationen die dazugehörigen Maschinenzustände einschließlich der Leistungsbedarfe in einer Reihenfolgeplanung abgebildet werden. Die aggregierten Informationen der produktspezifischen

Integration energieorientierter Kennzahlen in auftragsbezogene Planungselemente

Hauptzeiten einer Arbeitsfolge werden im energieorientierten Produktmodell abgebildet und dem Arbeitsplan sowie der Stückliste hinzugefügt. Somit ist es im Rahmen der Los-, Termin- und Kapazitätsplanung möglich, mengenmäßige Energieaspekte zu berücksichtigen (vgl. Stücklistenauflösung in Abschnitt 6.4.2.1). Alle weiteren Energiebedarfe, welche nicht durch das Produktmodell beschrieben sind, werden im Element des Auftrags selbst durch ein energieorientiertes Auftragsmodell erfasst und berücksichtigt, so bspw. Rüstaufwände und Sammelprozesse.

Abbildung 44 zeigt die Erweiterung der relevanten Planungselemente auf Basis der in Abschnitt 6.2.5 eingeführten Definitionen.

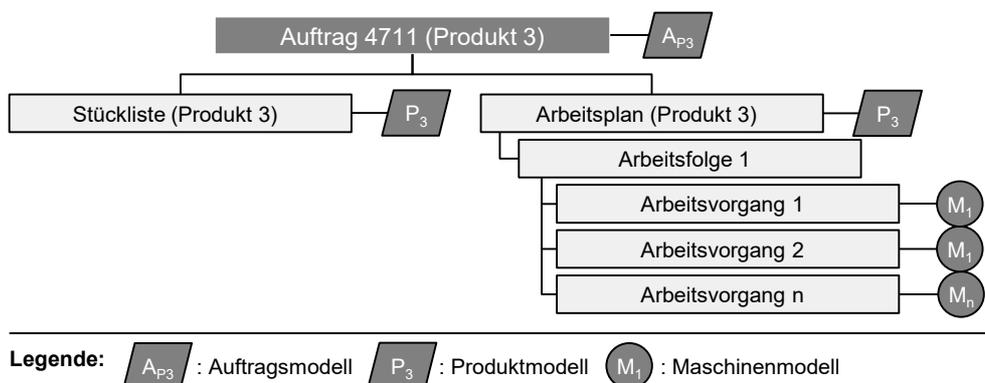


Abbildung 44: Erweiterte auftragsbezogene Planungselemente

6.5 Fazit

Vorliegendes Kapitel zeigt ein methodisches Vorgehen auf, um Energiedaten in bestehende Elemente der Auftragsplanung zu integrieren. Im ersten Schritt wird der Ablauf für die Bestimmung eines energieorientierten Maschinenmodells definiert, welches die elektrischen Leistungsbedarfe und die maschinenspezifischen Zustände einer Produktionsanlage mit den auftrags- bzw. produktabhängigen Informationen verknüpft. Aus den unterschiedlichen Maschinenmodellen leiten sich im nächsten Schritt sowohl das energieorientierte Produkt- als auch das Auftragsmodell ab. Im Gegensatz zum Maschinenmodell sind sowohl im Auftrags- als auch im Produktmodell aggregierte Kennzahlen in Form der elektrischen Arbeit hinterlegt. Diese Informationen lassen sich nun im Rahmen der PPS für den Ablauf der Auftragsplanung nutzen (vgl. Abschnitt 2.2.5), um die ökologischen Zielstellungen des Unternehmens sowie die Anforderungen der standortspezifischen Energiepläne umzusetzen. Abbildung 45 ordnet dabei die erweiterten Planungselemente dem Ablauf der Auftragsplanung zu.

Integration energieorientierter Kennzahlen in auftragsbezogene Planungselemente

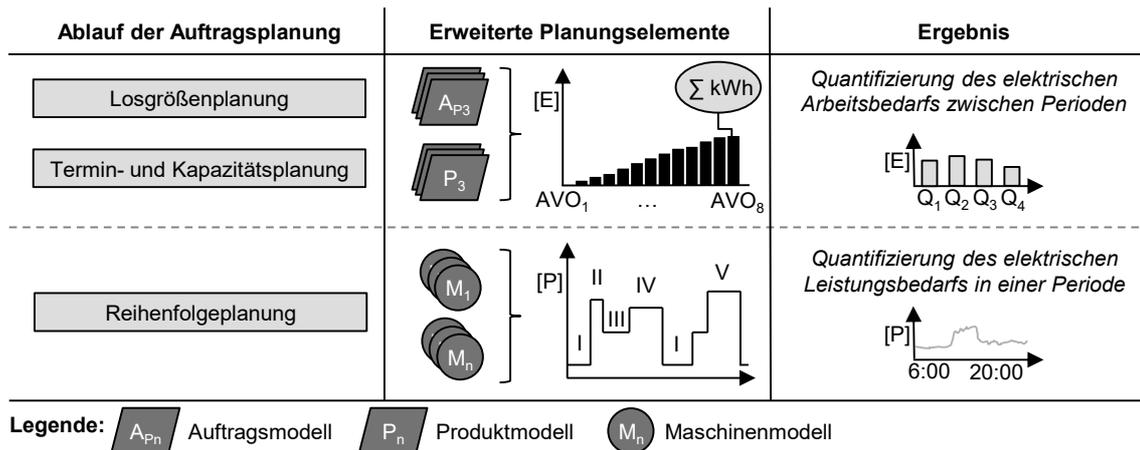


Abbildung 45: Erweiterter Ablauf der Auftragsplanung

Damit ist ein Planungsablauf befähigt, einerseits einen mengenmäßigen Energiebedarf zwischen Planungsperioden zu berücksichtigen sowie andererseits die Abstimmung der Leistungsbedarfe innerhalb einer Planungsperiode an einem variablen Lastmanagement auszurichten. Die Abstimmung der Aufträge mit den Vorgaben aus den Energieplänen stellt den letzten Baustein zur Umsetzung einer energiebezugsorientierten Auftragsplanung dar. Dabei sind die einzelnen Schritte in Form eines sequenziellen Lösungsverfahrens zu formulieren, was im nachfolgenden Kapitel behandelt wird.

7 Lösungsverfahren zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung

7.1 Übersicht

Dieses Kapitel umfasst die Darstellung eines sequenziellen Lösungsverfahrens im Rahmen einer energiebezugsorientierten Auftragsplanung. Hierzu werden in Abschnitt 7.2 der Aufbau und der Ablauf des Lösungsverfahrens skizziert. Im Anschluss bietet Abschnitt 7.3 eine Einführung in den Aufbau der Mengenplanung mithilfe eines Makro- und eines Mikromodells auf Basis einer gemischt-ganzzahligen Programmierung. Abschnitt 7.4 behandelt die kurzfristige Ablaufplanung mithilfe einer energieorientierten heuristischen Maschinenbelegung. Abschließend zieht Abschnitt 7.5 ein Fazit zu dem vorgestellten Vorgehen.

7.2 Aufbau und Ablauf

Die Zielsetzung des Lösungsverfahrens ist, die Abstimmung der Auftragsplanung mit gegebenen Energiebezugsinformationen, welche durch die in Kapitel 5 generierten Energiemodelle beschrieben sind, zu realisieren. Diese werden den Energiebedarfen von Aufträgen, Produkten und Maschinen gegenübergestellt. Abbildung 46 zeigt die unterschiedlichen Teilschritte der Auftragsplanung sowie die erweiterten Planungselemente von Energiebezug und -bedarf einer Produktion.

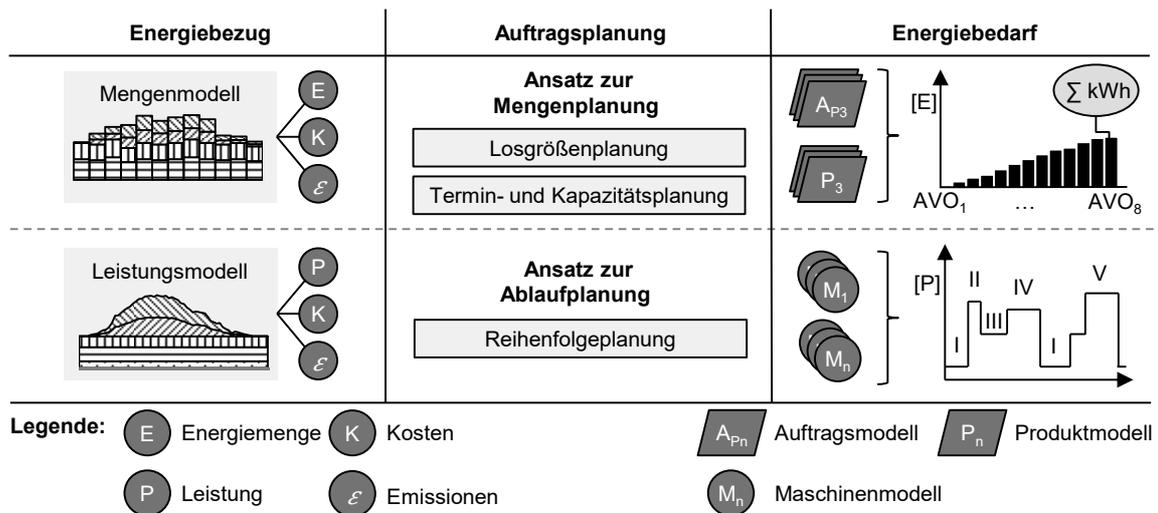


Abbildung 46: Sequenzielles Lösungsverfahren zur Mengen- und Ablaufplanung

Die Losgrößen- sowie die Termin- und Kapazitätsplanung lassen sich in einem Ansatz zur Mengenplanung zusammenfassen, da in diesen Schritten die zu produzierenden Mengen zwischen unterschiedlichen Planungsperioden im Vordergrund stehen (vgl. Abschnitt 2.2.5). Hierbei wird im Folgenden zwischen einer mittelfristigen (Planungshorizont: Quartale bis Monate) Makroplanung sowie einer kurzfristigen (Planungshorizont: Wochen bis Schichten) Mikroplanung unterschieden. Innerhalb einer kurzfristigen Planungsperiode wird der Ablauf der Produktion durch die Reihenfolgeplanung bestimmt, welche den zeitlichen Einsatz der Maschinen und somit den Energiebedarf mit dem zur Verfügung stehenden Leistungsangebot abgleicht. Dies wird mithilfe einer Maschinenbelegung realisiert. Im ersten Schritt des sequenziellen Lösungsverfahrens werden die Ansätze des Mikro- und des Makromodells zur Mengenplanung vorgestellt.

7.3 Ansatz einer mittel- bis kurzfristigen energiebezugsorientierten Mengenplanung

7.3.1 Allgemeines

Für die Lösung von mengenbezogenen Auftragsplanungsproblemen zwischen Planungsperioden eignen sich die gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung bzw. das sog. *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) (vgl. Abschnitt 2.2.7.2). Definitionsgemäß besteht die Aufgabe eines MILP bzw. eines gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblems darin, eine lineare Zielfunktion zu maximieren oder zu minimieren, wobei lineare Nebenbedingungen zu beachten sind. Zumeist geschieht dies unter Berücksichtigung von Nichtnegativitätsbedingungen (DOMSCHKE & DREXL 2007). Der MILP-Ansatz ist sowohl für das Makro- als auch für das Mikromodell geeignet, da sich beide Entscheidungsmodelle mit abstrahierten Zielfunktionen und Nebenbedingungen beschreiben lassen. Folglich ist es möglich, auftragsbezogene Termine und Kapazitäten des Produktionssystems mit den Informationen der Energiepläne mengenmäßig abzugleichen. Aufbau und Formulierung der Modelle sind Gegenstand der nachfolgenden Abschnitte.

7.3.2 Aufbau des mittelfristigen Makromodells

Das Makromodell verfolgt die Zielsetzung, die Losgrößenplanung unter Termin- und Kapazitätsrestriktionen für ein oder mehrere Quartale vorzunehmen. Neben den Kundenaufträgen ist ebenso das Energiemengenmodell (vgl. Abschnitt 5.5.2) Teil des Makromodells. Abbildung 47 zeigt die Aufgabe und Funktionen des Makromodells.

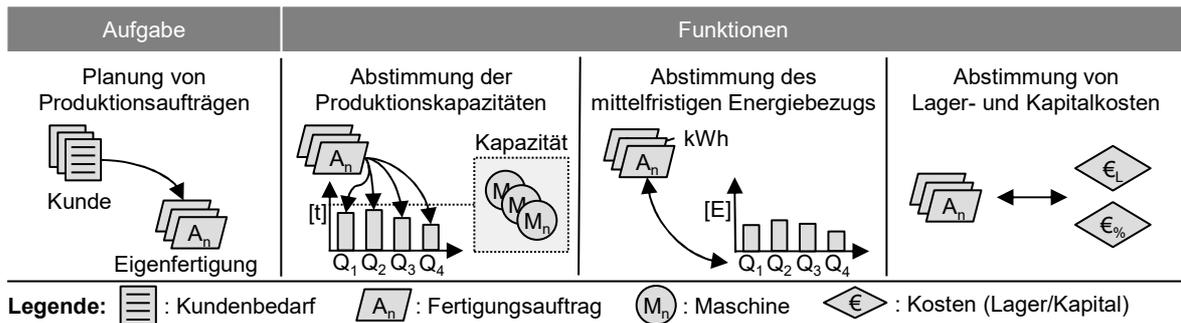


Abbildung 47: Aufgabe und Funktionen des Makromodells

Aufgabe des Modells ist es, Kundenaufträge in Eigenfertigungsaufträge zu überführen. Der Kernaspekt liegt hierbei auf den Informationen der Auftrags- und der Produktmodelle (vgl. Abschnitt 6.2). Diese beinhalten die Information über den auftragspezifischen Energiebedarf sowie die produktabhängigen Nutzungszeiten auf den notwendigen Maschinen. Hieraus ergibt sich ein Abstimmungsbedarf bezüglich der Energiekosten und weiterer auftragsbezogener Kosten (z. B. Lager- oder Kapitalkosten). Innerhalb der gegebenen Restriktionen gilt es, als Ergebnis optimale Produktionsmengen und Lagerbestände sowie optimale Energiezukaufmengen je Quartal festzulegen. Das Entscheidungsproblem wird somit unter dem Gesichtspunkt der Kostenminimierung definiert und formuliert, während reale Rahmenbedingungen durch die Integration von Nebenbedingungen Beachtung finden. Darunter fallen Bedingungen für die Produktion, das Energiemodell und das Lager sowie Bestandsgleichungen für jede Periode. Zur Formulierung des Makromodells ist eine Reihe von weiteren Eingangsdaten erforderlich, die im Voraus zu bestimmen oder zu erheben sind. Darunter fällt die Festlegung des Planungszeitraums und der Anzahl der verschiedenen Produktarten, die durch das Produktionssystem gefertigt werden. Darüber hinaus müssen Kosteninformationen bspw. über Lager- und Kapitalkosten vorliegen. Im folgenden Abschnitt wird ein energiebezugsorientiertes Makromodell mithilfe des exemplarischen MILP-Ansatzes formuliert. Dieser kann je nach Anwendung um weitere Informationen erweitert werden.

7.3.3 Formulierung des mittelfristigen Makromodells

Zur Formulierung des Makromodells werden mittelfristige Produktions-, Kundenbedarfs- und Energieinformationen miteinander verknüpft und als Eingangsgrößen für die Auftragsplanung betrachtet. Hierzu wird im ersten Schritt eine Zielfunktion definiert, die anschließend durch Nebenbedingungen, wie z. B. Bestandsgleichungen, Auftragszahl, Produktionskapazität etc., ergänzt wird. Den Abschluss des MILP-Ansatzes bilden die Nichtnegativitätsbedingungen. Diese kommen in den folgenden Abschnitten zur Erläuterung. Die Ergebnisse des Makromodells umfassen periodenspezifische energiebezugsorientierte Produktionsmengen und Empfehlungen zur gezielten mittelfristigen Energiebeschaffung

7.3.3.1 Zielfunktion des Makromodells

Ziel des Makromodells ist die kostenminimale Festlegung der Entscheidungsvariablen. Diese sind die Produktionsmengen Q_{pt} und die Energiemengen E_{pt} sowie der Lagerbestand Y_{pt} . Die Zielfunktion (7.1) setzt sich somit aus dem Term der Energiekosten und dem Term der Lagerkosten zusammen. Die Indizes p (Produkte) und t (Perioden) definieren den Betrachtungsumfang für die Entscheidungsvariablen und Parameter. Die Energiekosten definieren die Summe aller Kosten, welche für den Zukauf von Energie, z. B. am Terminmarkt, entstehen. Die Lagerkosten bilden sich aus der Summe der Lagerbestände je Periode multipliziert mit den periodenspezifischen Lagerkosten. Diese werden anteilig zu den Herstellkosten berücksichtigt.

$$\min \sum_{t \in T} E_t^f \cdot K_t^f + \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} Y_{pt} \cdot (K_t^y + K_t^k) \quad (7.1)$$

mit

$p \in P := \{1, \dots, P^{max}\}$ Menge der unterschiedlichen Produkte

$t \in T := \{1, \dots, T^{max}\}$ Menge der betrachteten Perioden

E_t^f Zusätzliche Energiebeschaffung (fixiert) in kWh

K_t^f Energiekosten fixierter Beschaffungsoptionen in Periode t in €

Y_{pt} Lagerbestand von Produkt p in Periode t in Stück

K_t^y Lagerkosten pro Einheit in Periode t in €

K_t^k Kapitalkosten je Einheit in Periode t in €

Nachfolgender Abschnitt führt die Nebenbedingungen ein, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Lösung des energiebezugsorientierten Entscheidungsproblems erforderlich sind.

7.3.3.2 Nebenbedingungen

Die Formulierung der Nebenbedingungen umfasst die Bestandsgleichungen, die Produktions-, die Engpass- und Lagerkapazität, die Auftragszahl, die Energiemenge sowie die Grenzwerte der energieabhängigen Emissionen:

Bestandsgleichungen

Die Gleichungen (7.2a) und (7.2b) bilden die Bestandsgleichungen ab. Der Bestand der ersten Periode errechnet sich in den Nebenbedingungen (7.2a) durch den Anfangslagerbestand zu Beginn des Planungshorizonts, die Produktionsmenge, die Fehlmengen sowie die Nachfrage in der ersten Periode. In den darauffolgenden Perioden berechnet sich der Lagerbestand aus dem Lagerbestand der Vorperiode, der Produktionsmenge, der Fehlmenge sowie der Nachfrage der aktuellen Periode und den Fehlmengen der Vorperiode. Die Berücksichtigung der Fehlmengen der Vorperiode stellt sicher, dass Produkte, die nicht termingerecht ausgeliefert werden, später ausgeliefert werden müssen.

$$Y_{p,1} = Y_p^0 + Q_{p,1} - D_{p,1} \quad \forall p \in P \quad (7.2a)$$

$$Y_{pt} = Y_{p,t-1} + Q_{pt} - D_{pt} \quad \forall p \in P, t \in T \setminus \{1\} \quad (7.2a)$$

mit

Y_p^0 Anfangslagerbestand von Produkt p in Stück

Q_{pt} Produktionsmenge von Produkt p in Periode t in Stück

D_{pt} Nachfrage nach Produkt p in Periode t in Stück

Auftragszahl

Durch die Gleichungen (7.3) wird ermittelt, wie viele Aufträge je Periode von jedem Produkt bearbeitet werden. Durch die Beschränkung von A_{ps} auf ganzzahlige Werte nimmt die Variable den Wert der Anzahl der Lose eines Produkts an, wobei eine maximale Losgröße vorgegeben ist.

$$\frac{Q_{pt}}{G_p} \leq A_{pt} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (7.3)$$

mit	
G_p	Durchschnittliche Losgröße je Auftrag von Produkt p
A_{pt}	Anzahl der Lose von Produkt p in Periode t

Produktionskapazität

Nebenbedingung (7.4) stellt sicher, dass die Produktionskapazität bzw. -verfügbarkeit in jeder Periode nicht überschritten wird. Die Gesamtbearbeitungszeit der einzelnen Produkte sowie die Haupt- und Nebenzeiten der Aufträge dürfen nicht mehr Zeit in Anspruch nehmen, als verfügbar ist. Die Auftragshauptzeit sowie die Auftragsnebenzeit fallen dabei für jeden Auftrag an. Die Bearbeitungszeit eines Produktes wird auf Basis des spezifischen Produktmodells aus den kumulierten Hauptzeiten der AVOs berechnet.

$$\sum_{p \in P} Q_{pt} \cdot z_p^{ph} + \sum_{p \in P} A_{pt} \cdot z_p^{ah} + \sum_{p \in P} A_{pt} \cdot z_p^{an} \leq V_t \quad \forall t \in T \quad (7.4)$$

mit	
z_p^{ph}	Bearbeitungszeit für eine Einheit von Produkt p (Hauptzeit)
z_p^{ah}	Hauptzeit für einen Auftrag von Produkt p
z_p^{an}	Nebenzeit für einen Auftrag von Produkt p
V_t	Zeitliche Verfügbarkeit der Produktion in Periode t

Engpasskapazität

Neben der allgemeinen Produktionskapazität betrachtet die Nebenbedingung (7.5) die Produktionskapazität der Engpassressource. Die Bearbeitungszeit der Produkte sowie die Auftragswechselzeiten an der Ressource dürfen deren Kapazität in keiner Periode überschreiten.

$$\sum_{p \in P} Q_{pt} \cdot b_p^p + \sum_{p \in P} A_{pt} \cdot b_p^a \leq B_t \quad \forall t \in T \quad (7.5)$$

mit	
b_p^p	Bearbeitungszeit des Produkts p an der Engpassressource
b_p^a	Auftragswechselzeit von Produkt p an der Engpassressource
B_t	Zeitliche Verfügbarkeit der Engpassressource in Periode t

Lagerkapazität

Gemäß Nebenbedingung (7.6) darf der Lagerbestand die Lagerverfügbarkeit in keiner Periode überschreiten

$$\sum_{p \in P} Y_{pt} \leq Y_t \quad \forall t \in T \quad (7.6)$$

mit

Y_t Lagerverfügbarkeit in Periode t

Energiemenge

In Bedingung (7.8) wird festgelegt, dass die benötigte Energie zur Produktion und für Nebenzeiten nicht größer sein darf als die verfügbare Energie aus Eigenerzeugung zuzüglich der zugekauften Energie. Die Energiemenge stellt die verfügbare Energie aus der Eigenerzeugung dar, die direkt ohne Zwischenspeicher für die Produktion zur Verwendung gelangt. Aus diesem Grund wird je Periode nur die Energiemenge aufsummiert, die während der Auftragsbearbeitung benötigt wird. Weitere Energiebedarfe der Produktion (z. B. Beleuchtung) und deren Ressourcen (z. B. Nebenanlagen) werden nicht berücksichtigt.

$$\sum_{p \in P} Q_{pt} \cdot E_p^{ph} + \sum_{p \in P} A_{pt} \cdot E_p^{ah} + \sum_{p \in P} E_{pt} \cdot E_p^{an} \leq E_t^e + E_t^f \quad \forall t \in T \quad (7.8)$$

mit

E_p^{ph} Energiebedarf zur Herstellung einer Einheit des Produkts p (Hauptzeit)

E_p^{ah} Auftragspezifischer Energiebedarf zur Herstellung eines Loses des Produkts p (Hauptzeit)

E_p^{an} Auftragspezifischer Energiebedarf zur Herstellung eines Loses des Produkts p (Nebenzeit)

E_t^e Vorhandene Energiemenge (z. B. aus Eigenerzeugung) in Periode t

Emissionsgrenzwert

Die Restriktion (7.9) legt fest, dass in jeder Periode die Emissionen der beschafften Energie und der Eigenproduktion relativ zur Energiemenge einen vorgegebenen Grenzwert nicht überschreiten dürfen.

$$E_t^f \cdot \varepsilon_t^f + E_t^e \cdot \varepsilon_t^e \leq \frac{G_t}{(E_t^f + E_t^e)} \quad \forall t \in T \quad (7.9)$$

mit	
ε_t^f	Emission einer zusätzlich beschafften Energieeinheit in Periode t
ε_t^e	Emission einer Energieeinheit der vorhandenen Energiemenge in Periode t
G_t	Grenzwert der durchschnittlichen Emissionen

Energiekostengrenzwert

Wie in Bedingung (7.10) festgelegt, dürfen die durchschnittlichen Kosten der beschafften Energie sowie der Eigenerzeugung einen gegebenen Grenzwert auch nicht überschreiten.

$$E_t^f \cdot K_t^f + E_t^e \cdot K_t^e \leq \frac{K_t}{(E_t^f + E_t^e)} \quad \forall t \in T \quad (7.10)$$

mit	
K_t^e	Energiekosten der Eigenproduktion in Periode t
K_t	Grenzwert der Energiekosten in Periode t

7.3.3.3 Nichtnegativitätsbedingungen

Die Nebenbedingungen (7.11) bis (7.13) bestimmen, dass die Produktionsmenge, die Lagermenge sowie die Auftragsanzahl ganzzahlige, nicht negative Werte annehmen müssen. Energiezukaufsmengen dürfen laut den Restriktionen (7.14) nicht negativ sein.

$$Q \in \mathbb{Z}^0 \quad \forall p \in P, t \in T \quad (7.11)$$

$$Y_{pt} \in \mathbb{Z}^0: \quad \forall p \in P, t \in T \quad (7.12)$$

$$A_{pt} \in \mathbb{Z}^0: \quad \forall p \in P, t \in T \quad (7.13)$$

$$E_t^f \geq 0: \quad \forall t \in T \quad (7.14)$$

Durch die Formulierung der oben genannten Bedingungen verknüpft das Makromodell die mittelfristigen Informationen der Produktion, der Kundenbedarfe und der Energiebezugssituation in Form des generierten Energiemengenmodells. Im nächsten Schritt werden die Makroperioden durch die Formulierung des Entschei-

dungsproblems mittels eines Mikromodells detailliert. Dieses findet im folgenden Abschnitt Erläuterung.

7.3.4 Aufbau des kurzfristigen Mikromodells

Das Mikromodell weist einige Parallelen zu dem in Abschnitt 7.3.3 beschriebenen Makromodell auf. Der Hauptunterschied bezieht sich auf die Verschiebung des Fokus von der mittelfristigen quartalsweisen Sichtweise hin zu einer kurzfristigen wochen- bis tageweisen Betrachtung. Als zentrale Fragestellung gilt hier die Abwägung zwischen Energiekosten und Strafen für Terminüberschreitungen. Kapitalkosten treten bei der kurzfristigen Betrachtung in den Hintergrund. Wie im Makromodell liegt auch im Mikromodell das Hauptaugenmerk auf produktspezifischen Kennzahlen, wie z. B. der Bearbeitungsdauer sowie dem Energieverbrauch. Allerdings werden darüber hinaus auch die kurzfristigen Kundenbedarfe und das kurzfristige Energiemengenmodell betrachtet. Diesbezüglich werden Tage bzw. Schichten dargestellt und eine Verteilung der Aufträge sowie ein günstiger Zukauf von Energiemengen vorgeschlagen. Das Entscheidungsproblem wird im folgenden Abschnitt unter den Gesichtspunkten der Kostenminimierung sowie der entsprechenden Nebenbedingungen definiert und formuliert. Abbildung 48 zeigt die Aufgabe und Funktionen des Mikromodells.

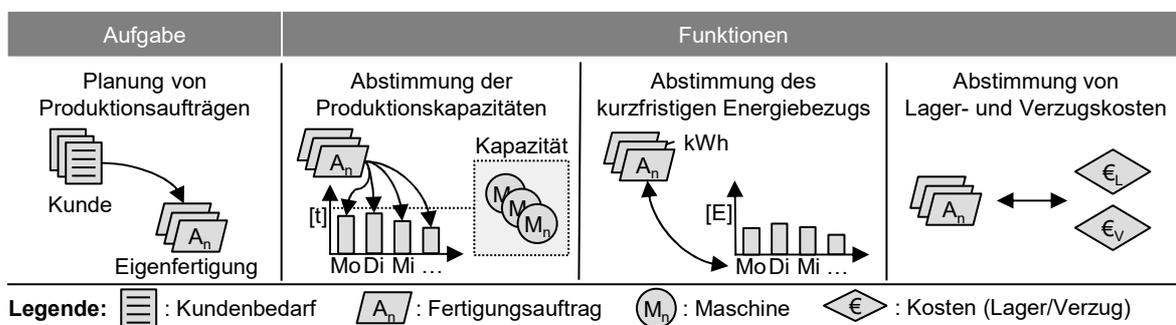


Abbildung 48: Aufgabe und Funktionen des Mikromodells

7.3.5 Formulierung des Mikromodells

Das Mikromodell weist einige Parallelen zu dem in Abschnitt 7.3.3 beschriebenen Makromodell auf. Der Hauptunterschied bezieht sich auf die Verschiebung des Fokus von der mittelfristigen quartalsweisen Sichtweise hin zu einer kurzfristigen wochen- bis tageweisen Betrachtung. Als zentrale Fragestellung gilt hier die Abwägung zwischen Energiekosten und Strafen für Terminüberschreitungen. Kapitalkosten treten bei der kurzfristigen Betrachtung in den Hintergrund. Wie im Makromodell liegt auch im Mikromodell das Hauptaugenmerk auf produktspezifischen Kennzahlen, wie z. B. der Bearbeitungsdauer sowie dem Energieverbrauch. Allerdings werden darüber hinaus auch die kurzfristigen Kundenbedarfe und das kurzfristige Energiemengenmodell betrachtet. Diesbezüglich werden Tage bzw. Schichten dargestellt und eine Verteilung der Aufträge sowie ein günstiger Zukauf von Energiemengen vorgeschlagen. Das Entscheidungsproblem wird im folgenden Abschnitt unter den Gesichtspunkten der Kostenminimierung sowie der entsprechenden Nebenbedingungen definiert und formuliert.

K^{d+}	Kosten für Terminüberschreitungen je Einheit und Periode
Y_{ps}	Lagerbestand von Produkt p in Periode s
K_{ps}^y	Lagerkosten pro Einheit in Periode s in €

7.3.5.2 Nebenbedingungen

Anders als beim Makromodell werden zur Formulierung des kurzfristigen Entscheidungsproblems neun Nebenbedingungen benötigt. Der Produktionsindikator als zusätzliche Nebenbedingung bestimmt, ob ein spezifisches Produkt in einer Mikroperiode bzw. an einem Produktionstag gefertigt wird. Die nötigen Bedingungen des Mikromodells werden wie folgt formuliert:

Bestandsgleichungen

Gleichungen (7.16a) und (7.16b) bilden die Bestandsgleichungen ab. Der Bestand der ersten Periode errechnet sich in der Nebenbedingung (7.16a) durch den Anfangslagerbestand zu Beginn des Planungshorizonts, die Produktionsmenge, die Fehlmengen und die Nachfrage in der ersten Periode. In den darauffolgenden Perioden berechnet sich der Lagerbestand aus dem Lagerbestand der Vorperiode, der Produktionsmenge, der Fehlmenge sowie der Nachfrage der aktuellen Periode sowie den Fehlmengen der Vorperiode. Durch die Berücksichtigung der Fehlmengen der Vorperiode wird gewährleistet, dass Produkte, die nicht termingerecht ausgeliefert werden, später ausgeliefert werden müssen.

$$Y_{p,1} = Y_p^0 + Q_{p,1} + D_{p,1}^+ - D_{p,1} \quad \forall p \in P \quad (7.16a)$$

$$Y_{ps} = Y_{p,s-1} + Q_{ps} + D_{ps}^+ - D_{ps} - D_{p,s-1}^+ \quad \forall p \in P, s \in S \setminus \{1\} \quad (7.16b)$$

mit

Y_p^0 Anfangslagerbestand von Produkt p in Stück

Q_{ps} Produktionsmenge von Produkt p in Periode s in Stück

D_{ps} Nachfrage nach Produkt p in Periode s in Stück

Produktionsindikator

Die Nebenbedingung (17.7) schafft die Verknüpfung des Produktionsindikators mit der Produktionsmenge. Die Binärvariable nimmt den Wert 1 an, wenn in Periode s

das Produkt p produziert wird. Ist dies der Fall, stellt die große Konstante M sicher, dass die Produktionsmenge einen beliebig hohen Wert annehmen kann.

$$Q_{ps} \leq f_{ps} \cdot M \quad \forall p \in P, s \in S \quad (7.17)$$

mit

f_{ps} Indikator, ob Produkt p in Periode s produziert wird

M Big M, große Konstante

Auftragszahl

Durch die Gleichungen (7.18) wird berechnet, wie viele Aufträge je Periode von jedem Produkt bearbeitet werden. Aufgrund der Beschränkung von A_{ps} auf ganzzahlige Werte nimmt die Variable den Wert der Anzahl der Lose eines Produkts an, wobei eine maximale Losgröße vorgegeben ist.

$$\frac{Q_{ps}}{l} \leq A_{ps} \quad \forall p \in P, s \in S \quad (7.18)$$

mit

l Maximale Losgröße

A_{ps} Anzahl der Lose von Produkt p in Periode s

Produktionskapazität

Nebenbedingung (7.19) stellt sicher, dass die Produktionskapazität in keiner Periode überschritten wird. Die Gesamtbearbeitungszeit der einzelnen Produkte sowie die Haupt- und Nebenzeiten der Aufträge dürfen nicht mehr Zeit in Anspruch nehmen als verfügbar ist. Die Auftragshauptzeit fällt dabei für jeden Auftrag einmal an, wobei die Auftragsnebenzeit, welche die Rüstzeit enthält, maximal einmal je Produkttyp pro Periode gezählt wird. Die Bearbeitungszeit eines Produktes wird auf Basis des spezifischen Produktmodells aus den kumulierten Hauptzeiten der AVOs berechnet. Weitere Zeiten zwischen den Maschinen (z. B. Liege oder Transportzeiten) bzw. den Lagern werden vernachlässigt.

$$\sum_{p \in P} Q_{ps} \cdot z_p^{ph} + \sum_{p \in P} A_{ps} \cdot z_p^{ah} + \sum_{p \in P} f_{ps} \cdot z_p^{an} \leq V_s \quad \forall s \in S \quad (7.19)$$

mit

z_p^{ph} Bearbeitungszeit für eine Einheit von Produkt p (Hauptzeit)

z_p^{ah}	Hauptzeit für einen Auftrag von Produkt p
z_p^{an}	Nebenzeit für einen Auftrag von Produkt p
V_s	Zeitliche Verfügbarkeit der Produktion in Periode s

Lagerkapazität

Gemäß Nebenbedingung (7.20) darf der Lagerbestand die Lagerverfügbarkeit in keiner Periode überschreiten.

$$\sum_{p \in P} Y_{ps} \leq Y_s \quad \forall s \in S \quad (7.20)$$

mit
 Y_s Lagerverfügbarkeit in Periode t

Engpasskapazität

Neben der allgemeinen Produktionskapazität betrachtet die Nebenbedingung (7.21) die Produktionskapazität der Engpassressource. Die Bearbeitungszeit der Produkte und die Auftragswechselzeiten an der Ressource dürfen deren Kapazität in keiner Periode überschreiten.

$$\sum_{p \in P} Q_{ps} \cdot b_p^p + \sum_{p \in P} A_{ps} \cdot b_p^a \leq B_s \quad \forall s \in S \quad (7.21)$$

mit
 b_p^p Bearbeitungszeit des Produkts p an der Engpassressource
 b_p^a Auftragswechselzeit von Produkt p an der Engpassressource
 B_s Zeitliche Verfügbarkeit der Engpassressource in Periode s

Energiemenge

Bedingung (7.22) bestimmt, dass die benötigte Energie zur Produktion sowie für Nebenzeiten nicht größer sein darf als die verfügbare Energie aus Eigenerzeugung zuzüglich etwaiger bereits zugekaufter Energie (z. B. vom Terminmarkt). Die Energiemenge stellt die verfügbare Energie dar, die direkt und ohne Zwischenspeicher für die Produktion zur Verwendung kommt. Deshalb wird je Periode lediglich jene Energiemenge aufsummiert, die während der Auftragsbearbeitung benötigt wird. Weitere Energiebedarfe der Produktion (z. B. Beleuchtung) und deren Ressourcen (z. B. Nebenanlagen) werden nicht berücksichtigt.

$$\sum_{p \in P} Q_{ps} \cdot E_p^{ph} + \sum_{p \in P} A_{ps} \cdot E_p^{ah} + \sum_{p \in P} f_{ps} \cdot E_p^{an} \leq E_s^e + E_s^v \quad \forall s \in S \quad (7.22)$$

mit

E_p^{ph} Energiemenge zur Herstellung einer Einheit des Produkts p (Hauptzeit)

E_p^{ah} Auftragspezifischer Energiebedarf zur Herstellung eines Loses des Produkts p (Hauptzeit)

E_p^{an} Auftragspezifischer Energiebedarf zur Herstellung eines Loses des Produkts p (Nebenzeit)

E_s^e Vorhandene Energiemenge in Periode s

Emissionsgrenzwert

Die Restriktion (7.23) legt fest, dass in jeder Periode die Emissionen der beschafften Energie und der Eigenproduktion relativ zur Energiemenge einen vorgegebenen Grenzwert nicht überschreiten dürfen.

$$E_s^v \cdot \varepsilon_s^v + E_s^e \cdot \varepsilon_s^e \leq G_s \cdot (E_s^v + E_s^e) \quad \forall s \in S \quad (7.23)$$

mit

ε_s^v Emission einer zusätzlich beschafften Energieeinheit in Periode s

ε_s^e Emission einer Energieeinheit der vorhandenen Energiemenge in Periode s

G_s Grenzwert der durchschnittlichen Emissionen

Energiekostengrenzwert

Wie Bedingung (7.24) vorgibt, dürfen die durchschnittlichen Kosten der beschafften Energie sowie der Eigenerzeugung einen gegebenen Grenzwert nicht überschreiten.

$$E_s^v \cdot K_s^v + E_s^e \cdot K_s^e \leq K_s \cdot (E_s^v + E_s^e) \quad \forall s \in S \quad (7.24)$$

mit

K_s^e Energiekosten der Eigenproduktion in Periode s

K_s Grenzwert der Energiekosten

7.3.5.3 Nichtnegativitätsbedingungen

Die Nebenbedingungen (7.25), (7.26), (7.28) und (7.27) legen fest, dass die Produktionsmenge, die Lagermenge sowie die Auftragsanzahl ganzzahlige, nicht negative Werte annehmen müssen. Die Fehlmengen und die Energiezukaufsmengen dürfen laut den Restriktionen (7.28) und (7.29) nicht negativ sein. Darüber hinaus ist der Produktionsindikator in Bedingung (7.30) als Binärvariable deklariert.

$$Q_{ps} \in \mathbb{Z}^0 \quad \forall p \in P, s \in S \quad (7.25)$$

$$Y_{ps} \in \mathbb{Z}^0 \quad \forall p \in P, s \in S \quad (7.26)$$

$$A_{ps} \in \mathbb{Z}^0 \quad \forall p \in P, s \in S \quad (7.27)$$

$$D_{ps}^+ \geq 0 \quad \forall p \in P, s \in S \quad (7.28)$$

$$E_s^v \geq 0 \quad \forall s \in S \quad (7.29)$$

$$f_{ps} \in \{0,1\} \quad \forall p \in P, s \in S \quad (7.30)$$

Durch die Formulierung der oben genannten Bedingungen verknüpft das Mikromodell die kurzfristigen Informationen der Produktion, der Kundenbedarfe und der Energiebezugsituation in Form des generierten kurzfristigen Energiemengenmodells. In welcher Form Makro- und Mikromodell miteinander verknüpft sind, gelangt im nächsten Abschnitt zur Erörterung.

7.4 Ansatz einer kurzfristigen energiebezugsorientierten Ablaufplanung

7.4.1 Allgemeines

Für die Lösung von ablaufbezogenen Auftragsplanungsproblemen innerhalb einer Planungsperiode eignet sich die gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung lediglich bedingt (vgl. Abschnitt 2.2.7). Im Folgenden ist ein geeignetes Lösungswerkzeug zu identifizieren sowie für die Problemstellung der energiebezugsorientierten Maschinenbelegung anzupassen.

7.4.2 Lösungswerkzeuge der Reihenfolgeplanung

Im Rahmen der Reihenfolgeplanung eignet sich die Maschinenbelegungsplanung, um die Fertigungsaufträge den Produktionsressourcen zeitlich zuzuordnen. Hierbei sind Kapazitätsrestriktionen und Maschinenreihenfolgebedingungen einzuhalten (KÜPPER & HELBER 2004). Aufgrund der hohen Anzahl an möglichen Abläufen, Variablen und Nebenbedingungen und des damit verbundenen hohen Rechenaufwands erweist sich eine exakte Lösung des Entscheidungsproblems bereits für wenig umfangreiche Problemstellungen in der Praxis als nicht zweckmäßig (vgl. Abschnitt 2.2.7.2). Für die Lösung solcher Probleme sind deshalb Heuristiken heranzuziehen, welche sich in Eröffnungsverfahren und Verbesserungsverfahren unterteilen lassen. Die Auswahl geeigneter Verfahren für die energieorientierte Maschinenbelegung wird in den folgenden Abschnitten betrachtet.

7.4.2.1 Eröffnungsverfahren

Zielsetzung eines Eröffnungsverfahrens bezieht sich auf die Bestimmung einer einzelnen zulässigen Lösung für das Maschinenbelegungsproblem. Ein grundlegender Verfahrensschritt stellt dabei die iterative Vervollständigung der vorliegenden Teillösung zur Gesamtlösung dar. Die ermittelte Gesamtlösung ist häufig der Ausgangspunkt für darauffolgende optimierende Suchverfahren. Vertreter von Eröffnungsverfahren sind der Giffler-Thompson-Algorithmus (GTA) sowie Prioritätsregelverfahren (EVERS 2002, DOMSCHKE & SCHOLL 2007, ZÄPFEL ET AL. 2010). Beim GTA handelt es sich um ein Eröffnungsverfahren, welches iterativ eine Gesamtlösung erstellt sowie an eine Vorwärtsterminierung angelehnt ist. Diese ermittelt in jedem Iterationsschritt zuerst die vorliegenden Fertigungsaufträge mit dem jeweils frühesten Anfangs- und Endzeitpunkt. Daraus generiert sich schrittweise ein Maschinenbelegungsplan. Der GTA bricht ab, wenn alle Aufträge eingeplant sind. Für den Fall, dass zwei Aufträge gleichzeitig mindestens dieselbe Maschine belegen sollen, tritt ein Lösungskonflikt in der Terminierung auf. Ein solcher Konflikt erfordert eine Reihenfolgeentscheidung und damit eine Priorisierung der Aufträge. Dabei kommen Zufallszahlen oder Prioritätsregeln zum Einsatz. Eine Prioritätsregel erlaubt eine Auswahl aus der Menge der in Konflikt stehenden Aufträge anhand ihrer Eigenschaften sowie den daraus resultierenden Zahlenwerten. In der Literatur sind Prioritätsregeln in großer Zahl zu finden. Exemplarisch werden in Tabelle 7 drei Regeln vorgestellt.

Tabelle 7: Exemparische Prioritätsregeln (nach TEICH 1998, ZÄPFEL ET AL. 2010)

Prioritätsregel	Beschreibung
First In First Out Regel (FIFO) oder First Come First Served Regel (FCFS)	Es erhält der Auftrag Priorität, welcher zuerst auf der betrachteten Maschine ankommt.
Kürzeste Operationszeit Regel (KOZ)	Es erhält der Auftrag Priorität, welcher die kürzeste Bearbeitungszeit besitzt.
Frühester Liefertermin Regel (FLT)	Es erhält der Auftrag Priorität, welcher den frühesten Liefertermin besitzt.

Sollen mehrere Ziele der Planung verfolgt werden, lassen sich die Prioritätsregeln auf unterschiedliche Weisen verknüpfen und kombinierte Prioritätsregeln bilden (ZÄPFEL ET AL. 2010). Da kein festgelegtes Verfahren zur energiebezugsorientierten Maschinenbelegung vorherrscht, gilt es, ein geeignetes Eröffnungsverfahren aus der Kombination des GTA und der Prioritätsregeln zu entwickeln.

7.4.2.2 Suchverfahren

Ein Suchverfahren startet mit einer zulässigen Gesamtlösung des Eröffnungsverfahrens. In jeder Iteration wird die vorliegende Lösung durch eine Transformationsvorschrift in eine neue Lösung überführt. Anschließend wird die Lösung anhand von Zielgrößenparametern bewertet. Darauf folgt die Entscheidung, ob die neue Lösung ausgewählt und übernommen wird. Bei reinen Verbesserungsverfahren besteht lediglich die Möglichkeit, zu einer besseren Lösung überzugehen. Sie enden, sobald sie ein lokales Optimum gefunden haben. Um dieses lokale Optimum wieder verlassen zu können, muss eine zwischenzeitliche Verschlechterung des Zielfunktionswertes erlaubt werden. Heuristiken mit dieser Möglichkeit werden als lokale Suchverfahren bezeichnet (DOMSCHKE & SCHOLL 2007). Beispiele für lokale Suchverfahren sind das Simulated Annealing (SA), der Ameisen-Algorithmus (AA) und Genetische Algorithmen (GA) (TEICH 1998). Diese Verfahren werden auch Metaheuristiken genannt, da ihr Grundprinzip zur Steuerung des Suchprozesses auf eine Vielzahl von Problemen anwendbar ist (DOMSCHKE & SCHOLL 2007). Weitere Verfahren lassen sich der einschlägigen Fachliteratur entnehmen (vgl. DOMSCHKE & DREXL 2007).

Innerhalb der Metaheuristiken stellt das SA einen Ansatz dar, welcher im Vergleich zu anderen Heuristiken einen hohen Anpassungsgrad bzgl. der Zielfunktion und der Restriktionen aufweist. Wesentlicher Aspekt ist jedoch, dass das SA im direkten Vergleich statistisch bessere Lösungen findet als z. B. GA oder der AA (INGBER 1993, TEICH 1998). Dies begründet sich in der Fähigkeit des SA, sowohl eine Brei-

ten- als auch eine Tiefensuche abzubilden. Ebenfalls für die Aufgabenstellung einer energiebezugsorientierten Reihenfolgeplanung hat sich das SA als geeignet erwiesen (KELLER ET AL. 2015, KELLER & REINHART 2016B). Allerdings ist das SA rechenaufwendiger sowie durch seine sequenzielle Natur schlecht zu parallelisieren, was zu längeren Berechnungszeiten führt (INGBER 1993). Da im Kontext dieser Arbeit die periodenübergreifende Auftragsplanung adressiert wird, sind die Kriterien der Lösungsqualität und der Anpassungsfähigkeit höher zu priorisieren als die Berechnungszeit, solange diese sich als noch praktikabel zeigt. Im folgenden Abschnitt wird das SA eingeführt sowie in Bezug zur Maschinenbelegung gesetzt.

7.4.2.3 Simulated Annealing

Die Funktionsweise des SA stammt aus der Physik und bildet die atomare Struktur von geschmolzenen bzw. erwärmten Festkörpern bei einem Abkühlungsvorgang nach. Abbildung 49 zeigt die Charakteristika des SA.

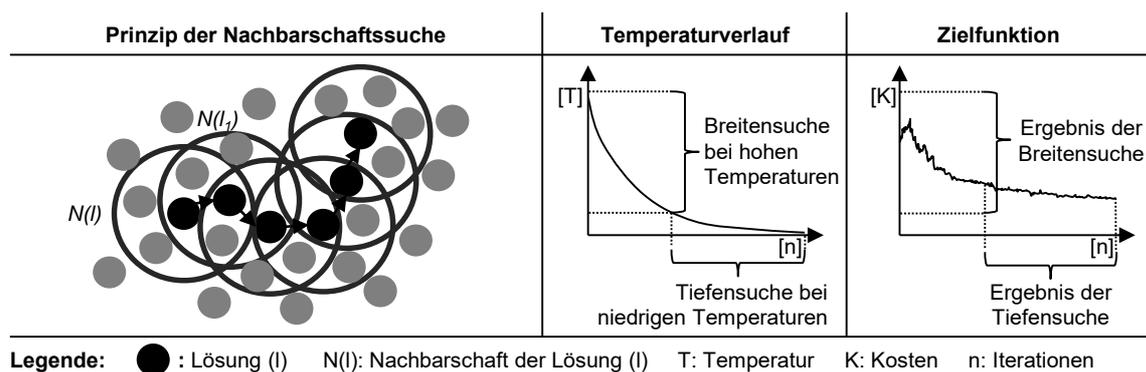


Abbildung 49: Überblick zur Charakteristik des Simulated Annealing

Ziel ist es, einen Zustand mit minimaler Energie zu erreichen, bei dem die Atome in einer kristallinen Struktur ohne Gitterfehler angeordnet sind. Ausgehend von einer initialen Lösung l wird die Nachbarschaft $N(l)$ durchsucht, um eine neue, verbesserte Lösung l' zu finden. Als Nachbarschaft $N(l)$ wird dabei die Menge sämtlicher Lösungen bezeichnet, die in der Umgebung l liegen (ZÄPFEL ET AL. 2010). Essenzielle Parameter des SA sind die Starttemperatur T_0 und die Verminderungsvorschrift der Temperatur T im weiteren Verlauf (ZÄPFEL ET AL. 2010). Eine mögliche Verminderungsvorschrift für die Temperatur wird als geometrisches Abkühlschema (7.31) bezeichnet.

$$T_n = T_{n-1} \cdot \alpha \quad (7.31)$$

mit

T Temperatur

α Abkühlfaktor $0,9 < \alpha < 1$

Damit entsteht eine exponentiell fallende Temperaturkurve (vgl. Abbildung 50). Ein Merkmal von Abkühlvorgängen stellt die Möglichkeit dar, dass auch bei tiefen Temperaturen noch Zustände mit hoher Energie auftreten können. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten wird durch die Boltzmann-Verteilung (7.32) beschrieben:

$$p(E) = e^{-\frac{E}{k_B T}} \quad (7.32)$$

mit

e Eulersche Zahl

k_B Boltzmannkonstante

E Energie

Durch dieses Merkmal akzeptiert der SA-Algorithmus vorübergehend auch schlechtere Lösungen, was es ermöglicht, lokale Minima zu verlassen (TEICH 1998, ZÄPFEL ET AL. 2010). Dies geschieht vornehmlich am Anfang der Optimierung, da zu Beginn die Temperatur sehr hoch ist. Dadurch erreicht der Algorithmus eine Breitensuche im Lösungsraum. Mit dem Absinken der Temperatur sinkt ebenfalls die Wahrscheinlichkeit, mit der schlechtere Lösungen akzeptiert werden, wodurch mit der Zeit die Tiefensuche an Bedeutung gewinnt. Das Ermöglichen der Breiten- und Tiefensuche ist entscheidend für eine hohe Effizienz und Effektivität des Algorithmus.

Im Kontext einer Maschinenbelegung bildet der Parameter Kosten K die Zielgröße anstelle des ursprünglichen Zielparameters Energie. Solange mögliche Abbruchkriterien noch nicht erreicht sind, wird ausgehend von der initialen Lösung durch eine Transformation eine Lösung l' gebildet und deren Kosten $K(l')$ werden berechnet. Falls die Kosten von l' niedriger sind als von l , so wird l' für l übernommen. Falls die Kosten von l' höher sind, wird l' mit der Wahrscheinlichkeit p (7.33) übernommen, anderenfalls bleibt l gleich.

$$p = e^{-\frac{K(l')-K(l)}{T}} \quad (7.33)$$

mit

$K(l)$ Kosten der bestehenden Lösung

$K(l')$ Kosten der neu berechneten Lösung

Anschließend wird der Temperaturwert abgesenkt, was den Beginn einer neuen Iteration ermöglicht. Sobald ein Abbruchkriterium erfüllt ist, wird die gefundene finale Lösung ausgegeben (ZÄPFEL ET AL. 2010). Um die Ausführung des Algorithmus an einer passenden Stelle zu beenden sowie die gefundene Lösung auszugeben, existieren verschiedene Abbruchkriterien. Beispiele sind hier die Definition

- einer unteren Schranke der Temperatur T_{stopp} ,
- einer maximalen Anzahl von Iterationen ohne Verbesserung oder
- einer maximalen Anzahl neu generierter Lösungen (TEICH 1998).

7.4.3 Aufbau der energiebezugsorientierten Maschinenbelegung

Zielsetzung der Maschinenbelegung besteht darin, die aus dem Leistungsmodell generierten Leistungsstufen je Intervall bei der Einplanung der im Mikromodell berechneten Fertigungsaufträge zu berücksichtigen. Dabei sind die Planungsobjekte, Aufträge, Produkte und Maschinen in Bezug auf ihren Zeit- und elektrischen Leistungsbedarf abzustimmen. Hierzu gilt es, mithilfe einer Initialisierung sowie eines heuristischen Suchverfahrens eine gute und gültige Lösung zu finden. In diesem Schritt wird die Planungsperiode (z. B. eine Schicht) in Intervalle (z. B. fünf Minuten) unterteilt, innerhalb welcher die Fertigungsaufträge auf die Maschinen eingeplant werden. Neben den Bedingungen, die sich aus den Bearbeitungsschritten der einzelnen Aufträge und Produkte ergeben, gilt es, die unterschiedlichen Maschinenzustände der Maschinenmodelle zu beachten. Ein vereinfachtes Beispiel dafür ist Abbildung 50 zu entnehmen.

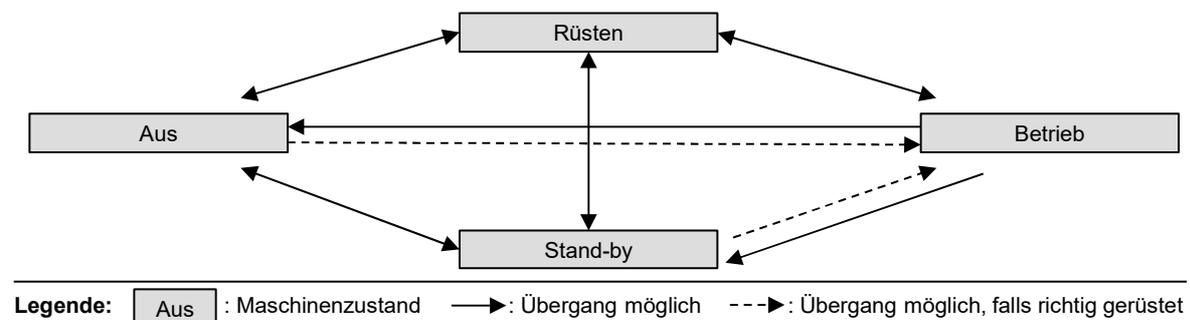


Abbildung 50: Vereinfachte Transformationsvorschriften einer Anlage

Diese bilden sowohl ressourcenspezifische Kapazitätsrestriktionen als auch Energiebedarfe ab und sind in entsprechenden Transformationsvorschriften für die Maschinenübergänge zu übertragen.

Die einzelnen Maschinenzustände bilden die Basis zur Erstellung eines Gantt-Diagramms, welches die Informationen des zu planenden Produktionssystems zusammenfasst. Dabei wird durch eine Visualisierung das Ergebnis der Maschinenbelegung zurückgemeldet. Diese lässt sich im Bedarfsfall manuell anpassen bzw. bei Eignung der Auftragsfreigabe übermitteln. Eine Manipulation einer bestehenden Planung kann grundsätzlich durch die Verschiebung der Maschinenzustände oder durch den Tausch von Produktionsaufträgen erreicht werden. Abbildung 51 zeigt vereinfacht die Manipulationsmöglichkeiten der Maschinenbelegung. Im folgenden Abschnitt werden diese Grundannahmen für die Maschinenbelegung in Funktionen der einzelnen Heuristiken überführt.

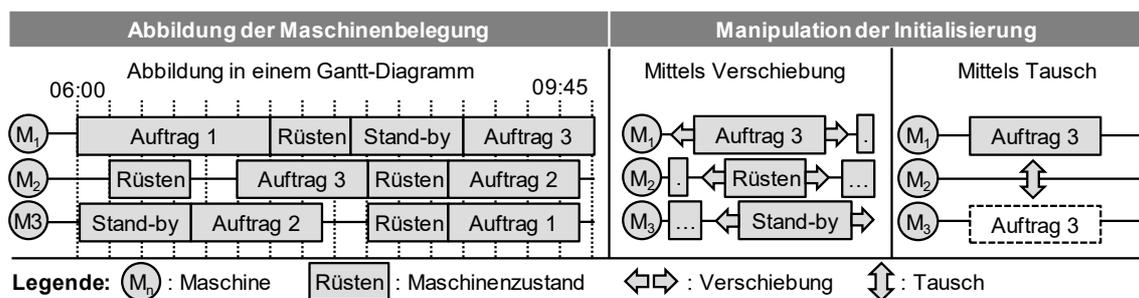


Abbildung 51: Manipulationsmöglichkeiten in der Maschinenbelegung

7.4.4 Formulierung der energiebezugsorientierten Maschinenbelegung

Die Grundmanipulationen lassen sich in der Initialisierung und im Suchverfahren des SA nutzen, um eine Ausrichtung der Maschinenbelegung an ein variables Lastmanagement umzusetzen. Hierzu werden in den folgenden Abschnitten einzelne Aufgaben und Funktionen der beiden Heuristiken beschrieben und dargestellt.

7.4.4.1 Aufgaben und Funktionen der Initialisierung

Die Aufgabe der Initialisierung beinhaltet die Verteilung der Fertigungsaufträge auf die Maschinen sowie eine gültige Reihenfolgeplanung innerhalb mehrerer Planungsperioden. Zudem gilt es, die Maschinenzustände und den damit verbundenen Bedarf an elektrischer Leistung in der Reihenfolgeplanung zu berücksichtigen. Zur Umsetzung kommt ein modifizierter GTA zum Einsatz, welcher neben der Vorwärtsterminierung auch eine Rückwärtsterminierung aufweist. Für jede Planungspe-

riode (z. B. eine Schicht) werden die AVOs eines Auftrags an jedem Maschinentyp nacheinander geplant. Dabei werden drei Kernfunktionen im Initialisierungsablauf genutzt, um eine Ausrichtung an ein variables Lastmanagement zu erreichen. Abbildung 52 zeigt eine Übersicht der Initialisierungsfunktionen.

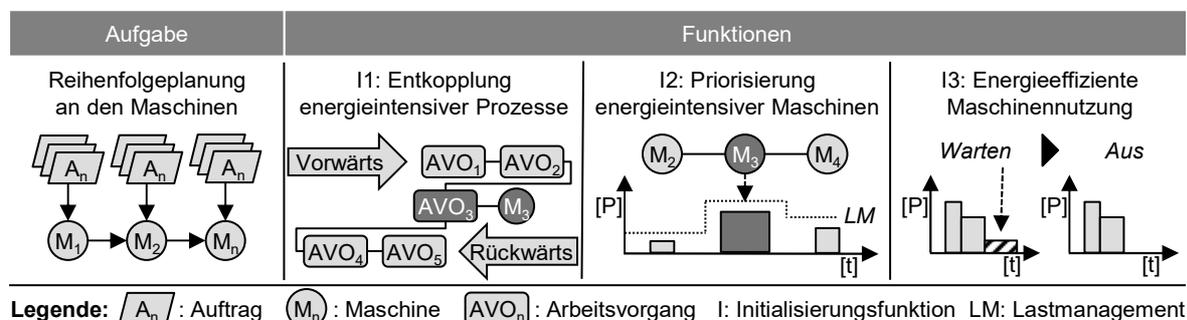


Abbildung 52: Aufgabe und Funktionen der Initialisierung

Die erste Funktion (I1) nutzt die Modifizierung des GTA mit der Zielsetzung energieintensive Prozesse innerhalb einer Arbeitsfolge zu entkoppeln. Hierzu wird der AVO gewählt, der an einer Maschine mit dem höchsten Leistungsbedarf bearbeitet wird bzw. einen Hauptenergieverbraucher darstellt. Sämtliche AVOs, die im Ablauf vorher durchzuführen sind, werden entsprechend der Priorisierungsregel *Früheste Liefertermin Regel (FLT)* mittels einer Vorwärtsterminierung geplant. Die AVOs, die dem energieintensiven AVO nachgelagert sind, werden ebenfalls nach der FLT-Regel rückwärtsterminiert. Existieren mehrere parallele Maschinen, wird per Zufall ausgewählt, welcher Arbeitsvorgang auf welcher Maschine bearbeitet wird. Mit diesem Vorgehen entsteht bei der Einplanung der Aufträge auf die Maschinen ein Zeitfenster zwischen den jeweiligen AVOs, in welche sich die energieintensiven AFOs frei einplanen lassen.

Die zweite Funktion (I2) nutzt den generierten Freiheitsgrad, um den Hauptverbraucher möglichst gut an das variable Lastmanagement auszurichten. Hierzu werden die energieintensiven AVOs in mögliche Zeitfenster eingeplant, die durch das Lastmanagement mit einer ausreichenden Leistungshöhe gekennzeichnet sind. Zudem gilt es, die Bedingung zu erfüllen, dass Reihenfolgerestriktionen in der Arbeitsfolge eines Auftrages nicht verletzt werden. Dieses Vorgehen lässt sich als eine eigene Priorisierungsregel zusammenfassen, welche die Zeitfenster einer Planungsperiode nach ihrer verfügbaren Leistungshöhe für energieintensive AVOs priorisiert.

Zielsetzung der dritten Funktion (I3) ist es, einen energieeffizienten Betrieb sicherzustellen. Um dies umzusetzen, werden sämtliche Maschinen in einer Planungsperi-

ode anhand ihrer Zustände geprüft und ggf. manipuliert. Das geschieht durch die Analyse und die Bewertung von Brachzeiten (z. B. Warten bzw. Stand-by) und den damit verbundenen Bedarf an elektrischer Leistung. Sofern die Maschinen die Möglichkeit besitzen, ausgeschaltet zu werden, nutzt die Funktion diese Eigenschaft und schaltet die Maschinen innerhalb der Brachzeiten aus bzw. in einen energieeffizienten Zustand.

Zur Verdeutlichung der Funktionsweise zeigt Abbildung 53 einen vereinfachten Pseudocode des Initialisierungsalgorithmus. Das Ergebnis der Initialisierung ist ein vollständiger Maschinenbelegungsplan, der eine mögliche gültige Lösung der Problemstellung darstellt und mit welcher der SA-Algorithmus beginnen kann, die Nachbarschaft nach besseren Lösungen abzusuchen.

```
Pseudocode der Initialisierung  
  
Lade Leistungsgrenzen für den Planungsintervall  
Initialisierung Lösung ()  
//starte Initialisierungsfunktion1  
  durchsuche alle AVOs nach Maschinentyp==1 && Termin==Schicht1  
    zufällige Maschinenauswahl auf Maschinentyp==1  
    Vorwärtsterminierung mit Hochfahren und Rüsten  
  
  durchsuche alle AVOs nach Maschinentyp==2 && Termin==Schicht1  
    zufällige Maschinenauswahl auf Maschinentyp==2 && ermittle früheste Anfangszeit nach AVO  
    Vorwärtsterminierung mit Hochfahren und Rüsten  
  
  durchsuche alle AVO nach Maschinentyp==X && Termin==Schicht1  
    zufällige Maschinenauswahl auf Maschinentyp==X  
    Rückwärtsterminierung mit Hochfahren und Rüsten  
  
  durchsuche alle AVOs nach Maschinentyp==X-1 && Termin==Schicht1  
    zufällige Maschinenauswahl auf Maschinentyp==X-1 && ermittle spätesten Endzeitpunkt nach AVO  
    Rückwärtsterminierung mit Hochfahren und Rüsten  
  
//starte Initialisierungsfunktion2  
  durchsuche alle AVO nach Maschinentyp==Hauptverbraucher && Termin==Schicht1  
    zufällige Maschinenauswahl auf Maschinentyp==Hauptverbraucher  
    ermittle frühesten und spätesten Anfangszeitpunkt  
    einplanen mit Hochfahren und Rüsten bei höchster Leistungsgrenze innerhalb des Zeitfensters  
  
//Schicht 1 abgeschlossen  
//starte Initialisierungsfunktion3  
//weitere Schichten analog
```

Abbildung 53: Exemplarischer Pseudocode der Initialisierung

7.4.4.2 Simulated Annealing als heuristisches Suchverfahren

Nachdem durch die Initialisierung eine erste gültige Lösung gefunden ist, gilt es, diese im Rahmen des Suchverfahrens zu verbessern. Hierzu ist die Formulierung einer Zielfunktion nötig, welche die bestehende Lösung mit einer benachbarten Lösung vergleicht. Im Zuge der weiteren Betrachtung finden in der Zielfunktion nur energiebezugsrelevante Kostengrößen Berücksichtigung. Eine Erweiterung der Ziel-

funktion um weitere Kostenarten ist allerdings je nach Anwendungsfall möglich. Abgeleitet aus dem Leistungsmodell, bilden die einzelnen Lastmanagementstufen eines jeden Zeitintervalls den Rahmen für die Ausrichtung der Maschinenbelegung an ein variables Lastmanagement. Die einzelnen Maschinenzustände sowie die zugeordneten Leistungsbedarfe werden je Zeitintervall aufsummiert. Sofern der Leistungsbedarf in einem Intervall nicht die definierte Lastmanagementstufe übersteigt, wird der durchschnittliche Energiekostensatz der Planungsperiode dafür angesetzt. Sollte der Leistungsbedarf überstiegen werden, werden für die zusätzlich benötigten Leistungseinheiten Strafkosten fällig, da eine Überschreitung im Leistungsmodell nicht vorgesehen ist. Somit ergibt sich folgende Kostenfunktion (7.34) für das SA:

$$K = \sum_{x \in X} P_x \cdot k_x^E + \sum_{x \in X} (P_x - P_x^{LM}) \cdot k_x^{LM} \quad (7.34)$$

mit

$x \in X := \{1, \dots, X^{max}\}$ Intervall der Planungsperiode

P_x Benötigte Leistung im Intervall x

P_x^{LM} Leistungsgrenze des Intervalls x

k_x^E Kosten je Leistungseinheit im Intervall x

k_x^{LM} Strafkosten bei Übertretung der Leistungsgrenze je Leistungseinheit im Intervall x

Nach der Bewertung der Initiallösung manipuliert der Algorithmus im nächsten Schritt die Maschinenzustände und verschiebt bzw. tauscht Aufträge zwischen den Maschinen, um eine neue gültige Lösung zu generieren. Diese wird nun als $K(l')$ bewertet und mit der bestehenden Lösung $K(l)$ verglichen. Abbildung 54 zeigt eine Übersicht der Optimierungsfunktionen.

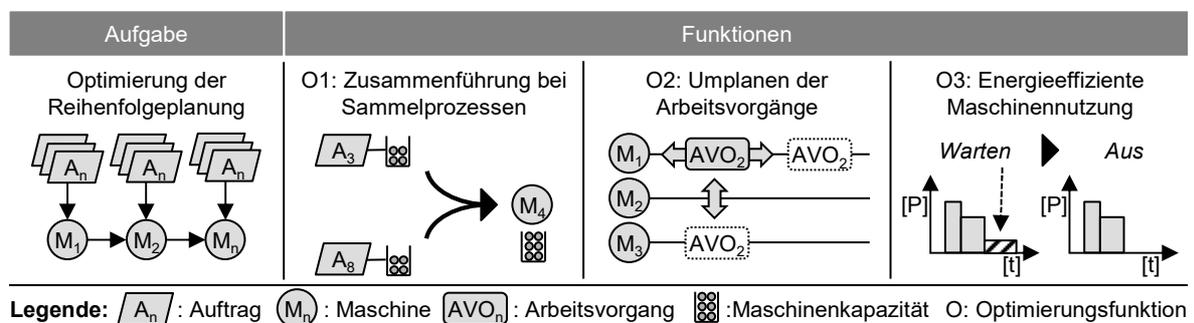


Abbildung 54: Aufgabe und Funktionen des Simulated Annealing

Neben der reinen Verbesserung durch den Vergleich von K werden wiederum drei Erweiterungsfunktionen im Suchablauf genutzt, um eine effiziente Verbesserung der Maschinenbelegung an ein variables Lastmanagement zu erreichen. Die erste Funktion (O1) nutzt die Kapazitätsinformationen der Maschinen. Sofern eine Maschine mehrere Produkte gleichzeitig bearbeiten kann, stellt diese Funktion sicher, dass dies unter einer hohen Auslastung geschieht. Hierzu wird die Auslastung dieser Anlagen gesondert bewertet. So lässt sich bspw. der Zielfunktionsterm K (7.35) durch die Integration einer Auslastungsstrafe erweitern.

$$K = \sum_{x \in X} P_x \cdot k_x^E + \sum_{x \in X} (P_x - P_x^{LM}) \cdot k_x^{LM} + \sum_{x \in X} (2_x^{-Z})^{-1} \cdot k_x^Z \quad (7.35)$$

mit

Z

Freie Kapazitäten im Intervall x

k_x^Z

Strafkosten je freier Kapazität im Intervall x

Die Formulierung in einer invertierten exponentiellen Funktion ist deshalb zweckhaft, da eine Gleichverteilung der Kapazitäten aus dem Blickwinkel der Energieeffizienz den schlechtesten Auslastungszustand darstellt. Aufgrund der exponentiellen Bestrafung der Gleichverteilung wird der Algorithmus angeregt, die Kapazitäten so weit wie möglich in den Intervallen zusammenzufassen. Je nach Anzahl der freien Kapazitäten kann der Strafkostensatz im Anwendungsfall variiert werden, damit K nicht durch die Verbesserung der Auslastung dominiert wird. Alternativ lässt sich die Auslastungsstrafe auch in einer Nebenbedingung ausgliedern.

Die zweite Funktion (O2) nutzt zufallsbasiert (ID_Fall) bestehende Freiheitsgrade, um Aufträge neu einzuplanen. Sofern ein AVO auf unterschiedlichen Maschinen gefertigt werden kann, prüft diese Funktion, ob sich durch die Umplanung eine Verbesserung ergibt. Zur Umplanung wird im ersten Schritt der Arbeitsvorgang ausgeplant und die Maschine während der bisherigen Produktionszeit je nach Maschinentyp entweder in Stand-by gesetzt oder ausgeschaltet. Auf der neuen Maschine bzw. zum neuen Startzeitpunkt erfolgt nun eine Prüfung dahingehend, ob der Arbeitsvorgang eingeplant werden kann. Dabei darf die Maschine nicht durch einen anderen Auftrag belegt sein oder sich in der Wartung befinden. Außerdem muss freie Kapazität auf der Maschine vorhanden sein. Je nach Maschinentyp ist die Maschine auch hochzufahren oder muss richtig gerüstet sein. Falls sämtliche Überprüfungen positiv abgeschlossen sind, kann der Arbeitsvorgang, gegebenenfalls inklusive Hochfahr- und Rüstvorgängen, eingeplant werden. Nach dem neuen Einplanen des Arbeitsvorgangs können auf der vorherigen Maschine bzw. zu dem vorherigen

nen ohne Verbesserung sein oder aber eine definierte Stopptemperatur T_{stopp} in Abhängigkeit des Abkühlfaktors α .

Ähnlich zur Initialisierung besteht die Zielstellung der dritten Funktion (O3) darin, einen energieeffizienten Betrieb sicherzustellen. Sofern die Maschinen die Möglichkeit besitzen, ausgeschaltet zu werden, nutzt die Funktion diese Eigenschaft und schaltet die Maschinen innerhalb der Brachzeiten aus bzw. in einen energieeffizienten Zustand.

7.5 Fazit

Vorliegendes Kapitel zeigt ein sequenzielles Lösungsverfahren für die energiebezugsorientierte Auftragsplanung. Auf Basis der Produkt- und Auftragsmodelle werden mithilfe eines MILP-Ansatzes ein mittelfristiges Makro- und ein kurzfristiges Mikromodell gebildet. Beide Modelle dienen zur mengenmäßigen Abstimmung von Energieangebot und Energiebedarf, die für die Durchführung der Produktionsaufgabe benötigt werden. Die Ergebnisse sind terminierte Aufträge, welche Produkt- und Losgrößeninformationen beinhalten. Diese werden der Maschinenbelegung übergeben, welche mittels einer entwickelten Heuristik die Aufträge in ein Produktionssystem einplant. Dabei werden Lastgrenzen als Rahmenbedingung verwendet, die von dem variablen Lastmanagement vorgegeben werden. Ergebnis der Optimierung auf Basis eines SA stellt eine angepasste Maschinenbelegung dar, die sich am variablen Lastmanagement ausrichtet. Sowohl die Maschinenbelegung als auch ein ggf. aktualisiertes Leistungsmodell werden im Anschluss der Auftragsfreigabe übermittelt, welche den Startpunkt für die energieorientierte Produktionssteuerung bildet. Nachfolgend gelangen die einzelnen Bausteine der energiebezugsorientierten Auftragsplanung in ausgewählten Teilschritten eines Anwendungsfalles zur Vorstellung.

8 Anwendung der energiebezugsorientierten Auftragsplanung

8.1 Übersicht

In diesem Kapitel werden die einzelnen Elemente der energiebezugsorientierten Auftragsplanung auf eine Fallstudie übertragen. Abschnitt 8.2 stellt dazu die Rahmenbedingungen vor und führt über die Aufnahme der Energiebezugs- und Energiebedarfsdaten hin zu einer Modellierung des betrachteten Produktionssystems. Im nächsten Schritt erfolgt mithilfe der Eingangsdaten des Makro- und des Mikromodells eine Berechnung der Losgrößen sowie Termine und Kapazitäten. Im Anschluss wird im Speziellen auf die Maschinenbelegung eingegangen, welche auf Basis von Auftrags- und Lastmanagementinformationen des Mikromodells die Feinplanung eines heterogenen Maschinenparks übernimmt. Das Ergebnis und der resultierende Aufwand dieser Planung werden in Abschnitt 8.3 bewertet und in Abschnitt 8.4 diskutiert, um abschließend in Abschnitt 8.5 ein Fazit zu ziehen.

8.2 Projektbeispiel zur Bewertung einer energiebezugsorientierten Auftragsplanung

8.2.1 Einführung

Im Rahmen des Forschungsprojektes „FOREnergy – Die energieflexible Fabrik“ (POPP ET AL. 2015) waren unterschiedliche Produktionsstandorte und Produktionssysteme Gegenstand einer Analyse im Kontext der Ablaufplanung. Im Folgenden wird aus diesem Projekt ein abstrahiertes Beispiel eines Komponentenherstellers der Funk- und Radartechnik vorgestellt sowie ein Teil der dortigen Produktion für eine energiebezugsorientierte Auftragsplanung modelliert.

8.2.2 Aufnahme des Energiebezugs

Im ersten Schritt gilt es, den Energiebezug des Unternehmens zu beschreiben. Dieser generiert sich am ausgewählten Standort aus:

- 2 BHKWs
- 2 PVA

Anwendung der energiebezugsorientierten Auftragsplanung

Anstatt der Vollstromversorgung, die für den Standort genutzt wird, werden im Fallbeispiel zwei theoretische Beschaffungsoptionen herangezogen. Diese bestehen aus:

- dem Handel am Terminmarkt sowie
- dem Handel am Day-ahead-Spot-Markt.

Mindestabnahmemengen, Marktzugang und sonstige Restriktionen werden nicht betrachtet. Den Börsenpreisen werden 5 € je MWh für Netz- und Vertriebskosten aufgeschlagen. Steuern und weitere Abgaben bleiben unberücksichtigt, da diese bedingt durch mögliche Gesetzesänderungen schwer definierbar sind (BMW i 2015). Abbildung 56 fasst den Kraftwerkspark sowie die Energiebeschaffung zusammen.

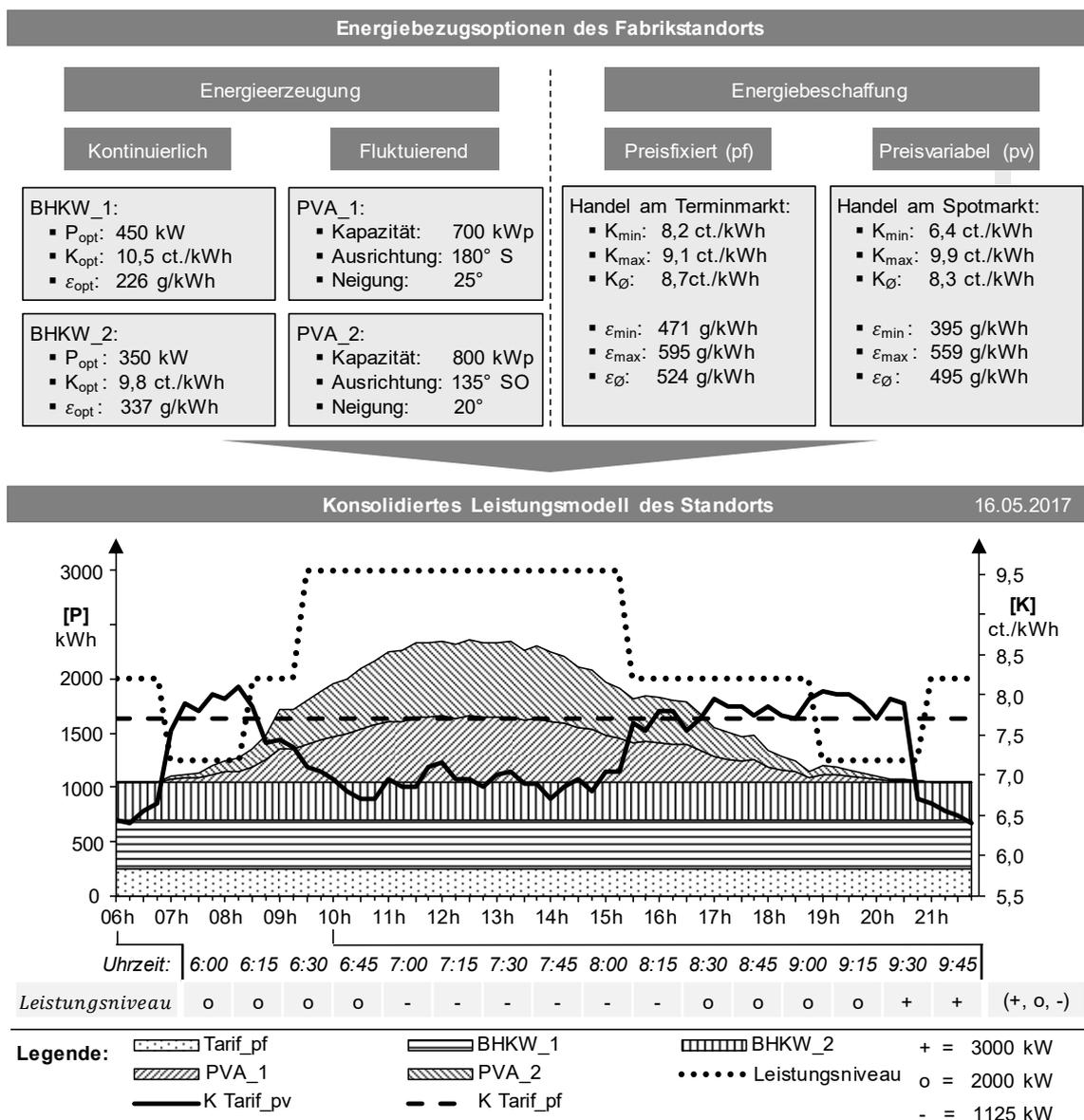


Abbildung 56: Konsolidierter Energiebezug des betrachteten Unternehmens

8.2.3 Modellierung des betrachteten Produktionssystems

Die Modellierung des zu planenden Produktionssystems umfasst lediglich solche Maschinen und Anlagen, die direkt am Produktionsprozess beteiligt sind. Der Energiebedarf von Nebenanlagen, Beleuchtung und Klimatisierung sowie weitere Unternehmensgebäude (z. B. Büros) gelangen nicht zur Betrachtung. Bei dem untersuchten Unternehmen benötigt die Produktion 56 % des Elektrizitätsbedarfs am Standort.

Innerhalb der Produktion umfasst das Fallbeispiel einen Teil der Fertigung, der aus einer kombinierten Fließ- und Werkstattfertigung (Hybrid-Flow-Shop) mit fünf Prozessschritten und neun Maschinen besteht. Hier sind die Energiedaten mit den Betriebsdaten zu verknüpfen. Abbildung 57 zeigt die Ergebnisse sowie die Zuordnung der BDE-Rückmeldungen anhand des Zeitstempels.

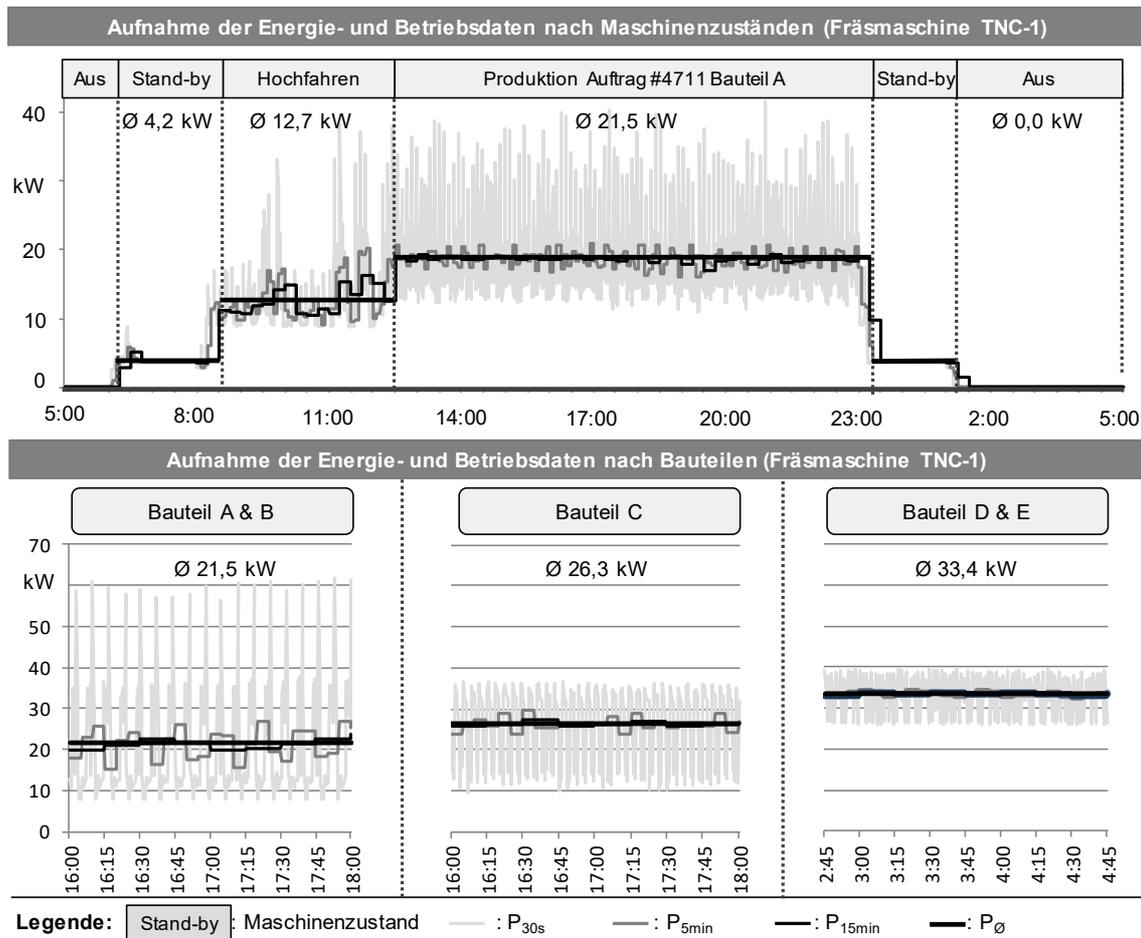


Abbildung 57: Verknüpfung der Energie- und Betriebsdaten einer Maschine am Beispiel einer Fräsmaschine

Anwendung der energiebezugsorientierten Auftragsplanung

Die generierten Informationen über den durchschnittlichen Leistungsbedarf bilden die Grundlage für die Erstellung der Maschinen-, Produkt- sowie Auftragsmodelle. Diese werden anschließend dem Planungssystem zur Verfügung gestellt. Im nächsten Schritt sind der Produktionsablauf sowie dessen Abhängigkeiten zu beschreiben. Abbildung 58 stellt das betrachtete Produktionssystem sowie den Materialfluss zwischen den Bereichen dar.

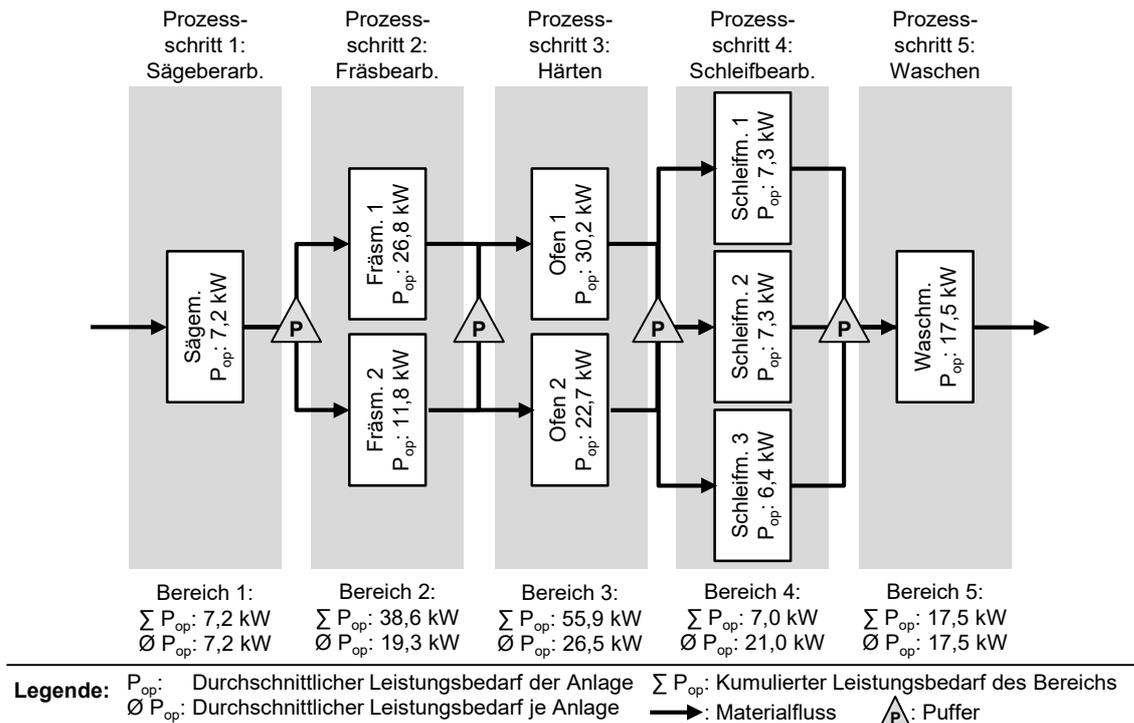


Abbildung 58: Modellierung des Produktionsablaufs des Hybrid-Flow-Shops

Die Aufträge bzw. die Produkte lassen sich auf allen Maschinen fertigen und verfolgen dabei unterschiedliche Wege von Start bis Ende. Dabei gelten folgende vereinfachte Bedingungen:

- Aufträge können für die Bearbeitung auf Maschinen desselben Typs getrennt werden (sog. Los-Split).
- Eine Weitergabe zwischen Bereichen ist nur als ganzes Los möglich.
- Die Bearbeitung mehrerer Aufträge bei Sammelprozessen ist gleichzeitig möglich (z. B. Ofen oder Waschmaschine).
- Transportzeiten zwischen den Bereichen werden vernachlässigt.
- Die Puffer zwischen den Bereichen sind unbegrenzt.

Für das Planungssystem sind zudem die Übergänge zwischen den unterschiedlichen Maschinenzuständen je Fertigungsressource zu erfassen. Da jeder Zustand einen spezifischen Leistungsbedarf besitzt, sind diese im Besonderen für die spätere Maschinenbelegung von Bedeutung. Für das betrachtete Produktionssystem lassen sich, wie in Abbildung 59 dargestellt, zwei Maschinentypen unterscheiden. Dabei handelt es sich zum einen um Typ 1 mit einfachen Zustandswechseln und zum anderen um den komplexeren Typ 2.

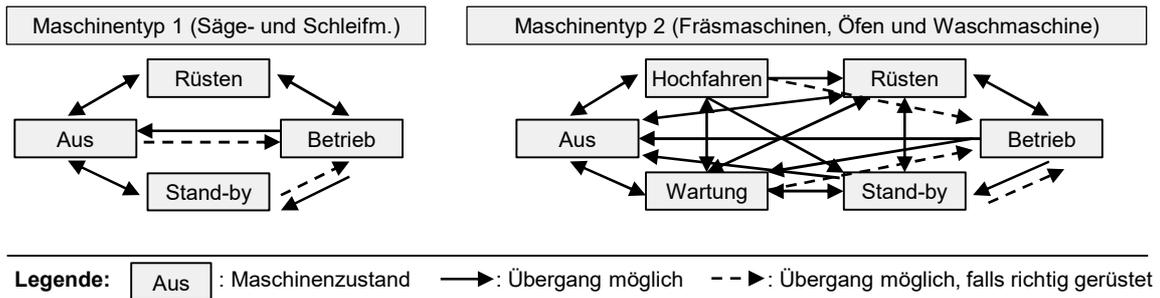


Abbildung 59: Transformationsvorschriften der betrachteten Produktionssysteme

Mit diesen Rahmeninformationen des Fallbeispiels werden in den folgenden Abschnitten energiebezugsorientierte Losgrößen, Termine und Kapazitäten sowie die Maschinenbelegung anhand eines gegebenen Kundenbedarfs berechnet.

8.2.4 Berechnung der Losgrößen, Termine und Kapazitäten

Im ersten Schritt der Berechnung von Losgrößen, Terminen und Kapazitäten gilt es, das Makro- und das Mikromodell mit den allgemeinen Daten des Produktionssystems anzureichern. Tabelle 8 zeigt die Grundinformationen für beide Modelle.

Tabelle 8: Produktspezifische Grundinformationen der Makro- und der Mikroplanung

Produkt	$[z_p^{ph}]$ Std.	$[E_p^{ph}]$ kWh	$[z_p^{ah}]$ Std.	$[E_p^{ah}]$ kWh	$[z_p^{an}]$ Std.	$[E_p^{an}]$ kWh	$[b_p^p]$ Std.	$[b_p^g]$ Std.	$[g_p]$ Stück
A	0,75	8,36	1,17	26,38	1,58	33,64	0,17	0,17	8,70
B	0,75	8,36	1,17	26,38	1,58	33,64	0,17	0,17	7,30
C	1,00	13,18	1,17	26,38	1,58	33,64	0,17	0,17	8,00
D	1,17	14,38	1,17	26,38	1,58	33,64	0,33	0,17	7,50
E	1,17	14,38	1,17	26,38	1,58	33,64	0,33	0,17	9,00

Hierzu werden Informationen der Produktmodelle als Grundlage für beide Modelle genutzt. Aufgrund der verschiedenen Zeithorizonte unterscheiden sich die Informa-

tionen über die Energiesituation, die Produktions- und Lagerkapazität sowie weitere Kostenfaktoren (wie z. B. Lagerkosten) in den beiden Modellen. Zusätzlich zum Produktmodell sind die Daten um das Auftragsmodell je Produkt und die Informationen der Engpassressource je Produkt ergänzt. Diese finden Eingang für die Berechnung des Makromodells.

8.2.4.1 Berechnung des Makromodells

In Bezug auf lang- bis mittelfristige Planungshorizonte (z. B. Quartale) werden für das Fallbeispiel die Informationen aus Tabelle 9 ergänzt. Dies umfasst die Daten des kumulierten Kundenbedarfs, der Produktions- und Lagerkapazität sowie der Lager- und Kapitalkosten.

Tabelle 9: Allgemeine Grundinformationen des Makromodells

Quartal	1	2	3	4	5	6	7	8
Tage	62	63	62	61	62	63	62	61
$[D_t]$ Stück	1.980	2.145	2.145	2.013	1.980	2.145	2.145	2.013
$[P_t]$ Std.	8.928	9.072	8.928	8.784	8.928	9.072	8.928	8.784
$[Y_t]$ Stück	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
$[K_t^y]$ €	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$[K_t^k]$ €	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04

Um die Eingangsinformationen des Makromodells zu vervollständigen, erfolgt eine Ergänzung der Grundinformationen um vier Energieszenarien. Das *Referenzszenario* verfügt über eine vollständige Vollstromversorgung (K_t^R), ohne die Eigenerzeugung am Standort zu berücksichtigen. Das Szenario *Beschaffung* (K_t^f) umfasst einen aktiven Handel am Terminmarkt, ohne die Eigenerzeugung zu betrachten. Das Szenario *Erzeugung* (K_t^e) fügt dem Betrachtungsrahmen die standortspezifischen Stromerzeugungsanlagen hinzu, weitere Energiemengen werden jedoch über die Konditionen der Vollstromversorgung beschafft. Das *kombinierte Szenario* vereint die Eigenerzeugung mit dem aktiven Handel am Terminmarkt. Tabelle 10 legt für die unterschiedlichen Bezugsoptionen die entsprechenden Informationen über Kosten und Emissionen dar. Die Daten der gezeigten Tabellen gehen im Anschluss zur Berechnung in das MILP-Modell ein.

Tabelle 10: Energieinformationen des Makromodells

Quartal	1	2	3	4	5	6	7	8
$[K_t^R]$ €	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087
$[\varepsilon_t^R]$ gCO ₂ /kWh	524	524	524	524	524	524	524	524
$[K_t^f]$ €	0,082	0,083	0,091	0,091	0,082	0,083	0,091	0,091
$[\varepsilon_t^f]$ gCO ₂ /kWh	501	471	527	595	501	471	527	595
$[E_t^e]$ kWh	23.753	26.322	22.648	21.164	23.753	26.322	22.648	21.164
$[K_t^e]$ €	0,066	0,064	0,077	0,093	0,066	0,064	0,077	0,093
$[\varepsilon_t^e]$ gCO ₂ /kWh	176	166	207	241	176	166	207	241

Nach der vollständigen Lösung (Berechnungszeit Ø 8 Sek.¹) der einzelnen Szenarien ist das Resultat der lang- bis mittelfristigen Planung in Tabelle 11 zu finden. Dabei wird deutlich, dass zwischen einer Vollstromversorgung und einer Beschaffung am Terminmarkt kaum signifikante Vorteile für das Unternehmen erzielt werden können. Einzig die Integration der Eigenerzeugung bringt auf Basis der günstigeren Erzeugungskosten sowie geringeren Emissionen Vorteile gegenüber der gänzlichen Vollstromversorgung. Sofern zusätzliche Energiemengen benötigt werden, ist auch hier der Unterschied zwischen Vollstromversorgung und Terminmarktbeschaffung nicht erheblich. Deutliche Unterschiede zwischen den Beschaffungsarten sind bei den Lagervorgängen zu beobachten, die im Falle des Terminmarktes um das Zehnfache ansteigen. Insgesamt ist festzuhalten, dass es sich für das betrachtete Unternehmen als nicht wirtschaftlich erweist, am aktiven Handel des Terminmarkts zu partizipieren, da dadurch keine Vorteile erzielt werden.

Tabelle 11: Mittelfristige Planungsergebnisse der einzelnen Energieszenarien

	[E] kWh	%	[K] €	%	[ε] kgCO ₂	%	[Y] Produkte	%
Referenz (Vollstromversorgung)	311.413	100	27.093	100	163.180	100	79	100
Beschaffung (nur Terminmarktbeschaffung)	311.413	100	26.859	99	161.799	99	863	1.092
Erzeugung (mit Vollstromversorgung)	311.413	100	24.686	91	101.464	62	78	99
Kombiniert (mit Terminmarktbeschaffung)	311.413	100	24.561	91	100.816	62	863	1.092

¹ Für die Berechnung wurde das Programm IBM ILOG CPLEX Studio 12.7 verwendet, welches auf einer Rechenumgebung mit Windows 10 64-Bit, 16 GB RAM und Intel Core i7 mit 2,60 GHz betrieben wurde.

Als weiteres Resultat des Makromodells werden die Planungsergebnisse der tabellarischen Darstellung grafisch zusammengefasst. Dies inkludiert die Informationen über die verfügbare und genutzte Kapazität (aufgeführt in % auf der Sekundärachse) von Produktion und Energieerzeugung für jedes Quartal sowie die Mengeninformatio- nen (aufgeführt in Stück auf der Hauptachse) zu Nachfrage, Produktion und Lagerung. In Abbildung 60 ist dies für das kombinierte Szenario dargestellt. Deutlich zu sehen ist, dass in jedem Quartal zusätzliche Energie beschafft werden muss (straffierte Balkenfläche über der 100 %-Markierung). Lediglich in Quartal 2 und 6 wird ein Lagerbestand aufgebaut, was einen direkten Einfluss auf die Produktions- menge in den folgenden Quartalen nimmt.

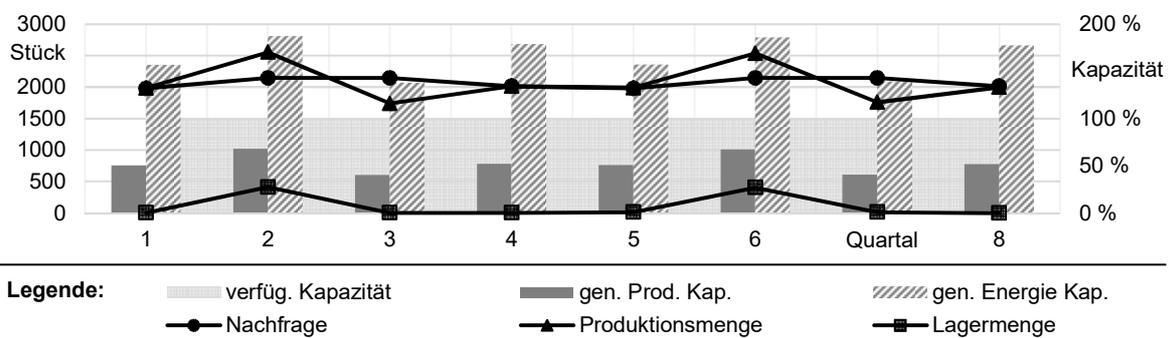


Abbildung 60: Makroplanungsergebnisse für das kombinierte Szenario

Auf Basis dieser Ergebnisse ist es möglich, in der Produktionsplanung Entscheidungen über das Produktionsprogramm oder über den Energiebezug zu treffen, um diese ggf. anzupassen. Im nächsten Schritt werden die Ergebnisse im Mikromodell weiter detailliert.

8.2.4.2 Berechnung des Mikromodells

Für das Beispiel eines kurzfristigen Planungshorizontes (z. B. Schichten) wird das Fallbeispiel mit den Informationen aus Tabelle 12 ergänzt. Dies umfasst die Daten des kumulierten Kundenbedarfs, der Produktions- und Lagerkapazität sowie der Lager- und Verzugskosten je Schicht über eine Woche. Um die Eingangsinformationen für das Mikromodell zu vervollständigen, werden die Grundinformationen um die vier Energieszenarien *Referenz* (K_t^R), kurzfristige *Beschaffung* (K_S^v) und *Erzeugung* (K_S^e) sowie *Kombiniert* ergänzt. Tabelle 13 legt für die unterschiedlichen Bezugsoptionen die entsprechenden Informationen zu Kosten und Emissionen dar. Die Daten der gezeigten Tabellen gehen im Anschluss zur Berechnung in das kurzfristige MILP-Modell ein und werden dort verarbeitet.

Tabelle 12: Allgemeine Grundinformationen des Mikromodells

	Tag 1 Schicht 1	Tag 1 Schicht 2	Tag 2 Schicht 1	Tag 2 Schicht 2	Tag 3 Schicht 1	Tag 3 Schicht 2	Tag 4 Schicht 1	Tag 4 Schicht 2	Tag 5 Schicht 1	Tag 5 Schicht 2
$[D_{At}]$ Stück	5	5	5	6	5	5	5	5	6	5
$[D_{Bt}]$ Stück	0	6	3	0	2	0	6	3	0	2
$[D_{Ct}]$ Stück	0	0	0	10	2	0	0	0	10	2
$[D_{Dt}]$ Stück	0	8	4	0	3	0	8	4	0	3
$[D_{Et}]$ Stück	5	5	0	5	3	5	5	0	5	3
$[V_t]$ Std.	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
$[Y_t]$ Stück	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
$[K_{ps}^y]$ €	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$[K^{d+}]$ €	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabelle 13: Energieinformationen des Mikromodells

	Tag 1 Schicht 1	Tag 1 Schicht 2	Tag 2 Schicht 1	Tag 2 Schicht 2	Tag 3 Schicht 1	Tag 3 Schicht 2	Tag 4 Schicht 1	Tag 4 Schicht 2	Tag 5 Schicht 1	Tag 5 Schicht 2
$[K_s^v]$ €	0,081	0,086	0,064	0,064	0,083	0,077	0,088	0,088	0,099	0,099
$[e_s^v]$ gCO ₂ /kWh	480	496	474	395	503	472	520	520	559	534
$[E_s^e]$ kWh	191	178	225	210	203	189	180	168	158	147
$[K_s^e]$ €	0,061	0,073	0,058	0,059	0,060	0,064	0,063	0,064	0,079	0,081
$[e_s^e]$ gCO ₂ /kWh	163	190	147	151	155	158	160	161	201	204

Nach der vollständigen Lösung (Berechnungszeit Ø 8 Sek.²) der einzelnen Szenarien ist das Resultat der kurzfristigen Planung in Tabelle 14 zu finden. Dabei wird deutlich, dass bei dem *Referenzszenario* und einer Beschaffung am Spotmarkt Einsparungen von 15 % der Energiekosten erzielt werden. Dies lässt sich durch die Ergänzung der Eigenerzeugung auf über 20 % steigern. Deutliche Verbesserungen ergeben sich auch bei den resultierenden Emissionen des Energiebezugs. Im Vergleich zur Referenz wurde das Ergebnis bei der *Beschaffung* um 13 % sowie bei

² Für die Berechnung fand das Programm IBM ILOG CPLEX Studio 12.7 Verwendung, welches auf einer Rechenumgebung mit Windows 10 64-Bit, 16 GB RAM und Intel Core i7 mit 2,60 GHz betrieben wurde.

dem *kombinierten Szenario* um 48 % verbessert. Deutliche Unterschiede zwischen den Beschaffungsarten sind bei den Lagervorgängen zu beobachten, welche z. B. im Falle des *Beschaffungsszenarios* um das Doppelte ansteigen. Anders als bei den Ergebnissen des Makromodells ist festzuhalten, dass es sich im Fall des kurzfristigen Planungshorizontes für das Unternehmen lohnt, am aktiven Spotmarkthandel zu partizipieren.

Tabelle 14: Kurzfristige Planungsergebnisse der einzelnen Energieszenarien

	[E] kWh	%	[K] €	%	[E] kgCO ₂	%	[Y] Produkte	%
Referenz (Vollstromversorgung)	2.788	100	243	100	1.461	100	104	100
Beschaffung (nur Spotmarktbeschaffung)	2.720	98	206	85	1.273	87	226	217
Erzeugung (mit Vollstromversorgung)	2.825	101	206	85	821	56	117	113
Kombiniert (mit Spotmarktbeschaffung)	2.859	103	192	79	765	52	182	175

Ähnlich wie im Makromodell werden die Planungsergebnisse neben einer tabellarischen Darstellung auch grafisch zusammengefasst. In Abbildung 61 ist dies für das kombinierte Szenario dargestellt. Deutlich zu sehen ist, dass zu Beginn der Woche zusätzliche Energie beschafft werden muss (straffierte Balkenfläche über der 100 %-Markierung), um weitere Produktionsmengen zu fertigen. Gegen Ende der Woche wird die Energie der Eigenerzeugung genutzt, um die restlichen Aufträge fristgerecht fertigzustellen. Hierzu wird auf die eingelagerte Überproduktion am Wochenanfang zurückgegriffen. In den betrachteten Perioden sind keine Terminverzögerungen entstanden, deshalb werden diese in der Abbildung nicht betrachtet.

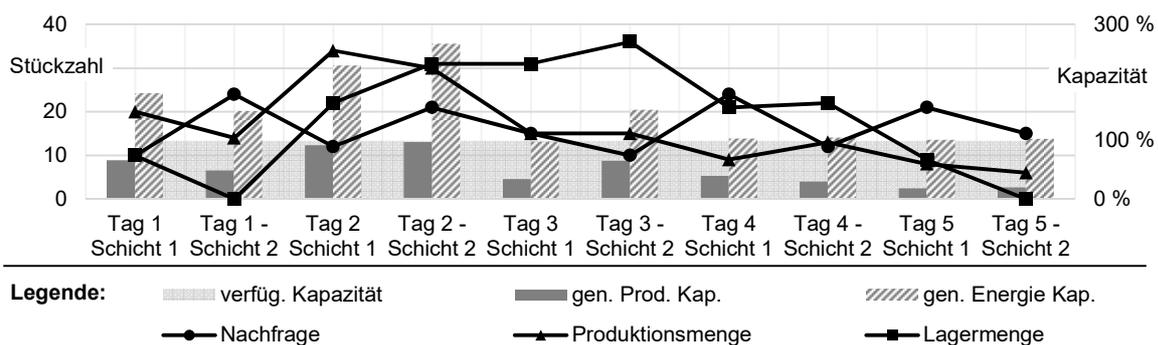


Abbildung 61: Mikroplanungsergebnisse für das kombinierte Szenario

Auf Basis dieser Ergebnisse wurden die Bearbeitungstermine sowie die Losgrößen der einzelnen Aufträge ermittelt. Diese werden nun für die weitere Detaillierung der Maschinenbelegung übergeben, welche die Aufträge auf die einzelnen Fertigungs-

ressourcen im zeitlichen Ablauf einplant. Hierzu dienen die abgeleiteten Leistungsgrenzen aus dem kurzfristigen Leistungsmodell als Eingangsgröße.

8.2.5 Verknüpfung des Mikromodells mit der Maschinenbelegung

Die Verknüpfung des Mikromodells mit der Maschinenbelegung stellt einen Betrachtungswechsel sowie eine Veränderung der Lösungswerkzeuge dar. Es gilt nun, das MILP-Modell mit seiner fixierten und mengenmäßigen Ausrichtung nun in eine Ablaufplanung mit definierten Zeitintervallen zu überführen. Dabei müssen die durchschnittlichen Annahmen der Produkt- und Auftragsmodelle für die Losgrößen sowie die Termin- und Kapazitätsplanung durch Maschinenzustände, Maschinenabhängigkeiten und Leistungsbedarfe ersetzt werden. Dabei stellt das Mikromodell der Maschinenbelegung Aufträge mit Produkt-, Termin- und Losgrößeninformationen für eine Planungsperiode, z. B. eine Schicht, zur Verfügung. Diese Aufträge sind nun auf die Maschinen im Produktionssystem einzuplanen, wodurch spezifische Maschinenzustände und Leistungsbedarfe hervorgerufen werden. Sofern Produkte bzw. AVOs auf unterschiedlichen Maschinen mit variierenden Eigenschaften produziert werden können, weicht das Planungsergebnis des linearen Mikromodells von dem der heuristischen Maschinenbelegung ab. Grund hierfür ist die zufällige Einplanung von Aufträgen durch die Initialisierung in einen heterogenen Maschinenpark. Um die Planungsgüte des Mikromodells zu bestimmen, wird ein Referenzszenario aus dem Anwendungsfall genutzt. Hierbei werden über einen Zeitraum von vier Schichten 58 Produkte in fünf Varianten zu zehn Aufträgen in ein heterogenes Produktionssystem mit neun Maschinen eingeplant. Die Abweichung des Energiebedarfs liegt nach 50 Initialisierungen bei durchschnittlich 1,16 %. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 ersichtlich.

Tabelle 15: Ergebnis von 50 Initialisierungen im Vergleich zum Mikromodell

Mikromodell	Initialisierung der Maschinenbelegung (n: 50)				
Energiebedarf	Maximaler Energiebedarf	Minimaler Energiebedarf	Standardabweichung	Ø Energiebedarf	Ø Abweichung
1.213 kWh	1.260 kWh	1.150 kWh	35 kWh	1.198 kWh	1,16 %

Somit sind die Ergebnisse, die das MILP-Modell auf Basis der durchschnittlichen Annahmen verwendet, eine gute Eingangsgröße für die Maschinenbelegung. Im Folgenden wird die Ergebnisdarstellung der Maschinenbelegung erläutert.

8.2.6 Berechnung der Maschinenbelegung

Kernbestandteil der Maschinenbelegung ist die Kombination des Maschinenmodells, welches die Informationen über die spezifischen Zustände sowie deren Leistungsbedarfe vereint, mit dem Produkt- und Auftragsmodell. Anders als in den vorherigen Planungsmodellen wechselt nun die Betrachtung von Energiemenge zu Leistungsbedarf. Hierzu gilt es, Aspekte der Zeit und des Leistungsbedarfs zu erfassen. Tabelle 16 zeigt die allgemeinen Grundinformationen der Maschinenbelegung. Neben den produktspezifischen Produktionszeiten sind dort ebenfalls die Informationen der Nebenzeiten, wie z. B. Rüstvorgänge, hinterlegt. Außerdem werden diese Informationen um Daten zur Auftragsbearbeitung ergänzt, z. B., ob mehrere Aufträge in einer Sammelbearbeitung gleichzeitig gefertigt werden können.

Tabelle 16: Allgemeine Grundinformationen der Maschinenbelegung

Auftrag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Produkt	A	E	B	D	E	A	B	A	C	D
Anzahl	5	5	6	8	5	5	4	6	10	4
Termin	Tag 1 Schicht 1	Tag 1 Schicht 1	Tag 1 Schicht 2	Tag 1 Schicht 2	Tag 1 Schicht 2	Tag 2 Schicht 1	Tag 2 Schicht 1	Tag 2 Schicht 2	Tag 2 Schicht 2	Tag 2 Schicht 2

Ressource	Bearbeitungszeit Produkte in min					Nebenzeiten in min		Auftragsbearbeitung	
	A	B	C	D	E	Hochfahren	Rüsten	Kapazität	Sammelbearbeitung
Sägemaschine	10	10	10	20	20	0	10	1	
Fräsm. 1	10	10	20	20	20	20	10	1	
Fräsm. 2	20	20	40	40	40	20	20	1	
Ofen 1	40	40	40	40	40	40	0	10	X
Ofen 2	40	40	40	40	40	50	0	5	X
Schleifmaschinen	20	20	30	30	30	0	10	1	
Waschmaschine	30	30	30	30	30	10	0	20	X

Um die Maschinenbelegung an die bestehenden Leistungsgrenzen anzupassen, werden die Energieinformationen aus den Maschinenmodellen in Tabelle 17 ergänzt. Für das Fallbeispiel werden die Schichten für zwei aufeinanderfolgende Tage geplant, woraus sich ein Planungshorizont von vier Schichten für die Maschinenbelegung ergibt.

Neben den manuell oder automatisch ermittelten Leistungsgrenzen je 5-Minuten-Intervall wird der Maschinenbelegung die aus dem Makromodell ermittelten Losgrößen sowie Termine je Produkt in Form einer Auftragsliste übergeben. Tabelle 18 zeigt die exemplarische Auftragsliste für das Produktionssystem.

Tabelle 17: Energieinformationen der Maschinenbelegung am Beispiel Produkt C

Ressource	Nebenzeiten in kW		Bearbeitungszeiten in kW
	Hochfahren	Rüsten	Betrieb bei Produkt C
Sägemaschine	0,0	1,5	7,2
Fräsmaschine 1	18,6	2,7	26,3
Fräsmaschine 2	4,2	1,7	11,8
Ofen 1	37,4	28,1	30,2
Ofen 2	29,4	19,2	22,7
Schleifmaschine 1	0,0	1,4	7,3
Schleifmaschine 2	0,0	1,4	7,3
Schleifmaschine 3	0,0	2,0	6,4
Waschmaschine	21,5	8,0	17,5

Tabelle 18: Auftragsliste des Mikromodells für die Maschinenbelegung

Auftrag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Produkt	A	E	B	D	E	A	B	A	C	D
Anzahl	5	5	6	8	5	5	4	6	10	4
Termin	Tag 1 Schicht 1	Tag 1 Schicht 1	Tag 1 Schicht 2	Tag 1 Schicht 2	Tag 1 Schicht 2	Tag 2 Schicht 1	Tag 2 Schicht 1	Tag 2 Schicht 2	Tag 2 Schicht 2	Tag 2 Schicht 2

Diese Liste wird im Anschluss mit drei unterschiedlichen Maschinenbelegungen auf das Produktionssystem eingeplant. Die *Referenzbelegung* bedient sich der Prioritätsregel *Rückwärtsterminierung*, ohne jedoch die Leistungsgrenzen zu berücksichtigen. Die Belegung *Initialisierung* vollzieht den Einplanungsvorgang aus Kapitel 7, welcher die Leistungsgrenzen berücksichtigt sowie eine erste gültige energiebezugsorientierte Lösung berechnet. Das *Simulated Annealing* baut auf dem Ergebnis der Initialisierung auf und verbessert in einem iterativen Vorgehen die vorhandene Ausgangslösung. Die Bewertung der Ergebnisse nutzt die Informationen des Leistungsmodells und berechnet anhand des Leistungsbedarfs der Maschinen die benötigte Energiemenge, die verursachten Kosten sowie die Emissionen. Das Ergebnis der unterschiedlichen Belegungsformen ist Tabelle 19 zu entnehmen.

Tabelle 19: Planungsergebnisse der einzelnen Maschinenbelegungen

	[E] kWh	%	[K] €	%	[ε] kgCO ₂	%	Überschreitung in kWh	%
Referenz (Rückwärtsterm.)	1.168	100	141,54	100	826,22	100	323	100
Initialisierung	1.208	103	126,03	89	696,29	84	215	67
Simulated Annealing	1.117	92	91,85	73	441,71	63	39	18

Sofern mehr Leistung benötigt wird als die Leistungsgrenzen vorgeben, fallen in diesem Beispiel zusätzliche Kosten (15 ct. je kWh) sowie zusätzliche Emissionen (600 gCO₂ je kWh) an. Innerhalb der Leistungsgrenze werden die spezifischen Informationen aus Energieerzeugung und -beschaffung zur Bewertung genutzt. Bei der Bewertung hat die Eigenerzeugung gegenüber der Beschaffung Vorrang. Sollte die gesetzte Leistungsgrenze nicht abgerufen werden, wird diese anderweitig im Unternehmen genutzt und verursacht keine Kosten für die Maschinenbelegung. Anhand der ermittelten Ergebnisse ist zu erkennen, dass im Vergleich zur Referenz die *Initialisierung* (Berechnungszeit Ø 14 Sek.³) ein wenig mehr Energie benötigt, allerdings die Kosten um 11 % sowie die Emissionen um 16 % reduziert werden. Dies ist hauptsächlich durch die bessere Ausrichtung an die Leistungsgrenzen zu erklären sowie durch die damit verknüpften niedrigeren Kosten und Emissionen der Bezugsoptionen. Das *Simulated Annealing* (mit maximal 1 Mio. Iterationen⁴ – Berechnungszeit Ø 1,1 Std.⁵) konnte die Ergebnisse der Initialisierung in allen Parametern verbessern. Neben einer Verringerung der benötigten Energiemenge um 8 % konnten die Kosten um 27 % und die Emissionen um 37 % gegenüber der Referenz reduziert werden. Dies ist an der Verringerung der Überschreitung der Leistungsgrenze zu erkennen, die gegenüber der Referenz um 82 % reduziert werden konnte. Die kumulierten Leistungsbedarfe der unterschiedlichen Maschinenbelegungen wurden auf Basis der spezifischen Maschinenzustände simuliert. Abbildung 62 stellt das Ergebnis dar.

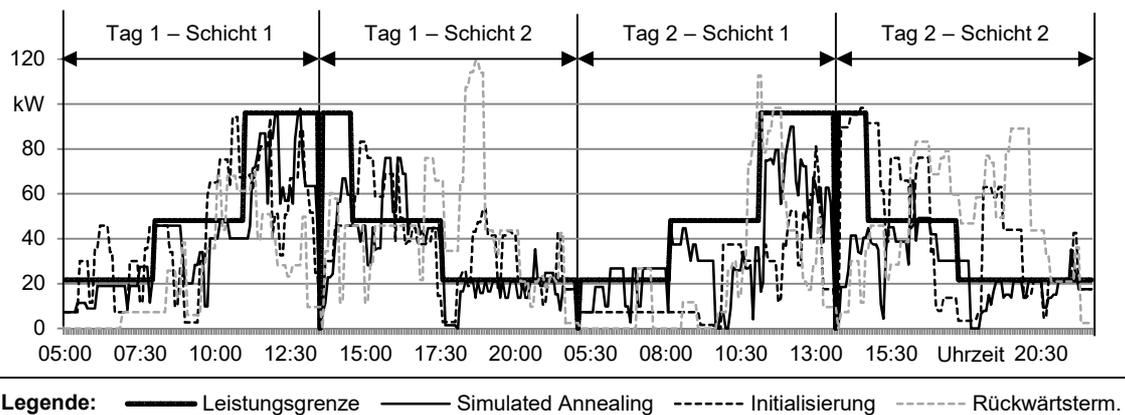


Abbildung 62: Ergebnisse der unterschiedlichen Maschinenbelegungen

³ Für die Berechnung wurde das Programm MathWorks MATLAB 2016b verwendet, welches auf einer Rechenumgebung mit Windows 10 64-Bit, 16 GB RAM und Intel Core i7 mit 2,60 GHz betrieben wurde.

⁴ Nach KELLER ET AL (2015) erweisen sich für dieses Maschinenbelegungsproblem eine Millionen Iterationen als Abbruchkriterium (vgl. 7.4.2.3) zweckhaft, da bis zu dieser Anzahl zuverlässig gute Lösungen in einer annehmbaren Zeitdauer (zwischen 1 bis maximal 12 Stunden, abhängig von Programm- und Computerleistung) errechnet werden.

⁵ Für die Berechnung gelangte das Programm MathWorks MATLAB 2016b zur Nutzung, dessen Betrieb auf einer Rechenumgebung mit Windows 10 64-Bit, 16 GB RAM sowie Intel Core i7 mit 2,60 GHz erfolgte.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die energiebezugsorientierte Maschinenbelegung im Vergleich zur Rückwärtsterminierung eine deutliche Verbesserung des Energieeinsatzes, der -kosten sowie der -emissionen erzielt. Damit lassen sich die Eingangsinformationen der Mikroplanung sowie der ermittelten Leistungsgrenzen nutzen und verbessern. Das Ergebnis ist ein Maschinenbelegungsplan, welcher der Auftragsfreigabe zur Durchsetzung übergeben wird. Damit endet die sequenzielle energiebezugsorientierte Auftragsplanung. Im nächsten Abschnitt gelangen der Aufwand, der Nutzen und die Wirtschaftlichkeit der Methodik zur Diskussion.

8.3 Nutzen- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In den Abschnitten 8.2.4 und 8.2.6 wurden die Vorteile der Methodik auf Basis der berechneten Planungsergebnisse aufgezeigt. Demgegenüber stehen die Aufwände, die in Abschnitt 8.2.2 und 8.2.3 am Fallbeispiel dargestellt werden und für die Anwendung des sequenziellen Planungsvorgehens nötig sind. Folgende Abschnitte thematisieren zunächst qualitativ den Aufwand (Abschnitt 8.3.1) und den Nutzen (Abschnitt 8.3.2) der vorgestellten Methodik, bevor in Abschnitt 8.3.3 eine quantitative Bewertung anhand einer Wirtschaftlichkeitsberechnung vorgestellt wird.

8.3.1 Aufwand

Der Aufwand zur Implementierung und Realisierung einer energiebezugsorientierten Auftragsplanung lässt sich in Einführungs- und Planungsaufwände unterteilen. Die Einführungsaufwände umfassen den Prozess zur Erstellung der Energiebezugs- und Bedarfsmodelle, welche die Datengrundlage für das Planungssystem bzw. den Planungsablauf bilden. Im Rahmen der Erstellung der Maschinen-, Produkt- und Auftragsmodelle ist es erforderlich, dass der zustandsabhängige Leistungsbedarf der Maschinen im betrachteten Produktionssystem erfasst wird. Idealerweise sind die betrachteten Maschinen bereits durch eine kontinuierliche Messung einer EDE für die Modellierungsaufgabe erfasst, anderenfalls sind mithilfe von mobilen Messsystemen die erforderlichen Daten aufzunehmen. Dieser Aufwand ist mit Personalkosten und Kosten für die Miete oder den Kauf des Messequipments verbunden. Sofern die Energiedaten vorliegen, gilt es, diese mit den vorhandenen Produktionsdaten zu verknüpfen. Dies geschieht mittels standardisierter tabellarischer Vorlagen, welche die Maschinen- und Energiedaten miteinander verknüpfen und den jeweiligen Produkten zuweisen. Etwaige Anpassungen sind von einem Mitarbeiter oder Dienstleister zu vollziehen, was wiederum einen Personalaufwand verursacht. Bei den Re-

sultaten dieser Aufwände handelt es sich um die finalisierten Maschinen-, Produkt- und Auftragsmodelle.

Für die Modellierung der Energiedaten am Standort ist es erforderlich, die vorliegenden Informationen von Energiebezug und Energieerzeugung miteinander zu verknüpfen. Die Energiebezugsdaten liegen in Form einer definierten Schnittstelle vor. Im Betrachtungsumfang dieser Arbeit werden Kosten für einen direkten Marktzugang nicht berücksichtigt. Diese Aufgabe übernimmt ein Energieversorgungsunternehmen und übermittelt dem Unternehmen die Börsenpreise inkl. eines Aufschlags für Netz- und Vertriebsentgelte (z. B. 5 ct. je kWh). Steuern und weitere Abgaben werden nicht betrachtet. Somit entstehen dem Unternehmen durch die Inanspruchnahme dieser Dienstleistung keine Kosten, da die Aufwände und Risiken mit dem Beschaffungspreis abgegolten sind. Bei der Eigenerzeugung liegen dem Unternehmen für die kontinuierlichen Kraftwerke sämtliche Informationen vor und müssen somit nicht zusätzlich erfasst werden. Einzig die Erzeugungsprognosen für die fluktuierenden Kraftwerke sind von einem externen Dienstleister zu beschaffen. Diese Kosten fallen über die Nutzungsdauer der Dienstleistung an (z. B. pro Monat) und stellen einen monetären Aufwand dar. Mit den vorliegenden Informationen lassen sich ebenfalls durch standardisierte tabellarische Vorlagen die Energiebezugsmodelle erstellen, welche einen unternehmenseigenen Personalaufwand bedeuten.

Im Falle der Planungsaufwände sind die Erweiterung des vorhandenen Planungssystems sowie die Erweiterung zur softwaregestützten Lösung der Optimierungsaufgaben zu nennen. Die Erweiterung des vorhandenen Planungssystems (z. B. SAP R/3) wird durch das sog. Customizing mithilfe eines Dienstleistungsunternehmens umgesetzt. Diese Dienstleistung umfasst die Erweiterung der Stammdatenstruktur für die Abbildung des Energiebezugs und des Energiebedarfs. Hierzu ist beim Energiebezug eine Schnittstelle für die Integration der Energiebezugsmodelle zu realisieren, damit die Ressource elektrische Energie als Material und Kapazität im Planungssystem repräsentiert wird. Ebenfalls sind die Stücklisten der jeweiligen Produkte um Energiebedarfe und die Arbeitsplätze in den AVOs um Leistungsbedarfe zu erweitern. Somit liegen dem Planungssystem alle notwendigen Informationen vor, welche für die energiebezugsorientierte Planung genutzt werden kann. Zu der Anpassung des Planungssystems ist eine aufgabenspezifische Erweiterung nötig, um die Optimierungsaufgaben umzusetzen. Hierzu sind eine zusätzliche Recheninstanz (z. B. ein Simulationsserver) sowie Schnittstellen zwischen dem Planungs- und Optimierungssystem erforderlich. Zur Berechnung der Losgrößen, der Termine und Kapazitäten sowie der Maschinenbelegung sind zudem eine geeignete Software (z. B. IBM ILOG CPLEX[®] und MathWorks MATLAB[®]) und deren War-

tung notwendig. Dies stellt weitere Investitions- und Dienstleistungsaufwände dar. Mit den oben aufgezählten Aufwänden und Investitionen ist die Grundlage für eine energiebezugsorientierte Planung im Rahmen einer Erweiterung eines bestehenden Planungssystems gegeben.

8.3.2 Nutzen

Der Nutzen der energiebezugsorientierten Auftragsplanung lässt sich in Effizienz-, Suffizienz- und Kostenaspekte unterteilen. Anhand der Ergebnisse des schrittweisen Planungsvorgehens aus den Abschnitten 8.2.4 und 8.2.6 verdeutlicht sich, dass eine mengenmäßige Einsparung des Produktionsfaktors elektrische Energie erzielt werden kann. Neben einer wirtschaftlichen Ermittlung von Losgrößen und Terminen können mithilfe der Maschinenbelegung weitere Effizienzpotenziale erzielt werden. Somit trägt die vorgestellte Methodik dazu bei, im Idealfall Energie im Produktionsprozess einzusparen.

Der Suffizienzaspekt wird vor allem bei der Betrachtung des Parameters der energiebezugsbedingten Emissionen deutlich. Durch die gezielte Einplanung der Aufträge zu Zeitpunkten geringer Emissionswerte werden Verringerungen von bis zu 13 % in der Termin- und Kapazitätsplanung gegenüber der Vollstromversorgung realisiert (vgl. ε in Tabelle 14). Sofern die standorteigenen Erzeugungsanlagen berücksichtigt und für den Eigenverbrauch genutzt werden, lässt sich dieser Wert auf bis zu 48 % in der Termin- und Kapazitätsplanung steigern (vgl. ε in Tabelle 14). Im Falle der Maschinenbelegung ist für einen exemplarischen Betrachtungszeitraum eine Reduktion um 37 % (vgl. ε in Tabelle 19) gegenüber der Vollstromversorgung erzielt worden. Folglich kann mit dem vorgestellten Planungsvorgehen eine Ausrichtung an ein gegebenes erneuerbares Energieangebot stattfinden. Dieses Vorgehen bietet somit einen Mehrwert für die nachhaltige Betriebsweise des Produktionssystems.

Der Einsatz der vorgestellten Methodik ermöglicht es, die Bezugskosten des Produktionsfaktors Energie zu reduzieren. Konkret liefert das Ergebnis der Losgrößen- sowie Termin- und Kapazitätsplanung eine Verbesserung von 15 % gegenüber der konventionellen Vollstromversorgung bzw. 21 % bei Berücksichtigung der Eigenzeugung (vgl. K in Tabelle 14). Bei der Maschinenbelegung kann eine Verbesserung von 27 % erfolgen (vgl. K in Tabelle 19), sofern die aus dem Leistungsmodell abgeleiteten Leistungsgrenzen für das Produktionssystem eingehalten werden. Somit lassen sich Aussagen zur Wirtschaftlichkeit der vorgestellten Methodik ableiten.

8.3.3 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit der energiebezugsorientierten Auftragsplanung lässt sich durch einen Aufwand-Nutzen-Vergleich darlegen. Der Nutzen ist jedoch lediglich durch Effizienz- und Kostenaspekte zu bewerten, da der Bereich der Suffizienz bis dato keinen monetären Vorteil für das Unternehmen bietet. Aus der Perspektive der Außendarstellung des Unternehmens kann allerdings die Thematik der Nachhaltigkeit einen positiven Einfluss auf das Kundenverhalten nehmen, was ggf. zu mehr oder gesicherten Umsätzen führt. Denkbar ist auch, dass in Zukunft die energiebezugsbedingten Emissionen eines Unternehmens durch rechtliche oder steuerliche Anreize weitere Vorteile mit sich bringen. Diese sind aktuell jedoch nicht zu beziffern. Demgegenüber stehen Aufwände für das Unternehmen für die Einführung und den Betrieb des Planungsvorgehens. Im Folgenden wird das Fallbeispiel adaptiert, um eine Aussage über die Verwendung in einem mittelständischen Unternehmen treffen zu können.

Die Zahl der verwendeten Maschinen wird auf 50 und die Anzahl der Produkte auf 100 angepasst. Somit leitet sich ein Jahresverbrauch von ca. 1,5 GWh auf Basis der Fallstudie ab. Verrechnet mit dem Preis der Vollstromversorgung (ohne Steuern und Abgaben) von 0,087 ct. je kWh ergeben sich Stromkosten von 130.500 € pro Jahr. Durch die Einsparung der Stromkosten um 21 % beläuft sich demzufolge der jährliche Kostenvorteil auf 27.405 €. Die dafür notwendigen Aufwände lassen sich Tabelle 20 entnehmen und leiten sich aus Abschnitt 8.3.1 ab.

Tabelle 20: Abgeschätzte Aufwandskalkulation des Planungsvorgehens

Beschreibung	Kosten	Anzahl	Gesamt
Aufwand zur Erstellung der Bezugs- und Bedarfsmodelle			
Energiemessung und -analyse je Anlage zur Maschinenmodellierung	500 €	50	25.000 €
Verknüpfung der Daten zu Produkt- und Auftragsmodellen	100 €	100	10.000 €
Prognosedaten der Eigenerzeugung	100 € pro Monat	12	1.200 €
Verknüpfung der Daten zu Energiebezugsmodellen	50 € pro Monat	12	600 €
Planungsaufwände			
Erweiterung der Stammdaten um Energiebezugsinformationen	10.000 €	1	10.000 €
Erweiterung der Stammdaten um Energiebedarfsinformationen	15.000 €	1	15.000 €
Rechenkapazität (Server und Schnittstellen)	3.500 €	1	3.500 €
Software (Optimierung und Simulation)	5.000 €	1	5.000 €
Zusätzliche Server- und Softwarewartung	50 € pro Monat	12	600 €
Gesamt			
Kosten für die Implementierung			68.500 €
Kosten für die laufende Planung	200 € pro Monat	12	2.400 €

Abzüglich der Kosten für den laufenden Betrieb bleibt eine Ersparnis von jährlich ca. 25.000 € bestehen. Somit erwirtschaftet das Planungsvorgehen nach 2,74 Jahren seine Implementierungskosten. An dieser Stelle sei nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, dass Investitions- und Wartungskosten der Eigenerzeugungsanlagen nicht in der Berechnung berücksichtigt sind. Somit erweist sich die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung lediglich für eine Erweiterung eines bestehenden Planungssystems für einen Standort mit Eigenerzeugung als zweckmäßig. Für die Bewertung einer Neuinvestition von Erzeugungsanlagen ist eine gesonderte unternehmensspezifische Berechnung zur Wirtschaftlichkeit erforderlich.

8.4 Diskussion der Ergebnisse

Kernaufgabe dieser Arbeit besteht darin, die Ressource *elektrische Energie* für den Fabrikbetrieb als Planungselement zu beschreiben. Das Ziel der Auftragsplanung ist es daher, die technischen und organisatorischen Freiheitsgrade zu identifizieren, zu beschreiben und anschließend in Planungsverfahren zu überführen. Hieraus leiten sich zwei Handlungsfelder für die Arbeit ab, welche mit jeweils zwei Anforderungen erörtert werden (vgl. Abschnitt 3.5).

Der erste Handlungsbedarf fokussiert die *Beschreibung der Energiebezugsoptionen für die PPS*. Durch das methodische Vorgehen bei der Erfassung, der Aggregation und der Modellierung der vorhandenen Daten zeigt Kapitel 5 auf, wie die Anforderung der Parametrisierung der Energiebezugsoptionen erfüllt werden kann. Hierzu werden die Zielgrößen Mengen, Kosten und Emissionen für die einzelnen Bezugsoptionen definiert und systematisch erfasst. Diese bilden die Datengrundlage für die Generierung der zielgrößenorientierten Mengen- und Leistungsmodelle, die anforderungsgerecht für die PPS als Eingangsinformationen benötigt werden. Die Beschreibung und Modellierung der Bezugsoptionen schaffen die Grundlage für den Planungsablauf, um eine Abstimmung der Auftragssituation an ein gegebenes Energieangebot vorzunehmen.

Dies ist Gegenstand des zweiten Handlungsbedarfs, der das *sequenzielle Lösungsverfahren* in den Vordergrund rückt. Auf Basis der Modellierungen des Energiebezugs (Kapitel 5) sowie des Produktionssystems mit Maschinen, Produkten und Aufträgen (Kapitel 6) stellt Kapitel 7 zwei Lösungswerkzeuge vor, welche für die mittel- und kurzfristigen Planungsaufgaben genutzt werden. Zum einen werden mittel- und kurzfristige Losgrößen, Termine und Kapazitäten mithilfe eines MILP-Ansatzes im Rahmen einer linearen Programmierung auf gegebene Energiemengen

abgestimmt. Dabei werden neben der Bestimmung von Aufträgen auch Beschaffungsempfehlungen berechnet, falls das gegebene Energieangebot nicht genügt. Zum anderen gehen die Ergebnisse des kurzfristigen Mikromodells als Eingangsinformationen in eine heuristische Maschinenbelegung ein, welche die Zielsetzung verfolgt, den Leistungsbedarf der Maschinen zur Auftragsbearbeitung mit den Leistungsgrenzen des Energiebezugs in Einklang zu bringen. Hierzu wird ein Simulated-Annealing-Ansatz gewählt, der in Kombination mit einem energieorientierten Eröffnungsverfahren die Maschinenbelegung sukzessiv verbessert.

Mit der Modellierung des Produktionssystems, des Energiebezugs und der Vorstellung der Optimierungswerkzeuge sind die beiden Anforderungen *Beschreibung des Energiebedarfs* mit den Elementen der Auftragsplanung sowie der *Entwicklung eines sequenziellen energieorientierten Lösungsverfahrens* in die Ergebniserarbeitung eingegangen. Dementsprechend ist die Umsetzung eines variablen Lastmanagements mit Produktionsanlagen mittels einer abgestimmten Auftragsplanung möglich und der konventionelle Ablauf der Produktionsplanung wird um Energiebezugsaspekte erweitert.

Durch die methodische Integration von Energiebezugsoptionen und produktionsbezogenen Energiebedarfen ist eine Beeinflussung des Energieeinsatzes und des energieverbrauchsbedingten CO₂-Ausstoßes im Fallbeispiel umgesetzt. So ließen sich in der Maschinenbelegung die benötigte Energiemenge um 8 %, die energiebezugsbedingten Emissionen um 47 % und die Energiekosten um 27 % reduzieren. Diese Ergebnisse sind auf technische Überkapazitäten zurückzuführen, die im betrachteten Produktionssystem durch den gezielten Betriebseinsatz in günstigen Zeitintervallen genutzt wurden. Im Falle, dass in einem Produktionssystem keine Überkapazitäten vorliegen, sind die Anwendung und der Nutzen der energieorientierten Auftragsplanung lediglich bedingt gegeben. Hier gilt es, im Rahmen einer energieflexiblen Bewertung des Produktionssystems andere Maßnahmen zu ergreifen. Des Weiteren ist es möglich, durch eine Integration von Speichern sowie Neben- und Gebäudeanlagen in die Planung weitere Einsparungs- und Flexibilisierungspotenziale aufzudecken sowie im Sinne eines variablen Lastmanagements zu nutzen.

8.5 Fazit

Gegenstand des vorliegenden Kapitels ist die prototypische Umsetzung des erarbeiteten Planungsvorgehens. Dabei werden die Forschungsarbeiten anhand eines abstrahierten Fallbeispiels erläutert und der Prozess der energieorientierten Auftrags-

planung durchlaufen. Neben der Umsetzung der Modellierung von Energiebezug und Energiebedarf eines Produktionssystems stehen vor allem die Planungsergebnisse im Vordergrund der Betrachtungen. Dabei zeigt sich, dass eine modifizierte Planung unter Berücksichtigung des Energiebezugs signifikante Vorteile gegenüber einer konventionellen Auftragsplanung aufweist. Eine Verbesserung der Parameter Energiemenge, energiebezugsbedingte Emissionen und Energiekosten wird von dem Planungsvorgehen realisiert. Dieser Nutzen wird den resultierenden Aufwänden im Anschluss gegenübergestellt und mithilfe einer Wirtschaftlichkeitsrechnung bewertet. Diese gelangt zu dem Ergebnis, dass die Umsetzung einer energiebezugsorientierten Auftragsplanung im Rahmen einer Erweiterung eines bestehenden Planungssystems sich bereits in weniger als drei Jahren amortisiert. Somit lässt sich ableiten, dass sich eine Einführung dieses Planungsvorgehens für Unternehmen mit geeigneten Voraussetzungen als zweckhaft erweist.

9 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Die Industrie steht aktuell vor der Herausforderung, eine wachsende Weltbevölkerung mit begrenzten natürlichen Ressourcen nachhaltig und klimaschonend zu versorgen. An dieser Stelle setzen die Klimarahmenkonventionen der Vereinten Nationen an, um energieerzeugungsbedingte Emissionen durch die Nutzung von fossilen Brennstoffen zu reduzieren. In Deutschland wird diese Bestrebung unter dem Begriff der *Energiewende* zusammengefasst. Diese Bestrebungen resultieren in einem zunehmenden Ausbau erneuerbarer Energiequellen im deutschen Stromsystem. Die daraus abgeleiteten Entwicklungen konfrontieren industrielle Verbraucher mit einer sinkenden Versorgungssicherheit sowie steigenden Stromkosten. Als Antwort auf die Herausforderungen der Energiewende haben Unternehmen die Möglichkeit, sich als sog. *Prosumer* zu positionieren, um ihr Nachfrageverhalten gegenüber dem Stromsystem zu flexibilisieren. Eine Möglichkeit bietet die Anpassung der Auftragsplanung an eine gegebene Energiesituation, welche im Zuge eines sequenziellen Planungsverfahrens eine wirtschaftliche und ökologische Abstimmung vornimmt. Daraus abgeleitet verfolgt diese Arbeit die Zielsetzung, eine *Methodik zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung* zu entwickeln. Abschnitt 9.1 gibt hierzu eine kurze Zusammenfassung und ordnet die Forschungsfragen aus Abschnitt 1.3.1 den einzelnen Kapiteln zu. Abschnitt 9.2 diskutiert die Ausgangssituation aus Abschnitt 1.2 mit den Ergebnissen aus der prototypischen Umsetzung. Abschließend umfasst Abschnitt 9.2 einen Ausblick und eine Einschätzung für den weiteren Forschungsbedarf bezogen auf die energieorientierte Produktion.

9.1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Produktionsmanagements nimmt die Auftragsplanung eine zentrale Rolle ein, indem sie mittel- bis kurzfristige Planungsaufgaben innerhalb eines Produktionssystems adressiert. Im Falle der energiebezugsorientierten Auftragsplanung wird dabei a priori eine Anpassung der Produktion und ihrer Ressourcen auf Basis verfügbarer Produktions- und Energieinformationen angestrebt.

Eine Einführung in die allgemeinen Rahmenbedingungen des industriellen Energiebezugs sowie der Produktionsorganisation geben die Kapitel 1 und 2, diese dienen als Betrachtungsrahmen für die vorliegende Arbeit. Kapitel 3 umfasst einen Literaturüberblick, der sich vornehmlich auf Arbeiten im Kontext einer energieorientierten PPS fokussiert. Aus der Analyse der bestehenden Arbeiten werden Anforderun-

gen abgeleitet, welche die *Integration der Energiebezugsoptionen* in die PPS sowie die Definition eines *sequenziellen Planungsablaufs* in den Fokus rücken.

Kapitel 4 bietet einen kurzen Überblick über den weiteren Aufbau der Arbeit sowie die Elemente der Methodik, welche die Forschungsfragen beantworten und die Anforderungen an die Arbeit aufgreifen. Kapitel 5 beantwortet die erste Forschungsfrage nach der *Abbildung der Energiebezugsoptionen* in der PPS. Beim Ergebnis handelt es sich um ein schrittweises Vorgehen zur Generierung von Mengen- und Leistungsmodellen, die dem Planungsablauf zur Verfügung gestellt werden. Durch das Aufzeigen der Schritte für die Definition von Maschinen-, Produkt- und Auftragsmodellen adressiert Kapitel 6 die Frage nach der *Modellierung von Energiebedarfen* eines Produktionssystems.

In Kapitel 7 gehen die Modellierung von Bedarf und Bezug in einem *sequenziellen Planungsverfahren* auf, welches die Anforderungen an ein geeignetes Lösungsverfahren für die energiebezugsorientierte Auftragsplanung beantwortet. Schließlich widmet sich Kapitel 8 dem *Nutzen der vorgestellten Methodik* und somit der letzten Forschungsfrage dieser Arbeit. Anhand eines Fallbeispiels wird der Ablauf der energiebezugsorientierten Auftragsplanung dargelegt und mittels der Zielgrößen Energiemenge, energiebezugsbedingte Emissionen sowie Kosten bewertet.

9.2 Kritische Diskussion der Ergebnisse

Produktionsunternehmen sehen sich permanent mit einem stetigen Wandel ihrer Umwelt konfrontiert. Dominierten in der Vergangenheit ökonomische und soziale Treiber das Umfeld von Fabriken, werden diese in jüngster Zeit durch ökologische Treiber ergänzt. Dies begründet sich durch Umwelt- und Emissionsrichtlinien, steigende Energiekosten oder den Kundenwunsch nach nachhaltig gefertigten Produkten (vgl. Abschnitt 1.2). Die Abstimmung des Strombedarfs, z.B. in Form der *Energiekosten* oder *CO₂-Emissionen*, von produktionsabhängigen Betriebsmitteln stellt bestehende PPS-Ansätze vor eine Herausforderung. Diese gilt es, mit den konventionellen strategischen Leistungszielen *Zeit*, *Kosten* und *Qualität* in der Produktion zu verbinden. Vorliegende Arbeit zeigt, wie die Auftragsplanung um Informationen des elektrischen Energiebezugs sowie -bedarfs in unterschiedlichen Lösungsbausteinen erweitert wird. Das Resultat findet Einzug in die Erarbeitung einer übergreifenden Methodik. Den Kernaspekt bilden die Modellierung eines Produktionssystems, des standortspezifischen Energiebezugs und die Entwicklung eines sequenziellen Lösungsverfahrens. Durch die prototypische Umsetzung in Kapitel 8 wird ge-

zeigt, dass die Umsetzung eines variablen Lastmanagements mit Produktionsanlagen mittels einer abgestimmten Auftragsplanung ermöglicht wird. Im vorgestellten Fallbeispiel ist es gelungen, den Energieeinsatz und die daraus resultierenden Energiekosten sowie CO₂-Emissionen positiv zu beeinflussen.

Die positiven Resultate sind auf technische Überkapazitäten zurückzuführen. Dadurch ist es möglich, den Maschineneinsatz in Zeiten günstiger Energieverfügbarkeit einzuplanen. Dies hat allerdings zur Folge, dass sich die konventionellen Leistungskennzahlen eines Produktionssystems verändern. Im Speziellen lassen sich Abweichungen bei zeitlichen Aspekten, wie z.B. Durchlaufzeiten, oder Effizienzkennzahlen, wie z.B. Anlagennutzung, beobachten. Da sich die Kosten für Energie bzw. energiebezugsbedingte Emissionen im Vergleich zu den weiteren Kosten in der Produktion, wie z.B. Personalkosten, als gering erweisen, ist eine vollständige Ausrichtung an die Energiesituation nur eingeschränkt zweckmäßig. Jedoch ist es mit der vorgestellten Methodik möglich, den Energiebezug als weiteren Aspekt in den Ablauf der Auftragsplanung zu integrieren. Durch die Abbildung der Energiebeschaffungskosten, bestehend aus Energiepreis und die Emissionskosten, ist eine Gesamtkostenverbesserung eines Produktionssystems unter Berücksichtigung der konventionellen Leistungsziele realisierbar.

9.3 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Die Möglichkeit von Unternehmen, sich als Prosumer im Stromsystem zu positionieren, bietet gesellschaftliche und unternehmerische Vorteile. Durch die Anpassung an ein volatiles Energieangebot können flexible Unternehmen dazu beitragen, dass eine verbesserte Integration und Nutzung der erneuerbaren Energiequellen realisiert wird. Somit herrscht das Potenzial, Kosten für die Stabilisierung der Stromnetze zu reduzieren, was wiederum zu einer Entlastung der Gesellschaft und Gesamtwirtschaft führt. Zudem birgt die Nutzung von erneuerbaren Energien im industriellen Umfeld den Vorteil, dass Produkte mit geringeren Emissionen und damit nachhaltig produziert werden. Aufseiten der Unternehmen besteht das Potenzial, durch die Nutzung von schwankenden Strompreisen und Energieverfügbarkeiten Kostenvorteile zu erzielen. Infolgedessen lässt sich aus einer aktuellen Herausforderung zukünftig ein Wettbewerbsvorteil im internationalen Kontext erzielen. Hierzu ist es nötig, dass die kurzfristigen Preissignale einer breiten Masse an industriellen Verbrauchern zur Verfügung gestellt werden, damit das Potenzial eines energieflexiblen Fabrikbetriebs voll ausgeschöpft wird. Zur Umsetzung bedarf es jedoch noch weiterer Forschungsaktivitäten.

Im Kontext der Modellierung von Produktionssystemen herrscht Handlungsbedarf bei der automatisierten Auswertung und Beschreibung von Maschinen, Produkten und Anlagen. Diese können bspw. mithilfe von Methoden des maschinellen Lernens erstellt sowie direkt in ein Planungssystem integriert werden.

Im Fall des Energiebezugs bilden ebenfalls automatisierte Verfahren zur Erstellung der Modelle Potenzial zur Effizienzsteigerung. Für Transaktionen zwischen den Unternehmen und der Strombörse liefern erste integrierbare Block-Chain-Ansätze in der Optimierung Ideen für einen autonomen Handel ohne manuellen Einfluss durch das Unternehmen. Folglich lässt sich die Reaktionsfähigkeit der Auftragsplanung steigern.

Des Weiteren ist die Entwicklung einer energieorientierten Produktionssteuerung notwendig, die eine schwankende Energieverfügbarkeit verarbeitet, den Prozess der Auftragsfreigabe verantwortet und die Durchsetzung überwacht. Zudem erweist sich eine erweiterte Betrachtung der Neben- und Gebäudeanlagen innerhalb der Produktionssteuerung für ein variables Lastmanagement als erforderlich. Diese Anlagen besitzen auch den Vorteil, für ein zukünftiges energieorientiertes Planungsvorgehen einsetzbar zu sein, um die Wechselwirkungen zwischen Maschinen und Nebenanlagen zu berücksichtigen. Weitere Forschungsbedarfe bestehen überdies bei der strukturellen Auslegung und Bewertung von Produktionssystemen mit der Zielstellung der Energieflexibilität.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Themenfeld der energie- und flexibilitätsorientierten Produktionsforschung große Potenziale durch den Einsatz neuer Technologien und organisatorischer Ansätze aufweist. Die dadurch gesteigerte Nachfrageelastizität der Industrie ermöglicht eine bessere Integration der erneuerbaren Energiequellen in das Stromsystem und bietet damit neben den ökonomischen Vorteilen für das Unternehmen ebenso einen ökologischen Nutzen für die Gesellschaft.

10 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Carl Hanser Fachbuchverlag 2011.
ISBN: 978-3-446-42595-8

AGEB 2015

AG Energiebilanzen e.V. (AGEB): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2013. Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) 2015.

ADAM & WITTE 1976

Adam, D.; Witte, T.: Typen betriebswirtschaftlicher Modelle. In: WISU Das Wirtschaftsstudium 5 (1976), S. 1-5.

AGHA 2009

Agha, M. H.: Integrated Management of Energy and Production: Scheduling of Batch Process and Combined Heat & Power (CHP) Plant. Toulouse: Institut National Polytechnique de Toulouse 2009.

AGRICOLA ET AL. 2010

Agricola, A.; Kohler, S.; Seidl, H.: dena-Netzstudie II – Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015-2020 mit Ausblick 2025. Berlin: Deutsche Energie Agentur GmbH 2010.

ALBADI & EL-SAADANY 2008

Albadi, M. H.; El-Saadany, E. F.: A summary of demand response in electricity markets. In: Electric Power Systems Research 78 (2008) 11, S. 1989-1996.

APEL 2012

Apel, R.: Demand Side Integration – Lastverschiebungspotenziale in Deutschland. Frankfurt a. M.: Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik 2012.

BAETGE 1974

Baetge, J.: Betriebswirtschaftliche Systemtheorie. Regelungstheoretische Planungs-Überwachungsmodelle für Produktion, Lagerung und Absatz. Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften 1974. ISBN: 978-3-322-85437-7.

BARDT ET AL. 2014

Bardt, H.; Chrischilles, E.; Growitsch, C.; Hagspiel, S.; Schaupp, L.: Eigenerzeugung und Selbstverbrauch von Strom – Stand, Potentiale und Trends. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft 38 (2014) 2, S. 83-99.

BASIS ET AL. 2015

Basis, H.; Lu, S.; Su, H.; Wang, Y.; Xie, L.; Zhang, Q.: Multi-product Multi-stage Production Planning with Lead Time on a Rolling. In: IFAC-PapersOnLine 48 (2015) 8, S. 1162-1167.

BDEW 2015

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (bdew): Industriestrompreise - Ausnahmeregelungen bei Energiepreisbestandteilen (Aktualisierte Fassung 2015). Internet: <[https://www.bdew.de/internet.nsf/id/23AB0D60851F2923C1257E88002EFA3E/\\$file/BDEW_Energie-Info_Industriestrompreise_160715_final_ohne_AP.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/23AB0D60851F2923C1257E88002EFA3E/$file/BDEW_Energie-Info_Industriestrompreise_160715_final_ohne_AP.pdf)> zuletzt aufgerufen am 15.12.2016.

BEIER 2017

Beier, J.: Simulation Approach Towards Energy Flexible Manufacturing Systems. Cham: Springer International Publishing 2017. ISBN: 978-3-319-46638-5.

BEYER ET AL. 2014

Beyer, H. G.; Heinemann, D.; Lorenz, E.; Lückehe, B.; Mönnich, K.; Focken, U.; Waldl, H.: Vorhersagen der Stromerzeugung aus Sonnen- und Windenergie (2014). Internet: <http://www.researchgate.net/publication/251920178_Vorhersagen_der_Stromerzeugung_aus_Sonnen-_und_Windenergie> zuletzt aufgerufen am 15.12.2016.

BINNER 2009

Binner, H. F.: Handbuch der prozessorientierten Arbeitsorganisation: Methoden und Werkzeuge zur Umsetzung. 3. Aufl. München: Hanser 2008. ISBN: 978-3-446-41627-7.

BMWi 2010

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2010.

BMWi 2012

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Szenarien für eine langfristige Netzentwicklung. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2012.

BMWi 2015

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Ein Strommarkt für die Energiewende. Ergebnispapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Weißbuch). Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2015.

BMWi 2016A

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2016.

BMWi 2016B

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Strukturelle Entwicklungen. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2016.

BNETZA 2011

Bundesnetzagentur (BNetzA): "Smart Grid" und "Smart Market" Eckpunktepapier der Bundesnetzagentur zu den Aspekten des sich verändernden Energieversorgungssystems. Berlin: Bundesnetzagentur 2011.

BNETZA 2013

Bundesnetzagentur (BNetzA): Regelenergie. 2013. Internet: https://www.bundesnetzagentur.de/cln_1411/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Stromnetze/Engpassmanagement/Regelenergie/regelenergie-node.html zuletzt aufgerufen am 15.12.2016.

BNETZA 2016A

Bundesnetzagentur (BNetzA): Redispatch. 2016 Internet: https://www.bundesnetzagentur.de/cln_1411/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Stromnetze/Engpassmanagement/Redispatch/redispatch-node.html zuletzt aufgerufen am 15.12.2016.

BNETZA 2016B

Bundesnetzagentur (BNetzA): Abschaltbare Lasten (2016). Internet:
<https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Stromnetze/Engpassmanagement/AbLaV/AbschbareLasten_node.html> zuletzt aufgerufen am 15.12.2016.

BODE ET AL. 2010

Bode, S.; Frondel, M.; Schmidt, C. M.; Vahrenholt, F.; Schröder, S.: Integration der erneuerbaren Energien in das Stromversorgungssystem. In: Wirtschaftsdienst 90 (2010) 10, S. 643-660.

BOLAY ET AL. 2015

Bolay, S.; Flechtner, J.; Otto, C.: Faktenpapier Eigenerzeugung von Strom. Rahmenbedingungen | Trends | Beispiele. Berlin: DIHK - Deutscher Industrie- und Handelskammertag und VEA - Bundesverband der Energie-Abnehmer e. V. 2014.

BOLLIN 2015

Bollin, E.: Solartechnik. In: Zahoransky, R. (Hrsg.): Energietechnik: Systeme zur Energieumwandlung; Kompaktwissen für Studium und Beruf. 7. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015. S. 359-399.

BONNESCHKY 2002

Bonneschky, A.: Energiekennzahlen in PPS-Systemen. Berlin: dissertation.de 2002. ISBN: 3-89825-454-2.

BROWNE ET AL. 1984

Browne, J.; Dubois, D.; Rathmill, K.; Sethi, S. P.; Stecke, K. E.: Classification of flexible manufacturing systems. In: The FMS Magazine (1984), S. 114-117.

BRUNS ET AL. 2013

Bruns, A.; Neumann, M.; Constantinescu, C.: Energiedatensimulationssoftware in der Fabrikplanung am Beispiel „Total Energy Efficiency Management (TEEM)". In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Handbuch Ressourcenorientierte Produktion. 1. Aufl. München: Carl Hanser Fachbuchverlag 2014. ISBN 978-3-446-43008-2.

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. In: CIRP Annals 61 (2012), S. 459-462.

BÜHRER ET AL. 2013

Bührer, M.; Gutbrod, K.; Müller, M.D.; Doll, J.: Zuverlässigkeit von Einstrahlungsdaten aus mesoskalen Wettermodellen. In: 28. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein 2013.

BULLINGER ET AL. 2000

Bullinger, H.-J.; Eversheim, W.; Haasis, H.-D.: Auftragsabwicklung optimieren nach Umwelt- und Kostenzielen: OPUS - Organisationsmodelle und Informationssysteme für einen produktionsintegrierten Umweltschutz. Berlin: Springer 2000. ISBN: 3540671897.

DANGELMAIER 2009

Dangelmaier, W.: Theorie der Produktionsplanung und -steuerung: Im Sommer keine Kirschpralinen?. Berlin und Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 978-3-642-00633-3.

DEIF 2011

Deif, A. M.: A system model for green manufacturing. In: Journal of Cleaner Production 19 (2011) 14, S. 1553–1559.

DENA 2005

Deutsche Energie-Agentur (dena): Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020. Berlin: Deutsche Energie-Agentur 2005.

DENA 2010

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

DESTATIS 2016A

Statistisches Bundesamt (destatis): Datensatz: Erhebung über die Energieverwendung (060) von 2005, 2010 und 2015. Abgerufen am 18.11.2016.

DESTATIS 2016B

Statistisches Bundesamt (destatis): Produzierendes Gewerbe. Beschäftigte, Umsatz und Investitionen der Unternehmen und Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden 2015. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt 2016.

DIN 1984

Deutsches Institut für Normung (DIN): Programmablaufplan nach DIN 66001.
In: Hering, B.: Software-Engineering. Berlin: Vieweg+Teubner Verlag 1984.
ISBN: 978-3-528-04284-4.

DIN 2003

Deutsches Institut für Normung (DIN): Norm 8580:2003-09: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth 2003.

DISPAN & SCHWARZ-KOCHER 2014

Dispan, J. Schwarz-Kocher, M.: Maschinen- und Anlagenbau in Deutschland: Entwicklungstrends und Herausforderungen. Stuttgart und Hannover: IMU-Institut 2014.

DOE 2006

Department of Energy (DoE): Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them - A report to the United States Congress pursuant to section 1252 of the energy policy act of 2005. Washington: U.S. Department of Energy 2006.

DOMSCHKE & DREXL 2007

Domschke, W.; Drexel, A.: Einführung in Operations Research. 7. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 978-3540709480.

DOMSCHKE & SCHOLL 2007

Domschke, W.; Scholl, A.: Heuristische Verfahren. In: Köhler, R.; Küpper, H.-U.; Pfingsten, A. (Hrsg.): Handwörterbuch der Betriebswirtschaft. 6. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 2007, S. 674-683.

DÖRMER 2013

Dörmer, J.: Produktionsprogrammplanung bei variantenreicher Fließproduktion: Untersucht am Beispiel der Automobilendmontage. Wiesbaden: Springer 2013.
ISBN: 978-3-658-02092-7.

DORNFELD 2013

Dornfeld, D. A.: Green Manufacturing. Boston: Springer 2013. ISBN: 978-1-4419-6015-3.

DUFLOU ET AL. 2012

Duflou, J. R.; Sutherland, J. W.; Dornfeld, D.; Herrmann, C.; Jeswiet, J.; Kara, S.; Hauschild, M.; Kellens, K.: Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 61 (2012) 2, S. 587–609.

DYCKHOFF & SPENGLER 2007

Dyckhoff, H.; Spengler, T. S.: Produktionswirtschaft: Eine Einführung für Wirtschaftsingenieure. 2. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer 2007. ISBN: 978-3540722175.

DYCKHOFF 2003

Dyckhoff, H.: Grundzüge der Produktionswirtschaft: Einführung in die Theorie betrieblicher Wertschöpfung. 4. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer 2003. ISBN: 978-3540440482.

EEX 2016

European Energy Exchange (eex): Datenset der Day-ahead-Spotmarktpreise 2013 - 2015 Deutschland. Internet: <<http://www.epexspot.com/de/>> zuletzt aufgerufen am 10.12.2016.

EEX 2017

European Energy Exchange (eex): Indizes. Internet: <<https://www.eex.com/de/handel/indizes>> zuletzt aufgerufen am 10.12.2016.

EGERER ET AL. 2015

Egerer, J.; Hirschhausen, C.; Weibezahn, J.; Kemfert, C.: Energiewende und Strommarktdesign: Zwei Preiszonen für Deutschland sind keine Lösung. In: DIW Wochenbericht 9 (2015). Internet: <https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.497518.de/15-9-3.pdf> am 15.12.2016.

ELLINGER ET AL. 2003

Ellinger, T.; Beuermann, G.; Leisten, R.: Operations Research: Eine Einführung. 6. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer 2003. ISBN: 978-3-540-00477-6.

EMEC AT 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: Seliger, G. (Hrsg.): Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Innovative Solutions (2013). S. 691–696.

ENGELMANN 2009

Engelmann, J.: Methoden und Werkzeuge zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Fabriken. Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme 2009.

EPEX 2017

EPEX SPOT SE: Handel. Internet: <<http://www.epexspot.com/de/produkte/Handel>> zuletzt aufgerufen am 10.12.2016.

ERLACH & WESTKÄMPER 2009

Erlach, K.; Westkämper, E.: Energiewertstrom: Der Weg zur energieeffizienten Fabrik. Stuttgart: Fraunhofer 2009. ISBN: 978-3-8396-0010-8.

EVERS 2002

Evers, K.: Simulationsgestützte Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage. Diss. Leibnitz Universität (2002). Hannover: Universitätsbibliothek 2002.

EVERSHEIM & SCHUH 1999

Eversheim, W.; Schuh, G.: Produktion und Management 3: Gestaltung von Produktionssystemen. Berlin und Heidelberg: Springer 1999. ISBN: 978-3-540-65453-7.

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. In: Journal of Manufacturing Systems 30 (2011) 4, S. 234–240.

FARUQUI ET AL. 2009

Faruqui, A.; Hledik, R.; Tsoukalis, J.: The Power of Dynamic Pricing. In: The Electricity Journal 22 (2009) 3, S. 42-56.

FARUQUI & SERGICI 2013

Faruqui, A.; Sergici, S.: Arcturus: International Evidence on Dynamic Pricing. In: The Electricity Journal 26 (2013) 7, S. 55-65.

FELDMANN & SLAMA 2001

Feldmann, K.; Slama, S.: Highly flexible Assembly – Scope and Justification. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 50 (2001) 2, S. 489–498.

FICHTER 2005

Fichter, K.: Interpreneurship: Nachhaltigkeitsinnovationen in interaktiven Perspektiven eines vernetzenden Unternehmertums. Marburg: Metropolis 2005. ISBN: 3895185221.

FINN & FITZPATRICK 2013

Finn, P. Fitzpatrick, C.: Demand side management of industrial electricity consumption: Promoting the use of renewable energy through real-time pricing. In: Applied Energy 113 (2014), S. 11-13.

FISCHEDICK ET AL. 2014

Fishedick M.; Roy, J.; Abdel-Aziz, A.; Acquaye, A.; Allwood, J.; Ceron, J.-P.; Geng, Y.; Kheshgi, H.; Lanza, A.; Perczyk, D.; Price, L.; Santalla, E.; Sheinbaum, C.; Tanaka, C.: Industry. In: 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 und New York: Cambridge University Press 2014.

FISCHER 1999

Fischer, K.: Fuzzybasierte Auftragsauswahl an Schmiedeaggregaten. Diss. Leibniz Universität (1999). Hannover: Universitätsbibliothek 1999.

FOWLER & SCOTT 2000

Fowler, M.; Scott, K.: UML konzentriert: Eine strukturierte Einführung in die Standard-Objektmodellierungssprache. 2. Aufl. München: Addison-Wesley 2000. ISBN: 3-8273-1617-0.

GEIGER 2015

Geiger, F.: System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten. München: Utz 2015. ISBN: 978-3-8316-4537-4.

GELLINGS 1985

Gellings, C. W.: The concept of demand-side management for electric utilities. In: Proceedings of the IEEE 73 (1985) 10, S. 1468-1470.

GELLINGS 2009

Gellings, C. W.: The smart grid: Enabling energy efficiency and demand response. Lilburn: Fairmont Press 2009. ISBN: 0-88173-623-6.

GELLINGS & CHAMBERLIN 1993

Gellings, C. W.; Chamberlin, J. H.: Demand-side management. Concepts and methods. Lilburn: Fairmont Press 1993. ISBN: 978-0132049757.

GIRET ET AL. 2015

Giret, A.; Trentesaux, D.; Prabhu, V.: Sustainability in manufacturing operations scheduling: A state of the art review. In: Journal of Manufacturing Systems 37 (2015), S. 126-140.

GÖTZE & ROTHER 2014

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

GRAßL 2015

Graßl, M.: Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion. München: Utz 2015. ISBN: 978-3-8316-4476-6.

GÜNTHER & TEMPELMEIER 2012

Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. Berlin und Heidelberg: Springer 2012. ISBN: 978-3642251641.

GUTENBERG 1971

Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Berlin und Heidelberg: Spinger 1971. ISBN: 978-3-642-61990-8.

HAAG 2013

Haag, H.: Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion. Stuttgart: Fraunhofer 2013. ISBN: 978-3-8396-0547-9.

HACKSTEIN 1989

Hackstein, R.: Produktionsplanung und -steuerung (PPS): Ein Handbuch für die Betriebspraxis. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989. ISBN: 3184009246.

HAU 2014

Hau, E.: Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. 5. Aufl. Berlin: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-642-28876-0.

HAUFF & KLEINE 2009

Hauff, M.; Kleine, A.: Nachhaltige Entwicklung: Grundlagen und Umsetzung. München: De Gruyter 2009. ISBN: 978-3486590715.

HERMANN 1996

Hermann, U.: Wertorientiertes Ressourcenmanagement. Neuausrichtung der Kostenrechnung aus ressourcenbasierter Sicht. Wiesbaden: Springer Fachmedien 1996. ISBN: 978-3-8244-6398-5.

HERRMANN 2010

Herrmann, C.: Ganzheitliches Life Cycle Management. Berlin, Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-01420-8.

HERRMANN ET AL. 2011

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

HESSELBACH 2012

Hesselbach, J.: Energie- und klimaeffiziente Produktion: Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2012. ISBN: 978-3-8348-0448-8.

HEUCK ET AL. 2013

Heuck, K.; Dettmann, K.-D.; Schulz, D.: Elektrische Energieversorgung. Wiesbaden: Springer 2013. ISBN: 978-3-8348-1699-3.

HINZ ET AL. 2014

Hinz, F.; Iglhaut, D.; Frevel, T.; Möst, D.: Abschätzung der Entwicklung der Netznutzungsentgelte in Deutschland. In: Schriften des Lehrstuhls für Energiewirtschaft, TU Dresden 3. Dresden: Technische Universität Dresden Fakultät Wirtschaftswissenschaften Lehrstuhl für Energiewirtschaft 2014. ISBN: 978-3-86780-444-8.

ICHA & KUHS 2016

Icha, P.; Kuhs, G.: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015. In: Climate Change 26 (2016). Berlin: Umweltbundesamt 2016.

ICHOUA & PECHMANN 2014

Ichoua, S.; Pechmann, A.: Production Scheduling for Sustainable Manufacturing. In: Key Engineering Materials (2014) 572, S. 235-238.

IEA 2013

International Energy Agency (IEA): The Power to Choose - Demand Response in Liberalised Electricity Markets. Paris: International Energy Agency 2003.

IEA 2015

International Energy Agency (IEA): 2015 Key World Energy Statistics. Paris: International Energy Agency (IEA) Head of Communication and Information Office. Chirat 2015.

IINAS 2017

Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien (IINAS): GEMIS Datenbank für Energiesysteme. Internet: <<http://iinas.org/gemis-de.html>> zuletzt aufgerufen am 15.12.2016.

INGBER 1993

Ingber, L.: Simulated annealing: Practice versus theory. In: Mathematical and Computer Modelling 18 (1993) 11, S. 29-57.

IPCC 2014

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Summary for Policymakers. 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 und New York: Cambridge University Press 2014.

JODLBAUER 2008

Jodlbauer, H.: Produktionsoptimierung. Wertschaffende sowie kundenorientierte Planung und Steuerung. 2. Aufl. Wien: Springer 2008. ISBN: 978-3-211-78140-1.

JUNGE 2007

Junge, M.: Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Kassel: kassel university press 2007.

KAUSCH ET AL. 2011

Kausch, P.; Gutzmer, J.; Bertau, M.; Matschullat, J.: Energie und Rohstoffe: Gestaltung unserer nachhaltigen Zukunft. Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3-8274-2797-7.

KELLER ET AL. 2015

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

KELLER ET AL. 2016A

Keller, F.; Schultz, C.; Braunreuther, S., Reinhart, G.: Enabling Energy-Flexibility of Manufacturing Systems through New Approaches within Production Planning and Control. In: *Factories of the Future in the digital environment - Proceedings of the 49th CIRP Conference (2016)* 57, S. 752-757.

KELLER ET AL. 2016B

Keller, F.; Fröschl, G.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Integration standorteigener Energiequellen in die Produktionsplanung. In: *wt Werkstattstechnik online* 106 (2016) 4, S. 157-162.

KELLER ET AL. 2016C

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

KELLER & REINHART 2016A

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

KELLER & REINHART 2016B

Keller, F.; Reinhart, G.: Comparison of heuristic scheduling approaches in an energy-orientated hybrid flow shop. In: Dimitrov, D. (Hrsg.): *Resource Efficiency for Global Competitiveness: Proceedings International Conference on Competitive Manufacturing Stellenbosch, 2016*. S. 359-366.

KEMMOÉ ET AL. 2015

Kemmoé, S.; Lamy, D.; Tchernev, N.: A Job-shop with an Energy Threshold Issue Considering Operations with Consumption Peaks. In: *IFAC-PapersOnLine* 48 (2015) 3, S. 788–793.

KLEINDORFER ET AL. 2005

Kleindorfer, P. R.; Singhal, K.; Van Wassenhove, L. N.: Sustainable Operations Management: In: *Production and Operations Management* 14 (2005) 4, S. 482–492.

KLEPPER AT AL. 2015

Klepper, G.; Schafhausen, F.; Löschel, A.; Schreurs, M. A.: Erwartungen an die Weltklimakonferenz in Paris. In: *Wirtschaftsdienst* 95 (2015) 11, S. 727-743.

KLESSMANN ET AL. 2008

Klessmann, C.; Nabe, C.; Burges, K.: Pros and cons of exposing renewables to electricity market risks—A comparison of the market integration approaches in Germany, Spain, and the UK. In: *Energy Policy* 36 (2008) 10, S. 3646–3661.

KLETTI & SCHUMACHER 2011

Kletti, J.; Schumacher, J.: *Die perfekte Produktion: Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT)*. Berlin und Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-13844-7.

KLOBASA 2010

Klobasa, M.: Analysis of demand response and wind integration in Germany's electricity market. In: *IET Renew. Power Gener. (IET Renewable Power Generation)* 4 (2010) 1, S.55-63.

KLOBASA ET AL. 2013

Klobasa, M.; Angerer, G.; Lüllmann, A.; Schleich, J.; Buber, T.; Gruber, A.; Hünecke, M.; Roon, S.: *Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland: Endbericht einer Studie von Fraunhofer ISI und der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft*. Internet: <https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2012/Lastmanagement-als-Beitrag-zur-Versorgungssicherheit/Agora_Studie_Lastmanagement_Sueddeutschland_Endbericht_web.pdf> zuletzt aufgerufen am 15.12.2016.

KONDZIELLA 2013

Kondziella H.; Brod, K.; Bruckner, T.; Olbert, S.; Mes, F.: *Stromspeicher für die „Energiewende“ – eine aktorsbasierte Analyse der zusätzlichen Speicherkosten*. In: *Z Energiewirtsch (Zeitschrift für Energiewirtschaft)* 37 (2013), S. 249–260.

KONSTANTIN 2013

Konstantin, P.: *Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt*. 3. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer 2013.

KOSTE & MALHOTRA 1999

Koste, L.; Malhotra, M.: A theoretical framework for analyzing the dimensions of manufacturing flexibility. In: *Journal of Operations Management* 18 (1999), S. 75-93.

KUBLCEK 1977

Kublcek, H.: Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesigns als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung. In: Köhler, R. (Hrsg.): Empirische und handlungsorientierte Forschungskonzeption in der Betriebswirtschaftslehre. Stuttgart: Poeschel Verlag 1977.

KÜPPER & HELBER 2004

Küpper, H.-U.; Helber, S.: Ablauforganisation in Produktion und Logistik. 3. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 2004. ISBN: 379102342X.

KURBEL 2016

Kurbel, K.: Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie. Von MRP bis Industrie 4.0. 8. Aufl. Berlin: De Gruyter 2016. ISBN: 978-3110441680.

LAREK 2012

Larek, R.: Ressourceneffiziente Auslegung von fertigungstechnischen Prozessketten durch Simulation und numerische Optimierung. Aachen: Shaker 2012. ISBN: 9783844011135.

LEPRICH ET AL. 2005

Leprich, U.; Bauknecht, D.; Evers, E.; Gaßner, H.; Schrader, K.: Dezentrale Energiesysteme und Aktive Netzbetreiber (DENSAN) 2005. Internet: <<http://www.oeko.de/oekodoc/304/2005-027-de.pdf>> zuletzt aufgerufen am 15.12.2016.

LEVERMANN 2013

Levermann, J.: Kundenbefragung Energiewende. Wie kann die Energiewende erfolgreich gestaltet werden? München: Siemens AG 2013.

LIEBL ET AL. 2015

Liebl, C.; Popp, R.; Zäh, M. F.: Energieflexibilität von Produktionsanlagen. In: wt Werkstattstechnik online 105 (2015) 3, S. 136-140.

LIU ET AL. 2008

Liu, X.; Zou, F.; Zhang, X.: Mathematical Model and Genetic Optimization for Hybrid Flow Shop Scheduling Problem Based on Energy Consumption. In: Chinese Control and Decision (2008), S. 1002-1007.

LIU ET AL. 2014

Liu, Y.; Dong, H.; Lohse, N.; Petrovic, S.; Gindy, N.: An investigation into minimising total energy consumption and total weighted tardiness in job shops. In: *Journal of Cleaner Production* 65 (2014), S. 87-96.

LÖDDING 2016

Lödning, H.: *Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*. 3. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer 2016. ISBN: 978-3662484586.

LOU ET AL. 2013

Luo, H.; Du, B.; Huang, G.Q.; Chen, H.; Li, X.: Hybrid flow shop scheduling considering machine electricity consumption cost. In: *International Journal of Production Economics* 146 (2013) 2, S. 423-439.

LUCZAK 2004

Luczak, H.: *Rationalisierung und Reorganisation*. Aachen: Skript zur Vorlesung im Eigendruck 2004.

LUKS 2005

Luks, F.: Innovationen, Wachstum und Nachhaltigkeit: Innovationen und Nachhaltigkeit: Eine ökologisch-ökonomische Betrachtung. In: *Jahrbuch Ökologische Ökonomik* 4 (2005). S. 41-62.

MASMOUDI ET AL. 2016

Masmoudi, O.; Yalaoui, A.; Ouazene, Y.; Chehade, H.: Multi-item capacitated lot-sizing problem in a flow-shop system with energy consideration. In: *IFAC-PapersOnLine* 49 (2016) 12, S. 301-306.

MAUBAUCH 2013

Maubach, K.-D.: *Energiewende*. Wiesbaden: Springer 2013. ISBN: 978-3-658-03357-6.

MAUDERER 2010

Mauderer, M.: *Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen*. München: Utz 2010. ISBN: 978-3-8316-4126-0.

MESCHEDE 2015

Meschede, D.: *Gerthsen Physik*. Berlin und Heidelberg: Springer 2015. ISBN: 978-3-662-45976-8.

METEOCONTROL 2017

Meteocontrol: Solarstromprognose. Internet: <<http://www.meteocontrol.com/de/services/solarstromprognose/>> zuletzt aufgerufen am 15.12.2016.

MODARRES & IZADPANAH 2016

Modarres, M.; Izadpanahi, E.: Aggregate production planning by focusing on energy saving: A robust optimization approach. In: Journal of Cleaner Production 133 (2016), S. 1074-1085.

MOUZON 2008

Mouzon, G.: Operational Methods and Models for Minimization of Energy Consumption in a Manufacturing Environment. Wichita: Wichita State University 2008.

MÜLLER & PONICK 2014

Müller, G.; Ponick, B.: Grundlagen elektrischer Maschinen. 10. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH 2014. ISBN: 978-3527-41205-1.

MÜLLER ET AL. 2009

Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T.; Strauch, J.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Berlin und Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-89643-2.

NABE 2009

Nabe, C.; Beyer, C.; Brodersen, N.; Schäffler, H.; Adam, D.; Heinemann, C.; Tusch, T.; Eder, J.; Wyl, C. de; Vom Wege, J.-H.; Mühe, S.: Einführung von lastvariablen und zeitvariablen Tarifen. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen 2009.

NEUGEBAUER ET AL. 2008

Neugebauer, R.; Westkamper, E.; Klocke, F.; Kuhn, A.; Schenk, M.; Michaelis, A.; Spath, D.; Weidner, E.: Energieeffizienz in der Produktion: Untersuchung zum Handlungs- und Forschungsbedarf. München: Fraunhofer 2008.

NEUGEBAUER ET AL. 2012

Neugebauer, R.; Putz, M.; Schlegel, A.; Langer, T.; Franz, E.; Lorenz, S.: Energy-Sensitive Production Control in Mixed Model Manufacturing Processes. In: Dornfeld, D.; Linke, B. (Hrsg.): A Concept for an Energy Management System. In: Leveraging Technology for a Sustainable World: Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering. Berlin und Heidelberg: Springer 2012. S. 399–404.

NEUMANN & MORLOCK 2004

Neumann, K.; Morlock, M.: Operations Research. 2. Aufl. München: Hanser 2004. ISBN: 978-3446221406.

NYHUIS ET AL. 2008A

Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E.: Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum 2008. ISBN: 978-3-939026-96-9.

NYHUIS ET AL. 2008B

Nyhuis, P.; Heinen, T.; Reinhart, G.; Rimpau, C.; Abele, E.; Wörn, A.: Wandlungsfähige Produktionssysteme – Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. In: wt Werkstattstechnik online 98 (2008) 1/2, S. 85-91.

PALENSKY & DIETRICH 2011

Palensky, P.; Dietrich, D.: Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. In: IEEE Transactions on Industrial Informatics 7 (2011) 3, S. 381-388.

PAULUS & BORGGREFE 2011

Paulus, M.; Borggreffe, F.: The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany. In: Applied Energy 88 (2011) 2, 432-441.

PAWELLEK 2014

Pawellek, G.: Ganzheitliche Fabrikplanung: Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. 2. Aufl. Berlin: Springer 2014. ISBN: 978-3-662-43727-8.

PWC 2015

PricewaterhouseCoopers (PwC): The World in 2050: Will the shift in global economic power continue?. London: PricewaterhouseCoopers (PwC) 2015.

PECHMANN & SCHÖLER 2011

Pechmann, A.; Schöler, I.: Optimizing Energy Costs by Intelligent Production Scheduling. In: Hesselbach, H.; Herrmann, C. (Hrsg.): Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing: Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Berlin und Heidelberg: Springer 2011. S. 293–298.

PECHMANN & SCHÖLER 2012

Pechmann, A.; Schöler, I.: Energieeffizienz als Zielgröße in der Produktionsplanung und -steuerung. Abschlussbericht des Projektes 01LY0813A gefördert durch das BMWi. Emden / Leer: 2012.

PECHMANN ET AL. 2012A

Pechmann, A.; Hackmann, R.; Schöler, I.: Measuring and Visualizing Different Energy Sources. In: Dornfeld, D.; Linke, B. (Hrsg.): A Concept for an Energy Management System. In: Leveraging Technology for a Sustainable World: Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering. Berlin und Heidelberg: Springer 2012. S. 527–532.

PECHMANN ET AL. 2012B

Pechmann, A.; Hackmann, R.; Schöler, I.: Energy Efficient and Intelligent Production Scheduling - Evaluation of a New Production Planning and Scheduling Software. In: Dornfeld, D.; Linke, B. (Hrsg.): A Concept for an Energy Management System. In: Leveraging Technology for a Sustainable World: Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering. Berlin und Heidelberg: Springer 2012. S. 491–496.

PELLAND ET AL. 2013

Pelland, S.; Remund, J.; Kleissl, J.; Oozeki, T.; De Brabandere, K.: Photovoltaic and Solar Forecasting: State of the Art. IEA PVPS Task 14, Subtask 3.1 Report IEA - PVPS T14 - 01 2013. International Energy Agency.

PELTE 2010

Pelte, D.: Die Zukunft unserer Energieversorgung: Eine Analyse aus mathematisch-naturwissenschaftlicher Sicht. Wiesbaden: Vieweg Teubner 2010. ISBN: 978-3-8348-0989-6.

POPP & ZÄH 2014

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

POPP ET AL. 2013

Popp, R.; Keller, F.; Atabay, D.; Dornmair, R.; Buderus, J.; Kohl, J.: Technische Innovationen für die energieflexible Fabrik. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (2013) 07-08, S. 556–560.

POPP ET AL. 2015

Popp, R.; Liebl, C.; Zäh, M.; Atabay, D.; Wagner, U.; Buderus, J.; Kohl, J.; Franke, J.: Technische Erfassung der Energieflexibilität und deren Umsetzung in der Produktion. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (2015) 09, S. 505-509.

PUDLIK ET AL. 2016

Pudlik, M.; Sensfuß, F.; Winkler, J.: Leitstudie Strommarkt Arbeitspaket 4: Welche Faktoren beeinflussen die Entwicklung des Marktwerts der Erneuerbaren Energien?. Berlin: Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie 2015.

PUTZ ET AL. 2012A

Putz, M.; Schlegel, A.; Stoldt, J.; Franz, E.; Langer, T.; Tisztli, M.: A Framework for Energy-Sensitive Production Control in MES. In: 14th International Conference on Modern Information Technology in the Innovation Processes of Industrial Enterprises MITIP. Budapest, Ungarn 2012.

PUTZ ET AL. 2012B

Putz, M.; Schlegel, A.; Franz, E.; Langer, T.; Stoldt, J.: Energy-sensitive control strategies for discrete part manufacturing. In: 10th Global Conference on Sustainable Manufacturing. CIRP-Conference, Istanbul 2012.

PUTZ ET AL. 2013

Putz, Matthias; Schlegel, Andreas; Stoldt, Johannes; Schwerma, Christin; Langer, Tino: Energy sensitive digital planning and simulation: In: Dimitrov, D. (Hrsg.): Green Manufacturing for a Blue Planet. Stellenbosch 2013, S. 365–370.

PUTZ ET AL. 2014

Putz, M.; Schlegel, A.; Stoldt, J.; Franz, E.; Langer, T.: Energy-sensitive control strategies for decoupled production systems. In: International Journal of Sustainable Manufacturing 3 (2014) 3, S. 250-268.

RAGER 2008

Rager, M.: Energieorientierte Produktionsplanung: Analyse, Konzeption und Umsetzung. Wiesbaden: Gabler 2008.

RAGER ET AL. 2014

Rager, M.; Gahm, C.; Denz, F.: Energy-oriented scheduling based on Evolutionary Algorithms. In: Computers & Operations Research 54 (2015), S. 218–231.

REGELLEISTUNG 2016A

Regelleistung.net (regelleistung): Markt für Regelleistung in Deutschland: Datenabfrage 2016. Internet: <<https://www.regelleistung.net/ext/data/>> zuletzt aufgerufen am 15.12.2016.

REGELLEISTUNG 2016B

Regelleistung.net (regelleistung): Methodik der reBAP-Ermittlung (2016). Internet: <<https://www.regelleistung.net/ext/static/rebap>> zuletzt aufgerufen am 15.12.2016.

REGELLEISTUNG 2016C

Regelleistung.net (regelleistung): Markt für Regelleistung in Deutschland (2016). Internet: <<https://www.regelleistung.net/ext/static/market-information>> zuletzt aufgerufen am 15.12.2016.

REGELLEISTUNG 2016D

Regelleistung.net (regelleistung): Allgemeines zur Regelleistung - Technische Aspekte (2016). Internet: <<https://www.regelleistung.net/ext/static/technical>> zuletzt aufgerufen am 15.12.2016.

REINHARDT 2013

Reinhardt, S.: Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung. München: Utz 2013. ISBN: 978-3-8316-4317-2.

REINHART ET AL. 2010

Reinhart, G.; Karl, F.; Krebs, P.; Reinhardt, S.: Energiewertstrom: Eine Methode zur ganzheitlichen Erhöhung der Energieproduktivität. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (2010) 10, S. 870-875.

REINHART ET AL. 2012

Reinhart, G.; Reinhardt, S.; Graßl, M.: Bewertung der Energieflexibilität von Produktionssystemen. In: wt Werkstattstechnik online 102 (2012) 9, S. 622-628.

RIEDLE 2017

Riedle, K.: Entwicklungen in der Kraftwerkstechnik für die industrielle Eigenstromerzeugung. In: Matzen, F.; Tesch, R. (Hrsg.): Industrielle Energiestrategie: Praxishandbuch für Entscheider des produzierenden Gewerbes. Wiesbaden: Springer 2017. S. 109-130.

RIEPER 1992

Rieper, B.: Betriebswirtschaftliche Entscheidungsmodelle: Grundlagen. Herne: Neue Wirtschafts-Briefe 1992. ISBN: 9783482452512.

ROHDE 2013

Rohde C.: Erstellung von Anwendungsbilanzen für das Jahr 2012 für das verarbeitende Gewerbe mit Aktualisierungen für die Jahre 2009-2011: Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung 2013.

ROHJANS ET AL. 2010

Rohjans, S; Uslar, M.; Bleiker, R.; González, J; Specht, M.: Survey of Smart Grid Standardization Studies and Recommendations. In: First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm) 2010, Institute of Electrical and Electronics Engineers; Communications Society, S. 583 - 588.

ROON & GROBMAIER 2010

Roon, S.; Grobmaier, T.: Demand Response in der Industrie – Status und Potenziale in Deutschland. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. 2010.

ROPOHL 2009

Ropohl, G.: Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2009. ISBN: 978-3-86644-374-7.

SAINI 2004

Saini, S.: Conservation v. generation. In: Refocus 5 (2004) 3, S. 52-54.

SCHEER 1997

Scheer, A.-W.: Wirtschaftsinformatik: Referenzmodelle für industrielle Geschäftsprozesse. 7. Aufl. Berlin: Springer 1997. ISBN: 978-3540629672.

SCHENK ET AL 2014

Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. 2. Aufl. Berlin: Springer 2014

SCHIEFERDECKER 2006

Schieferdecker, B.: Energiemanagement-Tools: Anwendung im Industrieunternehmen. Berlin: Springer 2006.

SCHIPPER 2006

Schipper, M.: Energy-Related Carbon Dioxide Emissions in U.S. Manufacturing. Washington: Energy Information Administration (EIA) 2006.

SCHMITZ & SCHAUMANN 2010

Schmitz, K. W.; Schaumann, G.: Kraft-Wärme-Kopplung. Dordrecht: Springer 2010. ISBN: 3540264663.

SCHNELLBACH 2015

Schnellbach, P.: Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung unter Berücksichtigung von Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme. München: Utz 2015. ISBN: 978-3-8316-4540-4.

SCHREMS 2014

Schrems, S.: Methode zur modellbasierten Integration des maschinenbezogenen Energiebedarfs in die Produktionsplanung. Aachen: Shaker 2014. ISBN: 978-3-8440-2999-4.

SCHUH & SCHMIDT 2014

Schuh, G.; Schmidt, C.: Produktionsmanagement. Handbuch Produktion und Management 5. 2. Aufl. Berlin: Springer 2014. ISBN: 978-3-642-54287-9.

SCHUH & STICH 2012

Schuh, G.; Stich, V.: Grundlagen der PPS. 4. Aufl. Berlin: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-25422-2.

SCHUH ET AL. 2005

Schuh, G.; Gulden, A.; Wemhöner, N.; Kampker A.: Bewertung der Flexibilität von Produktionssystemen: Kennzahlen zur Bewertung der Stückzahl-, Varianten- und Produktänderungsflexibilität auf Linienebene. In: wt Werkstattstechnik online 94 (2005) 6, S. 299-304.

SCHUH ET AL. 2012A

Schuh, G.; Brosze, T.; Brandenburg, U.: Aachener PPS-Modell: In: Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Grundlagen der PPS. S. 11- 28. 4. Aufl. Berlin: Springer 2012.

SCHUH ET AL. 2012B

Schuh, G.; Brandenburg, U.; Cuber, S.: Aufgaben: In: Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Grundlagen der PPS. S. 29- 81. 4. Aufl. Berlin: Springer 2012.

SCHULTZ ET AL. 2015A

Schultz, C.; Keller, F.; Simon, P.; Reinhart, G.; Dornmair, R.; Wagner, U.: Wirtschaftlicher Einsatz von Energieflexibilität als Lösungsbaustein der Energiewende. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (2015) 07-08, S. 416-420.

SCHULTZ ET AL. 2015B

Schultz, C.; Sellmaier, P.; Reinhart, G.: An Approach for Energy-oriented Production Control Using Energy Flexibility. In: Procedia CIRP 29 (2015), S. 197-202.

SCHULTZ ET AL. 2016

Schultz, C.; Keller, F.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Die PPS für eine energieflexible Fabrik: Einbindung von Energiedaten in die Produktionsplanung und -steuerung. In: wt Werkstattstechnik online 106 (2016) 4, S. 193-198.

SCHUMACHER & WÜRFEL 2015

Schumacher, I.; Würfel, P.: Strategien zur Strombeschaffung in Unternehmen: Energieeinkauf optimieren, Kosten senken. Wiesbaden: Springer Gabler 2015.

SCHWAB 2012

Schwab, A. J.: Elektroenergiesysteme. Dordrecht: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-21957-3.

SETHI & SETHI 1990

Sethi, A. K.; Sethi, S. P.: Flexibility in manufacturing: A survey. In: International Journal of Flexible Manufacturing Systems 2 (1990) 4, S. 289-328.

SHARMA ET AL. 2015

Sharma, A.; Zhao, F.; Sutherland, J. W.: Econological scheduling of a manufacturing enterprise operating under a time-of-use electricity tariff. In: Journal of Cleaner Production 108 (2015), S. 256-270.

SIMON ET AL. 2016

Simon, P.; Glasschröder, G.; Reinhart, G.: Energieflexibilität eines Produktionssystems. In: wt Werkstattstechnik online 106 (2016) 4, S. 199-203.

SOLARSERVER 2017

SolarServer: Individuelle Photovoltaik-Leistungsprognose für mehrere Tage. Internet: <<http://www.solarserver.de/service-tools/online-rechner/individuelle-photovoltaik-leistungsprognose-fuer-mehrere-tage.html>> zuletzt aufgerufen am 15.12.2016.

SPATH 2013

Spath, D.: Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Stuttgart: Fraunhofer 2013. ISBN: 978-3-8396-0570-7.

SPRENG ET AL. 2014

Spreng, S.; Kohl, J.; Franke, J.: Development of an Adjustable Measuring System for Electrical Consumptions in Production. In: Applied Mechanics and Materials. (2014) 655, S. 41-45.

STAIB 1996

Staiß, F.: Photovoltaik: Technik, Potentiale und Perspektiven der solaren Stromerzeugung. Wiesbaden: Vieweg Teubner 1996. ISBN: 978-3-528-06639-0.

STEFFEN 2012

Steffen, B.: Prospects for pumped-hydro storage in Germany. In: Energy Policy 45 (2012), S. 420-429.

SUWA & SAMUKAWA 2015

Suwa, H.; Samukawa, T.: A New Framework of Energy-efficient Manufacturing Systems Based on Energy Load Profiles. In: Procedia CIRP 41 (2016), S. 313-317.

TALUKDAR & GELLINGS 1987

Talukdar, S.; Gellings, C. W.: Load management. New York: IEEE Press 1987. ISBN: 978-0879422141

TEICH 1998

Teich, T.: Optimierung von Maschinenbelegungsplänen unter Benutzung heuristischer Verfahren. Lohmar: Eul 1998. ISBN: 3890126146.

THIEDE 2012

Thiede, S.: Energy efficiency in manufacturing systems. Berlin: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-25913-5.

TÖPFER 2012

Töpfer, A.: Erfolgreich Forschen. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, 2012. ISBN: 978-3-642-34168-7

UN 2008

United Nations (UN): Kyoto Protocol to the united Nations Framework Convention on Climate Change. Kyoto: 2008. Internet:
<<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>> zuletzt aufgerufen am 15.12.2016.

UN 2015A

United Nations (UN): Paris Agreement. Paris: 2015. Internet:
<http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf> am 15.12.2016.

UN 2015B

United Nations (UN): Population Division Department of Economic and Social Affairs world Population Prospects: The 2015 Revision. Internet:
<<http://esa.un.org/unpd/wpp/>> zuletzt aufgerufen am 15.12.2016.

ULRICH & HILL 1979

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. In: Raffée, H.; Abel, B. (Hrsg.): Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Wirtschaftswissenschaft. 7 (1979), S. 161-190.

VDI 1992

Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI): Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung. Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen. 4 Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992. ISBN: 3184010066.

VDMA 2009

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA): VDMA-Einheitsblatt 66412-1: Manufacturing Execution Systems (MES) Kennzahlen. Berlin: Beuth 2009.

VICTOR ET AL. 2014

Victor, D. G.; Zhou, D.; Mohamed Ahmed, E. H.; Dadhich, P. K.; Olivier, J. ; Rogner, H.-H.; Sheikho, K.; Yamaguchi, M.: Introductory Chapter. In: 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 und New York: Cambridge University Press 2014.

WAHREN 2014

Wahren, S.: Energie- und Rohstoffpolitik. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Handbuch Ressourcenorientierte Produktion. 1. Aufl. München: Carl Hanser 2014. ISBN 978-3-446-43008-2.

WARREN 2014

Warren, P.: A review of demand-side management policy in the UK. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 29 (2014), S. 941-951.

WEINERT 2010

Weinert, N.: Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme. Stuttgart: Fraunhofer 2010. ISBN: 978-3839601730.

WEISSENBERGER-EIBL ET AL. 2014

Weissenberger-Eibl, M. A.; Bradke, H.; Walz, R.; Schröter, M.; Ziegus, S.: Energie- und Rohstoffpolitik. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Handbuch Ressourcenorientierte Produktion. 1. Aufl. München: Carl Hanser 2014. ISBN 978-3-446-43008-2.

WELTBANK 2016

The World Bank (Weltbank): Industry, value added (% of GDP). Internet: <<http://data.worldbank.org/indicator>> zuletzt aufgerufen am 15.12.2016.

WESTKÄMPER 2006

Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin und Heidelberg: Springer 2006.

WESTKÄMPER 2008

Westkämper, E.: Fabriken sind komplexe langlebige Systeme. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. S. 85-107. Berlin: Springer 2008.

WIENDAHL & HERNANDEZ 2002

Wiendahl, H.-P.; Hernández, R.: Fabrikplanung im Blickpunkt: Herausforderung Wandlungsfähigkeit. In: wt Werkstattstechnik online 92 (2002) 4, S. 133-138.

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. Aufl. München: Hanser 2010. ISBN: 978-3-446-41878-3.

WIENDAHL 2011

Wiendahl, H.-H.; Auftragsmanagement der industriellen Produktion: Grundlagen, Konfiguration, Einführung. Berlin und Heidelberg 2011. ISBN: 978-3-642-19148-0.

WIENDAHL ET AL. 2014

Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 2. Aufl. München: Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-43892-7.

WIRTH 2016

Wirth, H.: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg: Fraunhofer ISE 2016. Internet: <<http://www.ise.fraunhofer.de/.../aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>> zuletzt aufgerufen am 15.12.2016.

WÜRFEL & KUNZELMANN 2014

Würfel, P.; Kunzelmann, T.: Stromschnäppchen am Spotmarkt sichern. In: Energy 2.0- Zukunft Energie 8 (2014), S. 16-18.

WÜRFEL ET AL. 2017

Würfel, P.; Kunzelmann, T.; Toptik, M.: Energiebeschaffung für Industrieunternehmen. In: Matzen, F.; Tesch, R. (Hrsg.): Industrielle Energiestrategie: Praxis-handbuch für Entscheider des produzierenden Gewerbes. Wiesbaden: Springer 2017. S. 361-411.

ZÄPFEL 1989

Zäpfel, G.: Taktisches Produktions-Management. Berlin: De Gruyter 1989. ISBN: 3-11-012014-3.

ZÄPFEL 2010

Zäpfel, G.; Bögl, M.; Braune, R.: Metaheuristic Search Concepts. A Tutorial with Applications to Production and Logistics. Berlin und Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-11342-0

ZHANG ET AL. 2014

Zhang, H.; Zhao, F.; Sutherland, J. W.: Manufacturing Scheduling for Energy Cost Reduction in a Smart Grid Scenario. In: ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference. Volume 1: Materials; Micro and Nano Technologies; Properties, Applications and Systems; Sustainable Manufacturing. Detroit, Michigan 2014.

11 Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden in den Jahren von 2014 bis 2017 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten. Diese beschäftigten sich mit unterschiedlichen Fragestellungen zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung. Ergebnisse dieser Arbeiten sind in Teilen in das vorliegende Dokument eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

- Lucius, Christian: Energieflexible Maßnahmen in der Ressourcenplanung zur Lastgangbeeinflussung Analyse der Hauptverbraucher auf Anlagenebene (Hochschule für angewandte Wissenschaften München, abgegeben im Juli 2014)
- Schönborn, Christina: Heuristische Optimierungsmethoden für eine energieflexible Maschinenbelegung in der Fertigung (Semesterarbeit, Technische Universität München, abgegeben im September 2014)
- Schießl, Sebastian: Modellierung einer energiebeschaffungsorientierten Produktionsplanung und -steuerung (ePPS) (Masterarbeit, Technische Hochschule Ingolstadt, abgegeben im November 2014)
- Bayerl, Christina: Entwicklung einer energiebezugsorientierten Termin- und Kapazitätsplanung (Praktikum, Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV im Zeitraum Januar bis November 2016)
- Brenner, Maximilian: Entwicklung einer Maschinenbelegungsplanung mit variablen, produktabhängigen Energieverbräuchen (Semesterarbeit, Technische Universität München, abgegeben im März 2017)
- Fröschl, Georg: Methode zur parametrisierten Darstellung von Energiebezugsoptionen für die Produktionsplanung (Semesterarbeit, Technische Universität München, abgegeben im März 2017)