

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

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

Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

Markus Albert Graßl

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: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Chr. Herrmann,
Technische Universität Braunschweig

Die Dissertation wurde am 02.09.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 18.02.2015 angenommen.

Markus Graßl

**Bewertung der Energieflexibilität
in der Produktion**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 300

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2015

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2015

ISBN 978-3-8316-4476-6

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Projektgruppe Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen (RMV) des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, dem Leiter der Projektgruppe RMV sowie des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM), für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann, dem Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der Technischen Universität Braunschweig, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferats und die interessanten Diskussionen in Braunschweig herzlich bedanken. Für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, dem Leiter des *iwb* und Ordinarius des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TUM.

Darüber hinaus danke ich der Bayerischen Forschungsstiftung für die Förderung innovativer und anwendungsnahe Forschung. Insbesondere danke ich den Partnern im FOREnergy-Forschungsverbund für ihr Engagement bei der Erforschung der energieflexiblen Fabrik.

Ich danke zudem allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des RMV und *iwb*, die mich während meiner Zeit am RMV begleitet und bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben. Mein Dank gilt außerdem Herrn Dr.-Ing. Matthias Glonegger für die kritische Durchsicht meiner Dissertation und die konstruktiven Ratschläge. Ganz besonders möchte ich Frau Dr.-Ing. Saskia Reinhardt für ihre Unterstützung und die immer wertvollen Diskussionen danken.

Schließlich bedanke ich mich ganz herzlich bei meiner Familie für den Rückhalt, den sie mir in allen Lebenssituationen gibt, und für ihre Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit. Insbesondere danke ich meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht haben. Nicht zuletzt danke ich meiner Partnerin Maria, die durch ihre Geduld und ihr Verständnis wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	vii
Verzeichnis der Formelzeichen.....	ix
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	4
1.3 Eingrenzung des Betrachtungsraums	4
1.3.1 Fokussierung auf elektrischen Strom	4
1.3.2 Spezifizierung des Betrachtungsbereichs	7
1.4 Aufbau der Arbeit	9
2 Flexibilität in der Produktion.....	11
2.1 Allgemeines.....	11
2.2 Flexibilität als Mittel zur Beherrschung von Unsicherheiten	11
2.2.1 Produktionssysteme im turbulenten Umfeld	11
2.2.2 Charakterisierung von Flexibilität	13
2.2.3 Arten der Flexibilität	16
2.3 Dimensionen der Flexibilität.....	19
2.3.1 Allgemeines.....	19
2.3.2 Zustandsdimension	20
2.3.3 Zeitdimension	21
2.3.4 Kostendimension	22

2.4	Bewertung von Flexibilität	24
2.4.1	Motivation	24
2.4.2	Klassifizierung möglicher Bewertungsverfahren.....	25
2.5	Energieflexibilität	27
2.5.1	Allgemeines.....	27
2.5.2	Begriffsdefinition	27
2.5.3	Mögliche Preismodelle zur Integration von energieflexiblen Fabriken in den Energiemarkt	29
2.5.4	Charakterisierung von Energieflexibilität	33
2.5.5	Berücksichtigung der Flexibilitätsdimensionen	35
3	Stand der Erkenntnisse	37
3.1	Untersuchungsrahmen	37
3.2	Ansätze zur Bewertung und Nutzung von Energie-flexibilität	39
3.2.1	Analyse energietechnischer Ansätze.....	39
3.2.2	Analyse verfahrenstechnischer Ansätze.....	41
3.2.3	Analyse produktionstechnischer Ansätze	43
3.3	Zusammenfassung und Handlungsbedarf.....	46
4	Konzeption der Bewertung der Energieflexibilität	49
4.1	Allgemeines	49
4.2	Anforderungen	49
4.3	Modell zur Energieflexibilitätsbewertung	50
4.3.1	Zustands- und Maßnahmendefinition	50
4.3.2	Modellierung von Produktionsstationen	53
4.3.3	Maßnahmenidentifikation	56

4.4	Ableitung von Energieflexibilitätsaxiomen	63
4.4.1	Allgemeines	63
4.4.2	Zustandsbezogene Axiome.....	63
4.4.3	Zeitbezogene Axiome.....	65
4.4.4	Kostenbezogene Axiome.....	68
5	Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion.....	69
5.1	Allgemeines.....	69
5.2	Erweiterung des Bewertungsmodells.....	69
5.3	Bewertung der Energieflexibilität von Produktionsstationen	72
5.3.1	Grundlegende Gleichung zur Erfüllung der Axiome Nr. 1 und 2....	72
5.3.2	Ermittlung von zeitlichen und monetären Gewichtungsfaktoren nach den Axiomen Nr. 3-6.....	78
5.3.3	Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität von Ausgangszuständen nach den Axiomen Nr. 1-6	88
5.3.4	Ganzheitliche Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität von Produktionsstationen	93
5.4	Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Produktions- stationen	94
5.4.1	Allgemeines	94
5.4.2	Auswirkungen von Puffergrößen	94
5.5	Kostenermittlung.....	96
5.5.1	Allgemeines	96
5.5.2	Identifikation von relevanten Kostenarten	97
5.5.3	Quantifizierung der relevanten Kostenarten.....	100

6	Vorgehensweise zur Bewertung der Energie-flexibilität	107
6.1	Übersicht über die Vorgehensweise	107
6.2	Auswahl der Produktionsstation	109
6.3	Aufnahme der Ausgangszustände und deren Abhängigkeiten	110
6.4	Identifikation von Maßnahmen	112
6.5	Aufnahme der bewertungsrelevanten Größen	113
6.6	Bewertung	113
6.7	Analyse	114
6.7.1	Allgemeines	114
6.7.2	Stations- und Maßnahmenauswahl	114
6.7.3	Steigerung der Energieflexibilität	116
6.8	Anwendungsfälle der Bewertung	118
7	Anwendung der Energieflexibilitätsbewertung	121
7.1	Allgemeines	121
7.2	Softwaremodell	121
7.3	Projektbeispiel	123
7.3.1	Stationsauswahl	123
7.3.2	Aufnahme der Ausgangszustände und deren Abhängigkeiten	124
7.3.3	Identifikation von Maßnahmen	126
7.3.4	Aufnahme der bewertungsrelevanten Größen	127
7.3.5	Bewertung und Analyse	128
7.4	Bewertung der entwickelten Kennzahl und Vorgehensweise	133
7.4.1	Allgemeines	133
7.4.2	Einordnung der entwickelten Bewertung	133

7.4.3	Erfüllung der Anforderungen	134
7.4.4	Aufwand und Nutzen der Bewertung	136
8	Zusammenfassung und Ausblick	139
8.1	Zusammenfassung	139
8.2	Ausblick	141
9	Literaturverzeichnis	143
10	Anhang	161
10.1	Beweis der Ergebnisse von Formel (5.1)	161
10.2	Zustände von Produktionsstationen	162
11	Studienarbeiten	163

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Abs.	Absatz
BMU	Bundesumweltministerium
BMWi	Bundeswirtschaftsministerium
CPP	Critical Peak Pricing
d. h.	das heißt
DENA	Deutsche Energie-Agentur
DOE	U.S. Department of Energy
DR	Demand Response
EEX	European Energy Exchange
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
f.	folgende [Seite]
ff.	folgende [Seiten]
ggf.	gegebenenfalls
GW	Gigawatt
HT	Hochtarifzeiten
i. d. R.	in der Regel
IH	Instandhaltung
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
MILP	mixed integer linear programming

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Min.	Minuten
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
NE	Nichteisen
Nr.	Nummer
NT	Niedertarifzeiten
PJ	Petajoule
RTP	Real Time Pricing
S.	Seite bzw. Seiten
sog.	so genannt
TOU	Time of Use
u. a.	unter anderem
u. U.	unter Umständen
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informations- technik e.V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel
z. Z.	zur Zeit

Verzeichnis der Formelzeichen

Große lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
AZ_i	-	Ausgangszustand i einer Produktionsstation
B	-	Anzahl Betriebsstoffe
$\bar{B}_{b,i,m}$	kg, l	Zusätzlicher durchschnittlicher Bedarf von Betriebsstoff b der Maßnahmen m von Ausgangszustand i
C	-	Anzahl Energieträger
$E_{Station}$	-	Energieflexibilität einer Produktionsstation
E_i	-	Energieflexibilität von Ausgangszustand i
I	-	Anzahl Ausgangszustände einer Produktionsstation
$K_{i,m}$	€	Kosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i
\bar{K}^E	€/kW, €/MW	Durchschnittliche Einsparungen je kW/MW unter Berücksichtigung der Renditeforderungen des Unternehmens
K^{IH}	€	Kosten Instandhaltungsmaterial
K^M	€	Produktwert
K^W	€	Werkzeugkosten
M	-	Anzahl Maßnahmen
M^-	-	Anzahl Maßnahmen mit negativer Leistungsänderung
M^+	-	Anzahl Maßnahmen mit positiver Leistungsänderung
$M_{i,m}$	-	Maßnahme m von Ausgangszustand i

Verzeichnis der Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
$MK_{i,m}$	€	<i>Zusätzliche Materialkosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i</i>
$MK_{B,i,m}$	€	<i>Zusätzliche Betriebsstoffkosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i</i>
$MK_{C,i,m}$	€	<i>Zusätzliche Energiekosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i</i>
$MK_{W,i,m}$	€	<i>Zusätzliche Werkzeugkosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i</i>
P_i	kW	<i>Leistungsbedarf von Ausgangszustand i</i>
$P_i(t)$	kW	<i>Zeitliche Leistungsänderung von Ausgangszustand i</i>
$P_{i,m}$	kW	<i>Leistungsänderung der Maßnahmen m von Ausgangszustand i</i>
P_{max}	kW	<i>Maximaler Leistungsbedarf der Produktionsstation</i>
P_{min}	kW	<i>Minimaler Leistungsbedarf der Produktionsstation</i>
$\Delta P_{i,m}$	kW	<i>Leistungsdifferenz der Zielzustände der Maßnahmen m und m-1 von Ausgangszustand i</i>
$\Delta P'_{i,m}$	kW	<i>Gewichtete Leistungsdifferenz der Zielzustände der Maßnahmen m und m-1 von Ausgangszustand i</i>
$PK_{i,m}$	€	<i>Zusätzliche Personalkosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i</i>
$PK_{IH,i,m}$	€	<i>Zusätzliche Instandhaltungskosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i</i>
$PK_{P,i,m}$	€	<i>Zusätzliche Planungskosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i</i>
$PK_{R,i,m}$	€	<i>Zusätzliche Rüstkosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i</i>
$PK_{S,i,m}$	€	<i>Zusätzliche Personalkosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i</i>

Symbol	Einheit	Bedeutung
$S_{i,m}$	-	Anzahl betroffener Mitarbeiter der Maßnahme m von Ausgangszustand i
V	-	Verteilung der Zustände eines Systems
$\bar{W}_{c,i,m}$	kWh	Zusätzlicher durchschnittlicher Energiebedarf von Energieträger c der Maßnahmen m von Ausgangszustand i
$ZK_{i,m}$	€	Zusätzliche Zinskosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i
$ZK_{L,i,m}$	€	Zusätzliche Lagerkosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i
$ZZ_{i,m}$	-	Zielzustand der Maßnahme m von Ausgangszustand i

Kleine lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
b	-	Index zur Bezeichnung des betrachteten Betriebsstoffes
c	-	Index zur Bezeichnung des betrachteten Energieträgers
i	-	Index zur Bezeichnung des betrachteten Ausgangszustandes
\bar{k}_b^B	€/kg, €/l	Durchschnittliche Kosten je Menge von Betriebsstoff b
\bar{k}^E	€/kWh, €/MWh	Mittlerer Strompreis
\bar{k}_c^E	€/kWh, €/MWh	Durchschnittliche Kosten je Menge von Energieträger c
\bar{k}_p^E	€/kW, €/MW	Durchschnittlicher gezahlter Leistungspreis des anreizbasierten Programms
\bar{k}_w^E	€/kWh, €/MWh	Durchschnittlicher gezahlter Arbeitspreis des anreizbasierten Programms
k^L	%	Lagerkostensatz
k^P	€/h	Stundensatz des Ausführenden
m	-	Index zur Bezeichnung der betrachteten Maßnahmen eines Ausgangszustandes
m^+	-	Index zur Bezeichnung der betrachteten Maßnahmen eines Ausgangszustandes, welche eine Leistungserhöhung zur Folge haben
m^-	-	Index zur Bezeichnung der betrachteten Maßnahmen eines Ausgangszustandes, welche eine Leistungsminderung zur Folge haben
r	-	Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung der Renditeforderungen des Unternehmens

Symbol	Einheit	Bedeutung
t_e	<i>Min</i>	<i>Bearbeitungsdauer</i>
$t_{ab,i}$	-	<i>Zeitpunkt des abschließenden Ereignisses von Ausgangszustand i</i>
$t_{aus,i}$	<i>Min.</i>	<i>Zeitpunkt des auslösenden Ereignisses von Ausgangszustand i</i>
t_{grenz}^{akt}	<i>Min.</i>	<i>Geforderte Aktivierungsdauer einer Maßnahme</i>
$t_{i,m}^{akt}$	<i>Min.</i>	<i>Aktivierungsdauer der Maßnahme m von Ausgangszustand i</i>
t_{grenz}^{deakt}	<i>Min.</i>	<i>Geforderte Deaktivierungsdauer einer Maßnahme</i>
$t_{i,m}^{deakt}$	<i>Min.</i>	<i>Deaktivierungsdauer der Maßnahme m von Ausgangszustand i</i>
\bar{t}^E	<i>Min.</i>	<i>Durchschnittliche Zeitdauer eines Strompreisniveaus bzw. eines Events</i>
\bar{t}^{IH}	<i>Min.</i>	<i>Durchschnittliche Instandhaltungsdauer</i>
\bar{t}^L	<i>Min.</i>	<i>Durchschnittliche zusätzliche Verweildauer im Lager</i>
$t_{grenz_o}^{max}$	<i>Min.</i>	<i>Maximal geforderte maximale Verweildauer einer Maßnahme</i>
$t_{grenz_u}^{max}$	<i>Min.</i>	<i>Minimal geforderte maximale Verweildauer einer Maßnahme</i>
$t_{i,m}^{max}$	<i>Min.</i>	<i>Maximale Verweildauer der Maßnahme m von Ausgangszustand i</i>
$t_{Puffer_{nach}}^{max}$	<i>Min.</i>	<i>Maximale Verweildauer aufgrund des nachgelagerten Puffers</i>
$t_{Puffer_{vor}}^{max}$	<i>Min.</i>	<i>Maximale Verweildauer aufgrund des vorgelagerten Puffers</i>

Verzeichnis der Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
t_{Tech}^{max}	Min.	Maximale Verweildauer aufgrund technischer Restriktionen
$t_{grenz_o}^{min}$	Min.	Minimal geforderte minimale Verweildauer einer Maßnahme
$t_{grenz_u}^{min}$	Min.	Maximal geforderte minimale Verweildauer einer Maßnahme
$t_{i,m}^{min}$	Min.	Minimale Verweildauer der Maßnahme m von Ausgangszustand i
\bar{t}^P	Min.	Durchschnittliche Planungsdauer
\bar{t}^R	Min.	Durchschnittliche Rüstdauer
\bar{t}^S	Min.	Durchschnittliche Anpassungsdauer
v^{IH}	%	Zusätzlicher Instandhaltungsbedarf
v^W	%	Zusätzlicher Werkzeugverschleiß
z^P	%	Personalkostenzuschlag

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\alpha_{i,m}$	-	<i>Gewichtungsfaktor der Maßnahme m von Ausgangszustands i</i>
$\alpha_{i,m}^{akt}$	-	<i>Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der Aktivierungsdauer der Maßnahme m von Ausgangszustands i</i>
$\alpha_{i,m}^{deakt}$	-	<i>Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der Deaktivierungsdauer der Maßnahme m von Ausgangszustands i</i>
$\alpha_{i,m}^k$	-	<i>Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der Kosten der Maßnahme m von Ausgangszustands i</i>
$\alpha_{i,m}^{max}$	-	<i>Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der maximalen Verweildauer der Maßnahme m von Ausgangszustands i</i>
$\alpha_{i,m}^{min}$	-	<i>Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der minimalen Verweildauer der Maßnahme m von Ausgangszustands i</i>
β_i	%	<i>Zeitlicher Anteil des Ausgangszustands i</i>
δ	%	<i>Preisschranke zur Nutzung der Energieflexibilität</i>

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die natürlichen Ressourcen stellen die Lebensgrundlage der Menschen dar. Aus diesem Grund lässt sich eine dauerhaft hohe Lebensqualität nur durch den Schutz dieser Ressourcen, d. h. aller erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primärrohstoffe, der Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft), aufrecht erhalten (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2005, S. 3; UBA 2012, S. 22). Daher ist es anzustreben, den Verbrauch von nicht erneuerbaren bzw. nicht in menschlichen Zeithorizonten erneuerbaren Ressourcen zu reduzieren und im Rahmen von Kreislaufwirtschaften wieder- und weiterzuverwenden (ABELE & REINHART 2011, S. 113).

Bei der Nutzung und Erzeugung von Energie wird derzeit noch stark auf nicht erneuerbare Ressourcen wie Kohle, Gas oder Öl gesetzt (PROGNOS 2005, S. 17; BAYER 2009, S. 4.; GREENPEACE 2012, S. 6). So wurden in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2011 13.374 PJ Energie verbraucht, wovon 79 % aus fossilen nicht nachwachsenden Energieträgern erzeugt wurden (AGEB 2012, S. 4). Ein gewichtiger Ansatzpunkt, den Verbrauch natürlicher Ressourcen zu verringern, stellt somit die Substitution der heute aus fossilen Energieträgern gewonnenen Energie durch die Energieerzeugung aus unerschöpflichen Quellen, wie Windkraft oder Solarenergie, dar (VBW 2010, S. 4; BURGER ET AL. 2012, S. 27). Aus diesem Grund plant die Bundesrepublik Deutschland, den Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung bis zum Jahr 2050 auf 80 % zu erhöhen (BMW & BMU 2010, S. 5). Der Ausbau der erneuerbaren Energien soll dabei vor allem mithilfe der Windenergie vollzogen werden (BMW & BMU 2010, S. 6). Allerdings weisen der Energieträger Windkraft, aber auch Solarenergie witterungs- und standortbedingt ein ausgeprägt volatiles (Erzeugungs-) Verhalten auf (MOURA & DE ALMEIDA 2010, S. 2581; WÜNSCH ET AL. 2011, S. 13 f.; DENA 2012, S. 41). Zur Verdeutlichung dieses Sachverhalts ist in Abbildung 1 die Stromerzeugung aus Windkraft an einem beliebigen Tag dargestellt. Demnach zeigte die Stromerzeugung in Deutschland an dem Tag eine gesamte Schwankungsbreite der abgegebenen Leistung von über 2 GW auf und zwischen 19 und 20 Uhr kurzfristige Schwankungen von über 500 MW (EEX 2011).

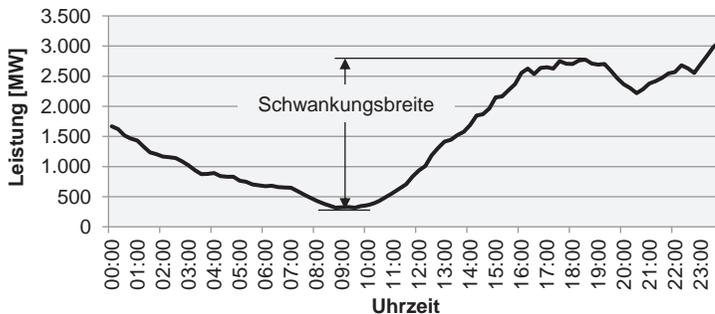


Abbildung 1: Volatile Stromerzeugung aus Windenergie nach EEX (2011)

Diese Eigenschaft der erneuerbaren Energien – die Volatilität in der Stromerzeugung – hat weitreichende Konsequenzen für das gesamte Stromnetz und somit für die Kosten der Energieerzeugung und -bereitstellung. Da sich elektrischer Strom nicht zu wirtschaftlichen Bedingungen speichern lässt¹ (SCHUFFT 2007, S. 19; VDE 2008, S. 74), muss im Stromnetz ständig ein Gleichgewicht zwischen Stromnachfrage und -erzeugung herrschen (PAHLE ET AL. 2012, S. 39; FRIEGE & KAMPWIRTH 2012, S. 159), um so eine sichere Versorgung mit elektrischer Energie gewährleisten zu können. Dieses Gleichgewicht wird durch Messung der Netzfrequenz überwacht. Gerät das Stromnetz durch unerwartete Schwankungen seitens der Nachfrage oder der Erzeugung aus dem Gleichgewicht, z. B. bei Auftreten einer Windflaute und somit einer geringeren Stromerzeugung der betroffenen Windkraftanlagen, verändert sich die Frequenz im Netz. In Folge dessen müssen Maßnahmen ergriffen werden, um das Gleichgewicht wieder herzustellen und somit Stromausfälle zu vermeiden. Derzeit erfolgt das Ausgleichen von Netzschwankungen hauptsächlich erzeugerseitig durch den Einsatz von sog. Regenergien. Diese werden je nach Reaktionsgeschwindigkeit nach einer Störung in Primärregelleistungen, Sekundärregelleistungen und Minutenreserven untergliedert (KONSTANTIN 2009, S. 410 f.). Meist handelt es sich hierbei um Pumpspeicher- oder Gaskraftwerke, deren Stromerzeugung sich schnell hoch- bzw. herunterfahren lässt (CRASTAN 2012, S. 77). Da diese Kraftwerke immer Kapazitäten vorhalten müssen, um im Bedarfsfall schnell reagieren zu können,

¹ Eine Ausnahme stellen hier Pumpspeicherkraftwerke dar, welche die Speicherung von elektrischem Strom zu wirtschaftlichen Bedingungen in energiewirtschaftlich relevanten Dimensionen ermöglichen. Allerdings sind die Ausbaumöglichkeiten hierbei aufgrund von geographischen Bedingungen in Deutschland beschränkt.

werden sie meist nur unter Teillast betrieben und arbeiten somit nicht an ihrem optimalen Betriebspunkt. Der Einsatz von Regelenergien ist somit besonders kostenintensiv. Durch den derzeitigen Ausbau der erneuerbaren Energien nehmen die Schwankungen im Stromnetz erzeugungsbedingt zu (KANNGIESSER ET AL. 2011, S. 3). In Folge dessen ist eine deutlich erhöhte Regelenergiekapazität von Nöten, was zu weiteren Kosten für den Ausbau der erneuerbaren Energien führt und somit die Preise von elektrischem Strom weiter ansteigen lässt (DENA 2005; KLOBASA 2009; SCHWAB 2009, S. 190).

Einen alternativen Ansatz zur Gewährleistung der Netzstabilität stellt die Möglichkeit dar, den Verbraucher von elektrischem Strom bzw. die Nachfrageseite als aktiven Teilnehmer in den Strommarkt zu integrieren (BURGER ET AL. 2012, S. 12). Dieses Vorgehen wird in der wissenschaftlichen Literatur unter verschiedenen Begriffen, wie z. B. „Smart Grid“, „Demand Response“, „Demand Side Management“ usw., diskutiert. Allen diesen Ansätzen sind die Überlegungen gemein, dass Verbraucher von elektrischem Strom die Möglichkeit haben, elektrische Lasten zu verschieben und bereit sind, dies bei einem bestimmten Strompreis zu tun, um Energie bevorzugt zu Zeiten niedrigerer Preise zu beziehen. Wissenschaftliche Studien erwarten durch dieses Vorgehen verschiedene Vorteile für das gesamte Energiesystem. Insbesondere ist mit einer steigenden Versorgungssicherheit sowie mit sinkenden Strompreisen zu rechnen (TORRITI ET AL. 2009, S. 1575; VON ROON & GROBMAIER 2010, S. 17).

Das verarbeitende Gewerbe ist einer der Hauptverbraucher von elektrischem Strom (BAYER 2009, S. 10). Darüber hinaus weisen viele Prozesse im Produktionsumfeld das Potential auf, zeitlich verlagert zu werden (ACATECH 2012, S. 51). Aus diesem Grund können insbesondere Fabriken ihren Anteil leisten, das Stromnetz verbraucherseitig zu stabilisieren und die Angebots- mit der Nachfrageseite von elektrischem Strom zu synchronisieren. Gleichzeitig lassen sich dadurch wirtschaftliche Vorteile für die Unternehmen erzielen (BNETZA 2010, S. 33). Voraussetzung hierfür ist aber, dass Unternehmen ihr Potential zur bewussten Lastverschiebung und die damit verbundenen Kosten kennen und bewerten können.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Vorgehensweise zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion, d. h. der Fähigkeit, sich schnell und einfach an Änderungen des Energiemarktes anpassen zu können. Hierfür soll eine Kennzahl entwickelt werden, welche die Quantifizierung der Energieflexibilität ermöglicht. Die Kennzahl soll dabei die Auswahl der wirtschaftlichsten Handlungsoption zur Anpassung des Energiebedarfs unterstützen. Des Weiteren soll die zu entwickelnde Kennzahl Optimierungspotential hinsichtlich der Steigerung der Energieflexibilität aufzeigen.

Für die Entwicklung der Kennzahl gilt es, das Energieverbrauchsverhalten von Produktionsstationen zu modellieren und dabei insbesondere mögliche Handlungsoptionen – d. h. Maßnahmen – zur Anpassung des Energiebedarfs zu identifizieren und zu berücksichtigen. Des Weiteren müssen die Anpassungszeiten und -kosten der möglichen Maßnahmen identifiziert werden und den Anforderungen des Energiemarktes gegenübergestellt werden. Aus der übergeordneten Zielstellung dieser Arbeit lassen sich somit folgende drei Kernfragen ableiten, welche es im Zuge dieser Arbeit zu beantworten gilt:

- Welche Anforderungen bestehen seitens des Energiemarktes an die Energieflexibilität von Produktionsstationen?
- Welches Potential bieten Produktionsstationen, um auf Änderungen des Energiemarktes reagieren zu können?
- Welche Kosten verursachen mögliche Anpassungsmaßnahmen, bei Reaktion auf Änderungen des Energiemarktes?

1.3 Eingrenzung des Betrachtungsraums

1.3.1 Fokussierung auf elektrischen Strom

Produzierende Unternehmen beziehen neben elektrischem Strom noch weitere Energieträger. Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um Öl, Gas, Kohle und (Fern-)Wärme (SCHLOMANN ET AL. 2010, S. 11). Die wirtschaftliche Relevanz der einzelnen Energieträger für produzierende Unternehmen ergibt sich aus der eingesetzten Menge sowie den spezifischen Kosten je Handelsmenge der jeweiligen Energieträger. Je nach Unternehmen und Branchenzugehörigkeit des Unternehmens treten hierbei Unterschiede auf. Beispielhaft sind dazu in Abbildung 2

die für den Maschinenbau sowie der Nichteisen-Metalle-Gießereien typischen Energiekostenaufteilungen nach Energieträgern dargestellt. Es ist ersichtlich, dass elektrischer Strom branchenübergreifend den Hauptanteil der Energiekosten einnimmt.

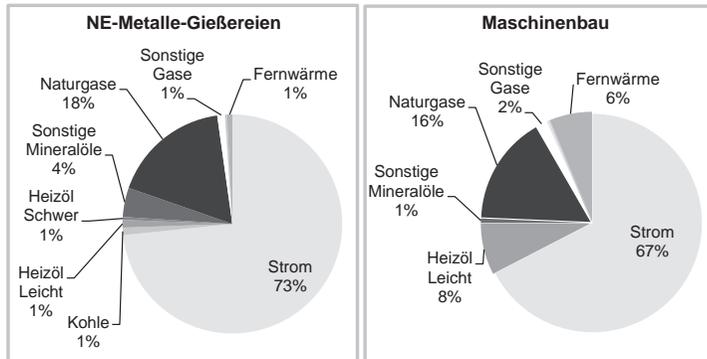


Abbildung 2: Aufteilung der Energiekosten nach Energieträgern in verschiedenen Branchen (nach Daten von u. a. SCHLOMANN ET AL. (2010) und EEX (2011))

Die Energiekosten produzierender Unternehmen errechnen sich, wie bereits erwähnt, aus der eingesetzten Menge sowie den spezifischen Kosten der jeweiligen Energieträger. Dabei weisen die Preise aller Energieträger auf den betreffenden Handelsplattformen ein volatiles Verhalten auf. Zur Verdeutlichung dieses Sachverhalts sind in Abbildung 3 die Preisschwankungen für elektrischen Strom, Öl, Gas und Kohle im Zeitraum von Juli 2011 bis Juli 2012 dargestellt². Um die Preisschwankungen der Energieträger zu verdeutlichen und die Preisunterschiede je Handelseinheit zwischen den Energieträgern vernachlässigen zu können, sind die dargestellten Energiepreise auf den im Diagramm dargestellten Anfangswert im Juli 2011 bezogen.

² Die Erzeugung und der Verbrauch von Fernwärme müssen in räumlicher Nähe erfolgen. Aus diesem Grund wird Fernwärme im Gegensatz zu den anderen betrachteten Energieträgern nicht auf landesweiten Börsen gehandelt. Somit lassen sich auch keine repräsentativen Daten zu den Preisschwankungen von Fernwärme gewinnen. Aus diesem Grund ist Fernwärme in Abbildung 3 nicht dargestellt.

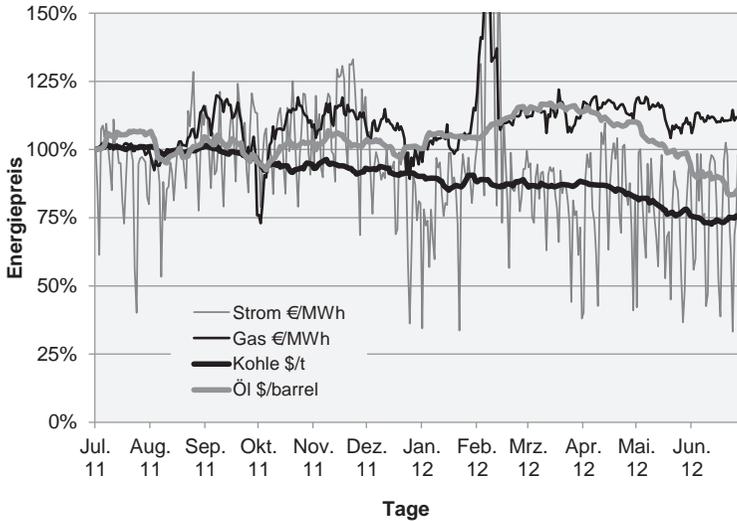


Abbildung 3: Schwankende Energiepreise im Zeitraum Juli 2011-Juli 2012
(eigene Darstellung nach Daten von u. a. EEX (2011))

In der Abbildung ist deutlich ersichtlich, dass Kohle und Öl (dicke Linien im Diagramm) im Vergleich zu Gas und elektrischem Strom nur sehr geringe Schwankungen aufweisen. Der Preis je MWh Gas kann wiederum innerhalb weniger Tage um mehr als 20 % variieren. Am Größten sind aber die ausgeprägten kurz- und mittelfristigen Preisschwankungen von elektrischem Strom. Produzierende Unternehmen können aus diesen Preisschwankungen der einzelnen Energieträger wirtschaftliche Vorteile ziehen, wenn sie durch energieflexibles Verhalten die jeweiligen Energieträger zu möglichst niedrigen Preisen beziehen. Da sich Gas, Kohle und Öl, verglichen mit elektrischem Strom, einfach speichern bzw. lagern lassen (SCHMID ET AL. 2010, S. 18), sind die hierfür nötigen Bewertungsmethoden zur Ermittlung des optimalen Bestellzeitpunktes bzw. der optimalen Bestellmenge vergleichsweise trivial.

Aus diesen Gründen – der Relevanz der Stromkosten für produzierende Unternehmen, die starken Preisschwankungen von elektrischem Strom sowie die geringe Speicherbarkeit von Elektrizität – soll der Fokus dieser Arbeit auf die Bewertung der Energieflexibilität von elektrischem Strom liegen. Im Folgenden werden daher die Begriffe *elektrischer Strom* und *Energie* synonym verwendet.

1.3.2 Spezifizierung des Betrachtungsbereichs

Während die Energieträger Öl, Gas, Kohle und Fernwärme vor allem zur Erzeugung von Raum- und Prozesswärme genutzt werden, wird elektrische Energie in allen Bereichen einer Fabrik eingesetzt (SCHLOMANN ET AL. 2010, S. 2). Den Hauptanteil nehmen dabei mit ca. 69 % der eingesetzten elektrischen Energie die Erzeugung von mechanischer Energie, z. B. in einer Werkzeugmaschine, und mit einem Anteil von ca. 17 % die Erzeugung von Prozesswärme ein (SCHLOMANN ET AL. 2010, S. 15). Die elektrische Energie einer Fabrik wird somit hauptsächlich in der Produktion benötigt, siehe Abbildung 4.

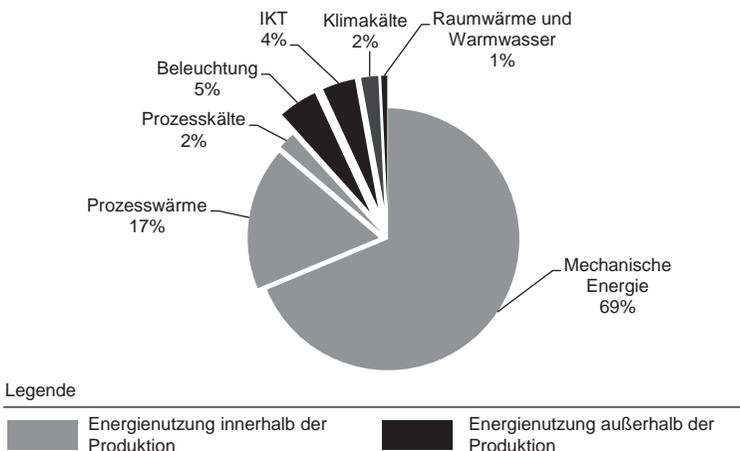


Abbildung 4: Stromnutzung im verarbeitenden Gewerbe nach SCHLOMANN ET AL. (2010, S. 15)

Der Strombedarf einer Produktion resultiert dabei aus ihren energiebetriebenen Ressourcen, d. h. den einzelnen Maschinen, Anlagen und Betriebsmitteln der Produktion (HESSELBACH ET AL. 2008, S. 625). Daher bietet sich eine produktionsressourcenbezogene hierarchische Gliederung einer Produktion an, um den Betrachtungsraum dieser Arbeit weiter zu spezifizieren. WIENDAHL ET AL. (2007, S. 785) nutzen hierfür aufbauend auf den Arbeiten von NYHUIS ET AL. (2005) und WESTKÄMPER (2006) ein Modell, wonach sich Produktionen aus Ressourcensicht in sieben Ebenen unterteilen lassen, siehe Abbildung 5.

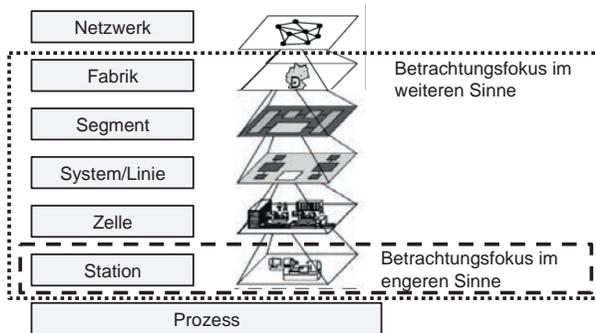


Abbildung 5: Ressourcenorientiertes Ebenenmodell einer Produktion nach WIENDAHL ET AL. (2007, S. 785)

Auf der untersten Ebene sind demnach die Prozesse, d. h. die einzelnen Fertigungs- und Montageoperationen bzw. die genauen technologischen Parameter beschrieben (MÖLLER 2008, S. 9). Sie werden von einzelnen Produktionsstationen durchgeführt, welche somit die Wertschöpfung am Produkt vollziehen (WIENDAHL ET AL. 2007, S. 785). Die einzelnen Stationen werden dann zu Gebilden höherer Ebene verknüpft, den Zellen, Systemen, Segmenten und Fabriken (WIENDAHL ET AL. 2007, S. 785; NYHUIS ET AL. 2008, S. 85). Mehrere Fabriken ergeben schließlich ein Produktionsnetzwerk.

Auf Basis des erläuterten Ebenenmodells einer Produktion wird ersichtlich, dass sich der Energiebedarf bzw. der Lastgang einer Fabrik aus der Summe der Lastgänge ihrer Produktionsstationen ergeben. Um den Lastgang einer Fabrik verändern zu können, muss somit der Energiebedarf einer Produktionsstation bewusst beeinflusst werden. Der engere Fokus dieser Arbeit wird daher auf die Produktionsstation einer Produktion gelegt.

Da das Ziel der Energieflexibilität die Energiekostensenkung ist und die Kostenermittlung der eingesetzten Energie i. d. R. auf Fabrikebene erfolgt, sind die höheren Ebenen einer Produktion, d. h. die Ebenen einer Produktion von der Station bis zur Fabrik, im weiteren Fokus dieser Arbeit mit zu betrachten. Durch die i. d. R. existierende räumliche Trennung der einzelnen Fabriken eines Netzwerks kaufen sie ihren Strom meist unabhängig voneinander ein. Die Betrachtung des Strombedarfs von Produktionsnetzwerken erfolgt daher nicht im Rahmen dieser Arbeit.

1.4 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit gliedert sich in insgesamt acht Kapitel. Nachdem in *Kapitel 1* die Motivation für die Entwicklung einer Vorgehensweise zur Bewertung der Energieflexibilität aufgezeigt wurde – der Ausbau der erneuerbaren Energien und die damit einhergehenden Herausforderungen für das Stromnetz – und eine Eingrenzung der Arbeit auf die Verwendung von elektrischem Strom in Produktionsstationen vorgenommen wurde, wird in *Kapitel 2* dieser Arbeit auf das Konzept der Flexibilität zur Beherrschung von Unsicherheiten eingegangen. Dabei werden verschiedene Flexibilitätsarten erläutert, die Charakteristika von Flexibilität abgeleitet und Ansätze zur Bewertung von Flexibilität aufgeführt. Ein Schwerpunkt dieses Kapitels stellt dabei die Spezifizierung von Energieflexibilität dar. Anschließend wird in *Kapitel 3* der Stand der Technik in Bezug auf die Bewertung der Energieflexibilität aufgezeigt und darauf aufbauend der Handlungsbedarf für diese Arbeit abgeleitet. Im nächsten Schritt werden in *Kapitel 4* die Anforderungen an die Bewertung der Energieflexibilität aufgenommen, eine bewertungsorientierte Modellierung des Stationsverhaltens erarbeitet sowie Maßnahmen zur Anpassung des Energiebedarfs identifiziert. Darüber hinaus werden Axiome der Energieflexibilität abgeleitet. Die Entwicklung der Kennzahl zur Quantifizierung der Energieflexibilität erfolgt auf Basis der Konzeptionierung in *Kapitel 5*. Dabei sind auch die bei der Umsetzung dieser Maßnahmen entstehenden Kosten aufzunehmen. Die Vorgehensweise zur Bewertung der Energieflexibilität wird dann in *Kapitel 6* entwickelt und erläutert. In *Kapitel 7* werden die Umsetzung der Berechnung der Kennzahl in einem Softwaretool sowie die Anwendung der Vorgehensweise in der realen Praxis beschrieben. In dem Kapitel wird darüber hinaus eine kritische Würdigung des in den Kapiteln 5 und 6 entwickelten Bewertungsansatzes vorgenommen. *Kapitel 8* fasst die Arbeit abschließend zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche weitere Forschungsarbeiten im Umfeld der Energieflexibilität. Abbildung 6 zeigt den beschriebenen Aufbau der Arbeit.

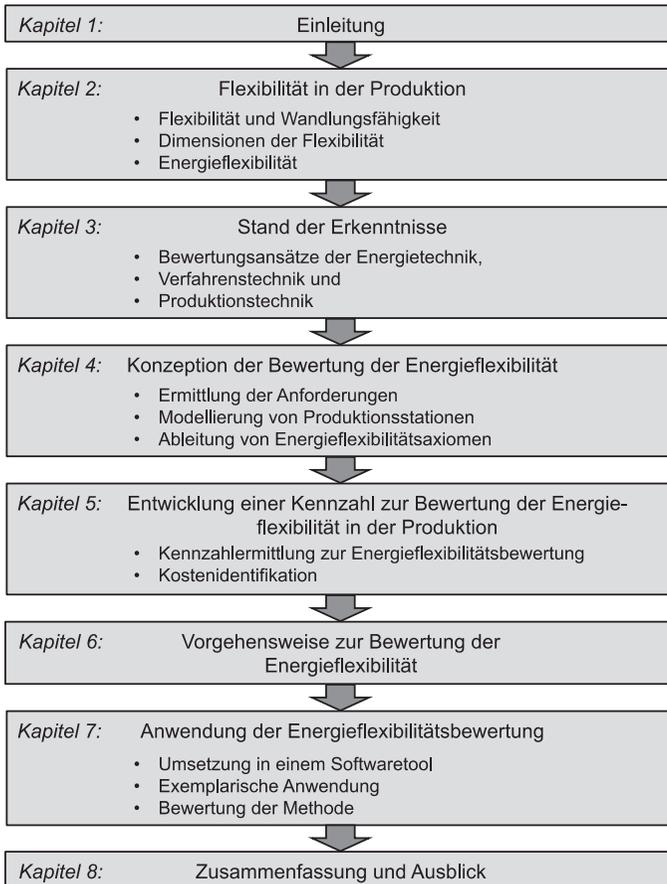


Abbildung 6: Aufbau der Arbeit

2 Flexibilität in der Produktion

2.1 Allgemeines

In diesem Kapitel soll das Konzept der Flexibilität näher erläutert werden. Hierfür wird zunächst in Abschnitt 2.2 das turbulente Umfeld skizziert, in dem sich produzierende Unternehmen befinden. Anschließend wird Flexibilität von Produktionssystemen als Mittel zur Beherrschung der Unsicherheiten, welche durch das turbulente Umfeld induziert werden, dargestellt und eine Charakterisierung von Flexibilität und somit eine Abgrenzung des Begriffs zu ähnlichen Konzepten wie der Wandlungsfähigkeit vorgenommen. Im nächsten Schritt werden dann verschiedene Flexibilitätsarten erklärt. Anschließend werden in Abschnitt 2.3 die Dimensionen von Flexibilität erläutert, welche die Basis für die Bewertung von Flexibilität darstellen. Auf die unterschiedlichen Arten der Bewertung von Flexibilität wird in Abschnitt 2.4 eingegangen. Abschließend werden in Abschnitt 2.5 mögliche Preismodelle zur Integration von energieflexiblen Fabriken in den Energiemarkt dargestellt. Auf Basis dessen wird eine Charakterisierung sowie Erläuterung des Begriffs der Energieflexibilität vorgenommen.

2.2 Flexibilität als Mittel zur Beherrschung von Unsicherheiten

2.2.1 Produktionssysteme im turbulenten Umfeld

Produktionssysteme befinden sich in einem Umfeld, das von einer großen Unsicherheit geprägt ist (ZHANG ET AL. 2003, S. 173; ABELE ET AL. 2006, S. 433). Diese Unsicherheit resultiert aus einer ausgeprägten Dynamik und einer wachsenden Komplexität des Produktionsumfelds (LANZA ET AL. 2012, S. 200; KAMPKER ET AL. 2013). Das Umfeld, in dem sich produzierende Unternehmen befinden, wird daher in der wissenschaftlichen Literatur als *turbulentes Umfeld* bezeichnet (WARNECKE 1996, S. 18; SPATH ET AL. 2001, S. 235).

Die Turbulenzen dieses Umfelds werden von verschiedenen Faktoren hervorgerufen. So führen gesättigte Märkte zu steigenden Kundenanforderungen, welche wiederum zu kürzeren Produktlebenszyklen, einer stärkerer Individualisierung der Produkte und somit zu einer steigenden Anzahl an Produktvarianten führen

(ZÄH & MÜLLER 2006, S. 201; KAMPKER ET AL. 2013). Dieser Sachverhalt wird allgemein als Wandel vom Verkäufer- zum Kundenmarkt bezeichnet und verursacht eine ausgeprägte Schnellebigkeit der Märkte (SPATH ET AL. 2001, S. 235). Des Weiteren sind eine Globalisierung und Internationalisierung der Märkte zu verzeichnen. In Folge dessen kommt es zu einer zusätzlichen Verstärkung der Dynamik des Umfelds (LANZA ET AL. 2010, S. 530). Weitere Turbulenzen können beispielsweise durch neue am Markt verfügbare Technologien erzeugt werden, die Kosten oder Durchlaufzeiten von Bearbeitungsschritten erheblich reduzieren (ZHANG ET AL. 2003, S. 173; HEINEN ET AL. 2008, S. 22).

Neben diesen beschriebenen Herausforderungen sind noch weitere Veränderungen des Produktionsumfelds zu verzeichnen, welche wiederum Turbulenzen erzeugen können (JESKE ET AL. 2011, S. 20). Insbesondere die in der Einleitung dieser Arbeit aufgeführten Herausforderungen, welche aus dem Ausbau der erneuerbaren volatilen Energien resultieren, erzeugen neue Turbulenzen, die auf Produktionssysteme einwirken (GOTTSCHALK 2007, S. 20).

Die Einordnung von Produktionssystemen in das turbulente Umfeld ist in Abbildung 7 in Anlehnung an CISEK ET AL. (2002) verdeutlichend dargestellt. Außerdem zeigt die Abbildung, wie die induzierten Turbulenzen auf verschiedene Rezeptoren der Produktion, wie z. B. Stückzahl, Kosten oder Qualität, einwirken.

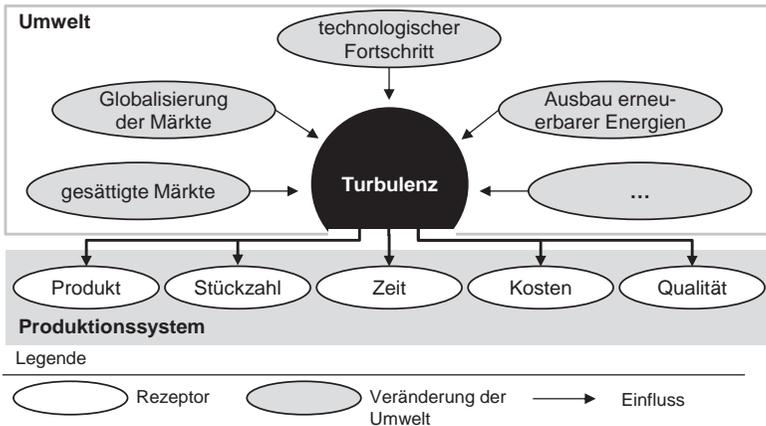


Abbildung 7: Turbulentes Umfeld in Anlehnung an CISEK ET AL. (2002, S. 442)

2.2.2 Charakterisierung von Flexibilität

Um als Unternehmen in dem im vorangegangenen Abschnitt dargestellten turbulenten Umfeld bestehen und seine Wettbewerbsfähigkeit erhalten zu können, müssen Unternehmen die in diesem Umfeld auftretende unvorhergesehene Änderungen erkennen und ihre Prozesse und Abläufe entsprechend anpassen können (SCHUH ET AL. 2004, S. 303; KALUZA 2007, S. 875). Dieser Bedarf nach einer Anpassungsfähigkeit – insbesondere von Produktionsabläufen – wurde bereits früh in den 60er Jahren erkannt und in Folge dessen das Konzept der Flexibilität vorgeschlagen (SETHI & SETHI 1990). Seitdem haben sich verschiedene Autoren mit dem Thema Flexibilität befasst und das Konzept weiterentwickelt. Dementsprechend gibt es in der wissenschaftlichen Literatur eine Vielzahl an weiteren Begrifflichkeiten neben der Flexibilität, welche sich den verschiedenen Arten der Anpassungsfähigkeit widmen (vgl. hierzu z. B. WIENDAHL ET AL. 2007). Aus diesem Grund soll nun auf die beiden vorherrschenden Konzepte der Anpassungsfähigkeit, die Wandlungsfähigkeit und in Abgrenzung hierzu die Flexibilität, eingegangen werden. Auf Basis dessen wird für diese Arbeit eine Spezifizierung von Flexibilität anhand von charakterisierenden Merkmalen vorgenommen.

WESTKÄMPER ET AL. (2000, S. 23) definieren Veränderung als den „Wechsel einer Merkmalsausprägung eines Veränderungsobjekts an einem definierten Veränderungsort im Vergleich zu einem vorherigen Zustand“. Diese Definition eröffnet die Möglichkeit der Abgrenzung und Charakterisierung der beiden Begrifflichkeiten Flexibilität und Wandlungsfähigkeit mithilfe verschiedener Merkmale.

Ein Charakterisierungsmerkmal adressiert den eingenommenen Zielzustand eines Produktionssystems, ausgehend von einem vorherigen Zustand. Im Rahmen der Flexibilität befindet sich das untersuchte Merkmal innerhalb vorgehaltener Dimensionen bzw. Korridore, d. h. der Menge aller möglichen Zustände (WIENDAHL & HERNÁNDEZ 2002, S. 135; NACHTWEY ET AL. 2009, S. 224). Demgegenüber ist die Wandlungsfähigkeit die Veränderung jenseits vorgedachter Dimensionen (NYHUIS ET AL. 2008, S. 87; SPATH ET AL. 2008, S. 675), d. h. bei der Anpassung der Wandlungsfähigkeit nimmt das untersuchte Merkmal des Produktionssystems einen Zustand außerhalb bestehender Korridore ein, welche durch die Flexibilität vordefiniert sind. Es erfolgen somit u. U. eine Verschiebung oder Größenänderung des Flexibilitätskorridors (NYHUIS ET AL. 2008, S. 87; SPATH ET AL. 2008, S. 675). Abbildung 8 verdeutlicht diesen wichtigen

Aspekt der Abgrenzung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an ZÄH ET AL. (2005, S. 4).

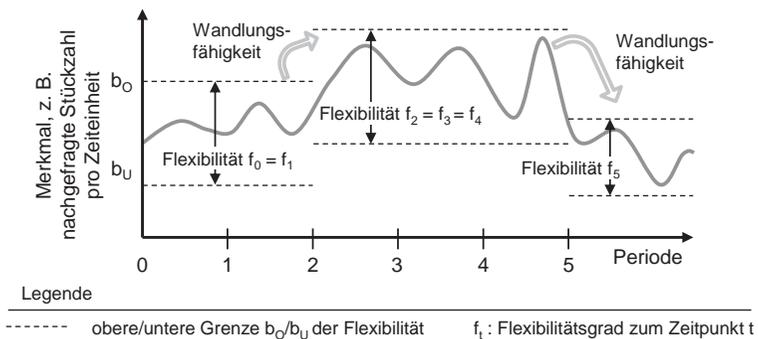


Abbildung 8: Abgrenzung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an ZÄH ET AL. (2005, S. 4)

Die Verschiebung bzw. Größenänderung des Flexibilitätskorridors im Rahmen des Wandlungsprozesses wird in der Regel durch strukturelle Veränderungen erzielt (WIENDAHL 2002, S. 127), indem beispielsweise das Fabrikgebäude angepasst wird. Aus diesem Grund weisen Anpassungen im Zuge der Wandlungsfähigkeit ein weitestgehend irreversibles Verhalten auf. Da im Gegensatz hierzu Anpassungen im Rahmen der Flexibilität innerhalb vorgehaltener Dimensionen bzw. Korridore erfolgen, sind diese Anpassungen reversibel (NACHTWEY ET AL. 2009, S. 224), d. h. der vorangegangene Zustand vor einer Änderung kann wieder eingenommen werden.

Ein weiteres Charakterisierungsmerkmal ergibt sich aus der Art und Weise, wie der eingenommene Zustand, ausgehend von einem vorherigen Zustand, erreicht werden kann. Zum Erlangen eines Zustands außerhalb des definierten Flexibilitätskorridors sind die Kreativität und Intelligenz des Menschen unabdingbar (WESTKÄMPER ET AL. 2000, S. 25). Aus diesem Grund sind Anpassungsmaßnahmen im Rahmen der Wandlungsfähigkeit i. d. R. nicht bekannt und müssen im Zuge des Wandlungsprozesses erarbeitet werden. Anpassungsmaßnahmen der Flexibilität stellen dagegen bekannte, geplante und vorgehaltene Handlungsoptionen dar (WIENDAHL & HERNÁNDEZ 2002, S. 135).

Insbesondere die Kreativität und Intelligenz des Menschen, welche bei der Wandlungsfähigkeit genutzt werden, erlauben es, antizipative Eingriffe in das

Produktionssystem vorzunehmen (WIENDAHL 2002, S. 127) und dieses somit auf sich ändernde Rahmenbedingungen vorzubereiten. Da Anpassungen im Rahmen der Flexibilität auf vorgehaltenen Handlungsoptionen beruhen, ist mithilfe dieser Anpassungsmaßnahmen nur ein rein reaktives Verhalten möglich (WIENDAHL 2002, S. 124).

Es wird auch deutlich, dass im Zuge des Wandlungsprozesses, der i. d. R. auch strukturelle Anpassungen nach sich zieht, ein gewisser Planungs- und ggf. auch Investitionsaufwand von Nöten sind (MÖLLER 2008, S. 20; KLEMKE ET AL. 2012, S. 223). Die Anpassungen im Rahmen der vordefinierten Maßnahmen der Flexibilität können dagegen i. d. R. schnell und aufwandsarm umgesetzt werden (NYHUIS ET AL. 2008, S. 87). Zusammenfassend lassen sich die beiden Begrifflichkeiten nach NYHUIS ET AL. (2008, S. 87) folgendermaßen definieren:

„Flexibilität beschreibt die Fähigkeit [...], sich schnell und nur mit sehr geringem finanziellen Aufwand an geänderte Einflussfaktoren anzupassen.“

„Wandlungsfähigkeit wird als Potential verstanden, auch jenseits der vorgehaltenen Korridore organisatorische und technische Veränderungen bei Bedarf [...] durchführen zu können.“

Da diese beiden Definitionen nicht alle der zuvor erläuterten Charakterisierungsmerkmale von Wandlungsfähigkeit und Flexibilität wiedergeben (können), sind diese in Abbildung 9 zusammenfassend aufgeführt und gegenübergestellt.

Wandlungsfähigkeit		Flexibilität
Erweiterung/Verschieben der Flexibilitätskorridore	↔	Veränderungen innerhalb der Flexibilitätskorridore
Strukturelle Veränderungen	↔	Reversibles Verhalten
Antizipative Anpassungen	↔	Reaktive Anpassungen
Unbekannte Anpassungsmaßnahmen	↔	Bekannte Anpassungsmaßnahmen
Aufwändigere Anpassungsmaßnahmen	↔	Aufwandsarme Anpassungsmaßnahmen

Abbildung 9: Gegenüberstellung von Wandlungsfähigkeit und Flexibilität

2.2.3 Arten der Flexibilität

2.2.3.1 Klassifizierung von Flexibilitätsarten

Aus der Grundüberlegung, dass Flexibilität die Fähigkeit darstellt, sich an Veränderungen anzupassen (ABELE ET AL. 2006, S. 433; REINHART ET AL. 2007, S. 2011), hat sich in der wissenschaftlichen Literatur eine große Anzahl an Flexibilitätsarten entwickelt, welche verschiedene Veränderungsmerkmale fokussieren oder unterschiedliche Betrachtungsumfänge aufweisen. So haben SETHI & SETHI (1990) in einer Literaturstudie über 50 verschiedene Flexibilitätsarten in der Produktion identifizieren können, die sich teilweise nur geringfügig unterscheiden, teilweise aber auch große Unterschiede im Verständnis des Begriffs der Flexibilität aufweisen. Aus diesem Grund stellen TONI & TONCHIA (1998, S. 594) in ihrer Arbeit Klassifizierungen zur Unterscheidung der unterschiedlichen Flexibilitätsarten vor. Demnach lassen sich alle Flexibilitätsarten nach folgenden vier Betrachtungsweisen klassifizieren:

1. Horizontale Betrachtung
2. Vertikale Betrachtung
3. Zeitliche Betrachtung
4. Objektorientierte Betrachtung.

Horizontale Betrachtung

Im Rahmen der horizontalen Betrachtung der Flexibilität wird unterschieden, inwieweit die Flexibilität eines gesamten Unternehmens untersucht wird (TONI & TONCHIA 1998, S. 1594). Neben der Produktion haben auch Unternehmensbereiche außerhalb der Produktion Auswirkungen auf die Flexibilität und müssen ggf. in die Flexibilitätsbetrachtung mit einbezogen werden, wie z. B. der Vertrieb oder die Konstruktion eines Produktes.

Vertikale Betrachtung

Eine weitere Möglichkeit zur Unterscheidung der verschiedenen Flexibilitätsarten stellt die vertikale oder auch hierarchische Betrachtung dar (TONI & TONCHIA 1998, S. 1594). Es kann, wie bereits erwähnt, die Flexibilität von einzelnen Produktionsstationen untersucht werden (SETHI & SETHI 1990, S. 297 ff.), d. h. auf Mikroebene. Darüber hinaus ist aber auch eine makroskopische Betrachtung von Flexibilität möglich. So lässt sich die Flexibilität einer aggregierten Ebene,

wie z. B. der Fabrikebene oder eines Wertschöpfungsnetzes (siehe z. B. SCHELLMANN 2012), betrachten (SETHI & SETHI 1990, S. 301 ff.).

Zeitliche Betrachtung

Wie in Abschnitt 2.2.2 dargestellt, beschreibt die Flexibilität die Fähigkeit, sich schnell an geänderte Einflussfaktoren anzupassen. Somit bietet diese zeitliche Komponente der Flexibilität ein mögliches Unterscheidungskriterium. Je nach geforderter Reaktionsgeschwindigkeit auf geänderte Einflussgrößen kann z. B. zwischen kurzfristiger und langfristiger Flexibilität unterschieden werden (BARAD & SIPPER 1988, S. 237 ff.; TONI & TONCHIA 1998, S. 1594).

Objektorientierte Betrachtung

Die vierte Betrachtungsweise von Flexibilität stellt die objektorientierte dar. Hierbei werden die unterschiedlichen Flexibilitätsarten in Bezug auf die durch die jeweilige Flexibilität beeinflusste Zielgröße bzw. die Lösungsstrategie klassifiziert (TONI & TONCHIA 1998, S. 1594; BEACH ET AL. 2000, S. 45). So ist es z. B. das Ziel eines mengenflexiblen Produktionssystems, wirtschaftlich bei unterschiedlichen Ausbringungsmengen zu agieren. Maschinenflexibilität bezieht sich dagegen auf die verschiedenen Operationen, welche eine Maschine ohne großen Umrüstaufwand vollziehen kann (SETHI & SETHI 1990, S. 298).

2.2.3.2 Beschreibung objektorientierter Flexibilitätsarten

Im deutschsprachigen Raum hat sich vor allem die objektorientierte Betrachtung der verschiedenen Flexibilitätsarten durchgesetzt. Aus diesem Grund wird im Folgenden ein Überblick über ausgewählte, wichtige objektorientierte Flexibilitätsarten gegeben.

Wie bereits erwähnt, gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Flexibilitätsdefinitionen in der wissenschaftlichen Literatur. Einen der ersten Versuche, einheitliche Begriffsdefinitionen zu schaffen, führten BROWNE ET AL. (1984, S. 114 f.) durch. Dabei definieren sie acht objektorientierte Flexibilitätsarten. Auf der Arbeit von BROWNE ET AL. (1984) setzt auch die Literaturstudie von SETHI & SETHI (1990) auf. Sie ergänzen drei weitere Flexibilitätsarten und definieren somit 11 unterschiedliche Flexibilitätsarten. Trotz der Vielzahl an Definitionen unterschiedlicher Flexibilitätsarten anderer Autoren können die Definitionen von SETHI & SETHI (1990) als allgemein anerkannt angesehen werden. In diesem Abschnitt sollen für diese Arbeit die vier Flexibilitätsarten Mengen-, Routen-,

Produkt- und Maschinenflexibilität nach SETHI & SETHI (1990) kurz dargestellt und erläutert werden. Anschließend erfolgt die Vorstellung einer weiteren Flexibilitätsart, der Personaleinsatzflexibilität.

Mengenflexibilität

Unter Mengenflexibilität wird die Fähigkeit eines Produktionssystems verstanden, wirtschaftlich bei unterschiedlichen Ausbringungsmengen zu agieren (SETHI & SETHI 1990, S. 307; BROWNE ET AL. 1984, S. 115). Die Begriffe Volumenflexibilität oder auch Stückzahlflexibilität werden dabei in der deutschsprachigen Literatur i. d. R. synonym verwendet (vgl. z. B. AURICH ET AL. 2003, S. 5; KRÜGER 2004, S. 16 f.; LANZA ET AL. 2009, S. 1040 ff.).

Routenflexibilität

Routenflexibilität beschreibt die Möglichkeit eines Produktionssystems, bestimmte Produkte über alternative Routen durch das System herzustellen (SETHI & SETHI 1990, S. 305), d. h. Produkte auf verschiedenen Maschinen fertigen zu können. Auf diese Weise können Engpässe bei Überlastungen oder Ausfälle von einzelnen Maschinen und Anlagen umgangen werden. Die Routenflexibilität kann aber auch zur Auslastungsoptimierung herangezogen werden (BROWNE ET AL. 1984, S. 114 f.; WEMHÖNER 2006, S. 35; ROSCHER 2007, S. 27).

Produktflexibilität

Produktflexibilität beschreibt die Möglichkeit eines Produktionssystems, verschiedene Produkte fertigen zu können bzw. ein bestehendes Produktionssystem an wechselnde Produkte anzupassen (BROWNE ET AL. 1984, S. 114; AURICH ET AL. 2003, S. 5). Der Begriff ist synonym zur sog. Produktmixflexibilität (HALLER 1999, S. 18; ROGALSKI & OVTCHAROVA 2009, S. 66).

Maschinenflexibilität

Maschinenflexibilität bezieht sich auf die verschiedenen Operationen, welche eine Anlage ohne großen Umrüstaufwand vollziehen kann (SETHI & SETHI 1990, S. 298). Diese Art der Flexibilität ist die Voraussetzung für viele weitere Flexibilitätsarten, wie z. B. die Routenflexibilität, da die Anzahl der möglichen Routen eines Produktes zunimmt, wenn die Anzahl der für die Bearbeitung eines Bauteils zur Verfügung stehenden Maschinen steigt (SETHI & SETHI 1990, S. 298 ff.; WAHAB 1999, S. 3775; KOSTE & MALHOTRA 1999, S. 80 ff.).

Personaleinsatzflexibilität

Die Personaleinsatzflexibilität ist eine Flexibilitätsart, welche weder von SETHI & SETHI (1990) noch von BROWNE ET AL. (1984) definiert wurde. Allerdings spielt die Fähigkeit, das Personal eines Produktionssystems flexibel einzusetzen, bei der Umsetzung der anderen Flexibilitätsarten, wie z. B. der Produkt- oder Routenflexibilität, eine entscheidende Rolle (KOSTE & MALHOTRA 1999, S. 81 f.). Personaleinsatzflexibilität wird daher von anderen Autoren als eigene Flexibilitätsart definiert (vgl. z. B. KOSTE & MALHOTRA 1999). Im Rahmen dieser Arbeit soll unter Personaleinsatzflexibilität sowohl die Fähigkeit verstanden werden, Personal an verschiedenen Arbeitsplätzen einsetzen zu können, als auch die Möglichkeit, Arbeitszeiten variabel gestalten zu können.

2.3 Dimensionen der Flexibilität

2.3.1 Allgemeines

In der Forschungsgemeinschaft herrscht Einigkeit darüber, dass Flexibilität ein mehrdimensionales Konzept ist (SETHI & SETHI 1990, S. 289; SHEWCHUK & MOODIE 1998, S. 336; SOUZA & WILLIAMS 2000, S. 578). Dabei weist Flexibilität nach SLACK (1983, S. 8) folgende drei Dimensionen³ auf, welche zusammen das Maß an Flexibilität eines Systems festlegen:

- Zustandsdimension
- Zeitdimension
- Kostendimension

Die Zustandsdimension gibt an, wie viele unterschiedliche Zustände ein System einnehmen kann (SLACK 1983, S. 8). Dabei gilt, je größer der Raum der möglichen Zustände ist, desto flexibler ist das System (SHEWCHUK & MOODIE 1998, S. 336). Die Zeit- und Kostendimension beschreiben dagegen, mit welchem Aufwand sich ein Wechsel zwischen diesen Zuständen vollziehen lässt. Der Aufwand kann dabei zum einen zeitbezogen sein, d. h. je schneller ein System diese Zustandswechsel durchführen kann, desto flexibler ist es (UPTON 1994,

³ Einzelne Autoren wie z. B. KOSTE & MALHOTRA (1999) oder CHOU ET AL. (2010) definieren eine andere Anzahl an Dimensionen. Hierbei werden meist die Kosten- und Zeitdimension zusammengefasst und dafür ggf. die Zustandsdimension weiter detailliert. Da sich letztendlich aber alle Dimensionen anderer Autoren auf die drei von SLACK (1983) zurückführen lassen, soll im Rahmen dieser Arbeit auf diesen Dimensionen aufgebaut werden.

S. 80; GUPTA & BUZACOTT 1996, S. 235). Zum anderen entstehen durch Zustandswechsel Kosten, d. h. ein System ist flexibler, wenn die Zustandswechsel günstiger vollzogen werden können (SLACK 1983, S. 7). Die aufgeführten Dimensionen lassen sich auch in der in Abschnitt 2.2.2 gegebenen allgemeinen Flexibilitätsdefinition nach NYHUIS ET AL. (2008, S. 87) erkennen:

„Flexibilität beschreibt die Fähigkeit (**Zustandsdimension**) [...], sich *schnell* (**Zeitdimension**) und nur mit sehr geringem *finanziellen Aufwand* (**Kostendimension**) an geänderte Einflussfaktoren anzupassen.“

In den folgenden Abschnitten sollen die einzelnen drei Dimensionen der Flexibilität näher betrachtet und erläutert werden. Da sie zusammen das Maß an Flexibilität eines Systems festlegen, sind ein klares Verständnis sowie eine Berücksichtigung der drei Dimensionen bei der Bewertung von Flexibilität erforderlich.

2.3.2 Zustandsdimension

Die Zustandsdimension gibt an, wie stark sich ein System an geänderte Rahmenbedingungen anpassen kann bzw. wie viele verschiedene Zustände einem System hierfür zur Verfügung stehen (SLACK 1983, S. 7). Dabei hängt die Zustandsdefinition stark vom betrachteten Objekt bzw. von der untersuchten Flexibilitätsart ab. So werden z. B. bei Mengenflexibilität die Zustände des Produktionssystems betrachtet, bei welchen es wirtschaftlich unterschiedliche Stückzahlen produzieren kann. Bei Maschinenflexibilität sind dagegen die Anzahl der Zustände interessant, innerhalb derer eine Anlage verschiedene Operationen durchführen kann.

Wie bereits in Abschnitt 2.2.2 erläutert, befinden sich die im Rahmen der Flexibilität möglichen Zustände innerhalb bestimmter Grenzen. Aus dieser Überlegung heraus hat sich die Darstellung des Zustandsraums, d. h. der Menge aller möglichen Zustände, in Korridoren entwickelt (vgl. hierzu WIENDAHL & BREITHAUPT 1998; GOTTSCHALK 2006; SCHELLMANN 2012) Diese Darstellungsform findet insbesondere bei der Visualisierung von Mengenflexibilität Anwendung, wie in Abbildung 10 dargestellt.

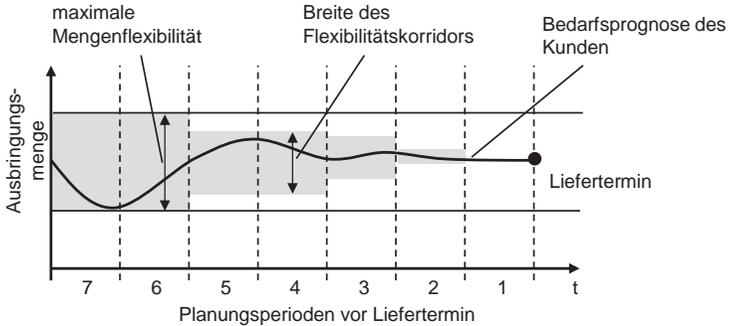


Abbildung 10: Darstellung von Flexibilitätskorridoren nach SCHELLMANN (2012)

Die Abbildung zeigt, wie sich die Mengenflexibilität eines Systems in Abhängigkeit des nahenden Liefertermins stetig verringert. Durch die Darstellung der möglichen Zustände in Form von Korridoren ist die sinkende Flexibilität einfach zu erkennen.

2.3.3 Zeitdimension

Wie bereits erwähnt, ist jenes System flexibler, welches schneller zwischen zwei verschiedenen Zuständen wechseln kann (SLACK 1983, S. 7). Diese Zeitspanne lässt sich, wie in Abbildung 11 dargestellt, weiter spezifizieren. Hierfür wird der Zeitraum ab Eintreten einer Veränderung des Umfeldes bis zum Umsetzen einer Maßnahme als Reaktion auf diese Umfeldsänderung betrachtet und in mehrere Zeitabschnitte eingeteilt.

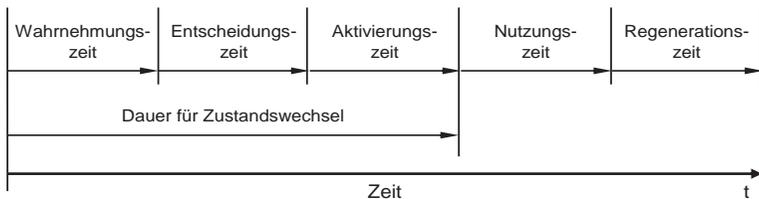


Abbildung 11: Elemente der Zeitdimension in Anlehnung an SCHELLMANN (2012, S. 93) und HERNÁNDEZ (2002, S. 49)

Demnach vergeht eine gewisse Zeitspanne ab Eintreten einer Veränderung des Umfeldes, bis diese Veränderung wahrgenommen wird (HERNÁNDEZ 2002, S. 48 f.). Anschließend muss im Rahmen eines Planungs- und Entscheidungsprozesses geprüft werden, ob und wodurch eine Anpassung an die neuen Umfeldbedingungen, d. h. ein Zustandswechsel, erfolgen soll (HERNÁNDEZ 2002, S. 48 f.). Hierbei ist insbesondere eine Auswahl der wirtschaftlichsten Alternative aus einer Sammlung möglicher Anpassungsmaßnahmen zu treffen. Nachdem diese Entscheidung über die Umsetzung einer bestimmten Maßnahme getroffen wurde, kann mit der Aktivierung dieser Maßnahme begonnen werden. Dabei vergeht eine gewisse Zeit, die sogenannte Aktivierungszeit, bis die Maßnahme ihre Wirkung entfaltet, weil Maschinen beispielsweise erst umgerüstet werden müssen, um auf die Änderungen des Umfeldes reagieren zu können. Anschließend kann die Maßnahme genutzt werden. Nach GOTTSCHALK (2006, S. 65 f.) sind Maßnahmen allerdings zeitlich nicht unbegrenzt nutzbar, sondern es existieren untere und obere Zeitgrenzen für Maßnahmen, welche zu einer minimalen und maximalen Nutzungs- bzw. Haltedauer der Maßnahme führen. So können beispielsweise wöchentliche Arbeitszeiten aufgrund gesetzlicher Regelungen nicht beliebig verlängert werden und begrenzen so die maximale Nutzungs- bzw. Haltedauer dieser Maßnahme. Nach SCHELLMANN (2012, S. 92) vergeht darüber hinaus eine gewisse Zeitspanne, bis eine Maßnahme nach ihrer Nutzung wieder aktiviert werden kann, die sog. Regenerationszeit.

Die von GOTTSCHALK (2006) und SCHELLMANN (2012) für die Flexibilitätsbewertung eingeführte Nutzungszeit bzw. Regenerationszeit haben insbesondere Einfluss auf die Aktivierungszeit. Ist kurz nach einem Zustandswechsel ein weiterer Wechsel zu vollziehen, so kann sich u. U. die Aktivierungszeit verlängern. Da z. B. die minimale Nutzungsdauer einer Maßnahme noch nicht verstrichen bzw. die Regenerationszeit noch nicht abgelaufen sind, steht die Maßnahme noch nicht wieder zur Verfügung. Erst nach diesen beiden Zeitspannen kann die Maßnahme wieder aktiviert werden. Die Nutzungs- bzw. Regenerationszeit sind somit als Ergänzung zu den Überlegungen von SLACK (1983) zu sehen, wonach das System flexibler ist, welches schneller zwischen zwei verschiedenen Zuständen wechseln kann.

2.3.4 Kostendimension

Durch Flexibilität entstehen Kosten. Hierbei ist nach SLACK (1983, S. 7) zwischen den Kosten zu unterscheiden, welche durch das Vorhalten der Flexibilität

entstehen und den Kosten, welche durch die Nutzung der Flexibilität verursacht werden.

Zum Aufbau eines flexiblen Systems können höhere Investitionskosten nötig sein als bei der Errichtung eines nicht flexiblen Systems. So ist z. B. ein Bearbeitungszentrum flexibler als eine einfache Drehmaschine, da es mehrere verschiedene Operationen (Drehen, Fräsen usw.) durchführen kann. Allerdings sind die Investitionskosten für eine solche Maschine u. U. höher, d. h. die größeren Investitionskosten können als Kosten zur Erhöhung der Flexibilität des Produktionssystems angesehen werden. Darüber hinaus entstehen aber auch im laufenden Betrieb Kosten für das Vorhalten von Flexibilität. Beispiele hierfür sind nach ROGALSKI (2009, S. 33) Kosten für zeitweise nicht benötigte Ressourcen (Material, Personal und Betriebsmittel) oder Kosten für die Erstellung von Alternativplänen.

In der wissenschaftlichen Literatur ist dabei umstritten, inwieweit diese Kosten in die Bewertung von Flexibilität (siehe Abschnitt 2.4) einfließen müssen. SLACK (1983, S. 7) und GUPTA & GOYAL (1989, S. 126) sind der Meinung, dass zwei Systeme, welche eine identische Anzahl an möglichen Zuständen aufweisen und zwischen den Zuständen gleich schnell und günstig wechseln können, als gleich flexibel anzusehen sind. Unabhängig davon ist, ob bei dem einen System höhere Investitionskosten zur Einrichtung der Flexibilität nötig waren als bei dem anderen System. Im Rahmen dieser Arbeit soll der Argumentation von SLACK (1983, S. 7) und GUPTA & GOYAL (1989, S. 126) gefolgt werden.

Klarheit herrscht dagegen in der Literatur darüber, dass durch die Zustandswechsel selbst Kosten entstehen. So sind z. B. Rüstvorgänge oder neue Programmierungen der Anlagen von Nöten, wodurch Kosten entstehen (DAS 1996, S. 81). Des Weiteren sind durch die Zustandswechsel u. U. Performanceverluste zu erwarten, z. B. durch Stillstandzeiten, welche ebenfalls als Kosten für Zustandswechsel angesehen werden können (DAS 1996, S. 69).

Abschließend bleibt festzuhalten, dass viele Autoren auf einen engen Zusammenhang der Kosten- und der Zeitdimension hinweisen (vgl. hierzu z. B. SLACK 1983, S. 7; UPTON 1994, S. 80). Aus diesem Grund fasst UPTON (1994) diese beiden Dimensionen der Flexibilität zu einem Element zusammen, der Mobilität. Die Mobilität stellt demnach das Maß dar, wie einfach ein Zustandswechsel durchgeführt werden kann. Hierbei können als Maß für die Mobilität entweder die Kosten oder die Dauer eines Zustandswechsels herangezogen werden, abhängig davon, welche Größe einfacher zu erfassen ist.

2.4 Bewertung von Flexibilität

2.4.1 Motivation

Wie bereits in Abschnitt 2.2 dargelegt, ermöglicht es Flexibilität auf Unsicherheiten des turbulenten Umfelds reagieren zu können. Auf diese Weise können die Wirtschaftlichkeit und vor allem die Wettbewerbsfähigkeit von produzierenden Unternehmen erhalten werden.

Allerdings entstehen durch das Vorhalten und Nutzen von Flexibilität Kosten (vgl. hierzu Abschnitt 2.3). Dies führt dazu, dass unnötige Flexibilität die Wirtschaftlichkeit des Unternehmens negativ beeinflusst (ABELE ET AL. 2008, S. 322). Andererseits mindert ein zu unflexibles Produktionssystem die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens. Darum ist stets ein Gleichgewicht zwischen Flexibilitätsbedarf, resultierend aus dem turbulenten Umfeld, und Flexibilität (-angebot) des Produktionssystems anzustreben (NEWMAN ET AL. 1993, S. 22; ZÄH ET AL. 2006). Diesen Sachverhalt verdeutlicht Abbildung 12.

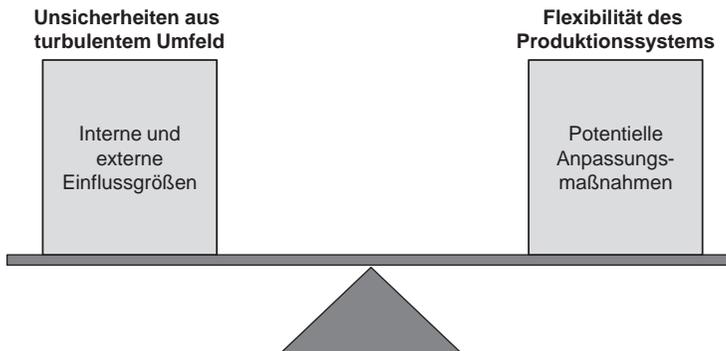


Abbildung 12: Gleichgewicht von Flexibilität und Flexibilitätsbedarf in Anlehnung an NEWMAN ET AL. (1993, S. 25) und ZÄH ET AL. (2006)

Um das richtige Maß an Flexibilität in Abhängigkeit des turbulenten Umfelds erreichen zu können, ist es daher nötig, Flexibilität bewerten zu können.

2.4.2 Klassifizierung möglicher Bewertungsverfahren

Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, muss Flexibilität bewertet werden, um das richtige Maß an Flexibilität in Abhängigkeit des turbulenten Umfelds erreichen zu können. Allerdings hat sich in der wissenschaftlichen Literatur bisher noch kein einheitliches Vorgehen zur Bewertung von Flexibilität etabliert (ABELE ET AL. 2008, S. 322; ROGALSKI & OVTCHAROVA 2009, S. 64). Vielmehr existieren ebenso viele unterschiedliche Ansätze zur Bewertung von Flexibilität wie es Flexibilitätsarten gibt (vgl. Abschnitt 2.2.3). Die Ursache hierfür liegt vor allem darin, dass Flexibilität ein „komplexes, mehrdimensionales und schwer zu fassendes Konzept“ (SETHI & SETHI 1990, S. 289) ist. Hierbei macht es insbesondere die bereits in Abschnitt 2.3 dargelegte Mehrdimensionalität der Flexibilität schwierig, einheitliche Kennzahlen und Messgrößen zu identifizieren (COX 1989; GUPTA & GOYAL 1989, S. 134).

Aus diesem Grund bieten TONI & TONCHIA (1998, S. 1605) in ihrer Arbeit ein Schema – dargestellt in Abbildung 13 – zur Klassifizierung von Flexibilitätsbewertungsverfahren an.

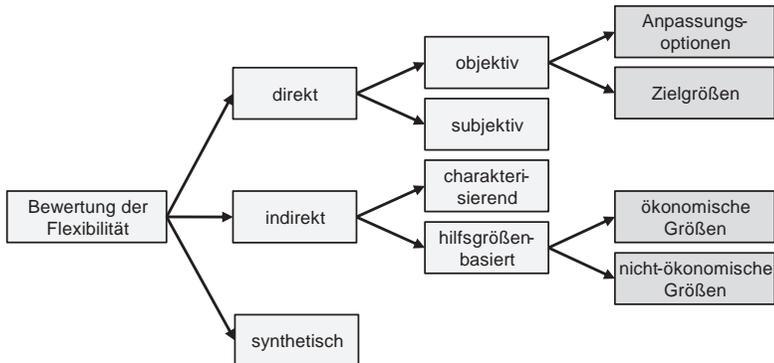


Abbildung 13: Klassifizierungsschema für Vorgehen zur Bewertung von Flexibilität nach TONI & TONCHIA (1998, S. 1605)

Grundsätzlich kann bei der Bewertung von Flexibilität zwischen drei Vorgehen unterschieden werden, den direkten, den indirekten und den synthetischen Verfahren. Im Rahmen der direkten Verfahren wird die Flexibilität des Systems mithilfe von objektiven oder subjektiven Ansätzen direkt gemessen. Da sich die Flexibilität eines Systems aus dessen Anpassungsoptionen ergibt, besteht eine Möglichkeit zur direkten und objektiven Bewertung der Flexibilität in der Ermitt-

lung der Summe dieser Anpassungsoptionen bzw. -maßnahmen. So stellt z. B. die Anzahl der möglichen alternativen Routen eines Produktes durch das Produktionssystem ein Maß für die Routenflexibilität dar (SETHI & SETHI 1990, S. 307). Eine andere Möglichkeit, die Flexibilität eines Systems objektiv zu messen, besteht in der direkten Aufnahme der Zielgröße der zu untersuchenden Flexibilitätart. So stellt z. B. die produzierte Stückzahl innerhalb einer Periode die Zielgröße dar, die es im Rahmen der Mengenflexibilität zu beeinflussen gilt. Dabei lassen sich die Schwankungen der produzierten Stückzahlen eines Produktionssystems für vergangene Perioden einfach erfassen und sich hieraus Aussagen bzgl. der Mengenflexibilität ableiten. Im Rahmen einer subjektiven Bewertung erfolgt die Messung der Flexibilität durch Einschätzungen von Experten.

Da Flexibilität ein schwer messbares Konzept ist, existieren darüber hinaus Ansätze, welche über indirekte Verfahren versuchen, Flexibilität zu bewerten. Hierbei können sowohl ökonomische als auch nicht-ökonomische Hilfsgrößen zur Bewertung herangezogen werden, da diese u. U. einfacher zu erfassen sind als die direkte Zielgröße. So können als mögliche Hilfsgrößen z. B. Rüstzeiten erfasst werden und mithilfe dieser die Produktflexibilität bewertet werden. Je schneller nämlich ein Produktionssystem umgerüstet werden kann, desto höher ist dessen Produktflexibilität (BROWNE ET AL. 1984, S. 114). Im Rahmen einer charakterisierenden Bewertung wird das betrachtete System beschrieben, um so eine Bewertung der Flexibilität vorzunehmen. So lassen sich z. B. durch Beschreibung der eingesetzten Betriebsmittel in einem Produktionssystem Aussagen bzgl. einzelner Flexibilitätarten treffen. Ein Produktionssystem, in welchem die einzelnen Maschinen und Anlagen fest verkettet sind, weist so z. B. eine geringere Routenflexibilität auf, als wenn der Materialfluss z. B. durch den Einsatz von Gabelstaplern vollzogen wird.

Die synthetische Bewertung der Flexibilität stellt eine Kombination von direkten und indirekten Verfahren dar. Dies ermöglicht die Erstellung einzelner aggregierter Indikatoren für Flexibilität, indem unterschiedliche Aspekte einer Flexibilitätart berücksichtigt werden (TONI & TONCHIA 1998, S. 1607).

Das präsentierte Klassifizierungsschema für Vorgehen zur Bewertung von Flexibilität nach TONI & TONCHIA (1998, S. 1605) macht deutlich, dass es keinen Standard zur Bewertung von Flexibilität gibt. Vielmehr wird für jede neue Bewertungsaufgabe ein neues Bewertungsverfahren entwickelt. Aus diesem Grund soll hier auf die Darstellung unterschiedlichster Verfahren verzichtet werden.

2.5 Energieflexibilität

2.5.1 Allgemeines

In der wissenschaftlichen Literatur besteht derzeit noch kein einheitliches Verständnis von Energieflexibilität. Aus diesem Grund soll in Abschnitt 2.5.2 der Begriff der Energieflexibilität erläutert werden. Darüber hinaus werden in Abschnitt 2.5.3 mögliche Preismodelle dargestellt, welche energieflexibles Verhalten produzierender Unternehmen entlohnen, d. h. Kosteneinsparungspotentiale bieten. Anhand dieser Preismodelle sowie den in Abschnitt 2.2.2 identifizierten Charakterisierungsmerkmalen soll in Abschnitt 2.5.4 untersucht werden, inwieweit es sich bei Energieflexibilität um eine eigene Flexibilitätsart handelt. Abschließend wird in Abschnitt 2.5.5 diskutiert, wie die Dimensionen von Flexibilität bei der Bewertung der Energieflexibilität zu berücksichtigen sind.

2.5.2 Begriffsdefinition

Der Begriff der Energieflexibilität als eigene Flexibilitätsart hat sich in der wissenschaftlichen Gemeinschaft noch nicht endgültig etabliert. Nichtsdestotrotz erkannten eine Vielzahl von Autoren unterschiedlichster Fachrichtungen den Bedarf an Fabriken, die ihren Energiebedarf flexibel anpassen können, und haben in Folge dessen Untersuchungen hierzu angestellt (siehe Abschnitt 3). Allerdings haben bisher nur sehr wenige Autoren diese Flexibilität in einen Zusammenhang zu etablierten Flexibilitätsarten gestellt bzw. eine entsprechende Einordnung vorgenommen. Als eine der ersten Arbeiten hierzu kann die von REINHART ET AL. (2012B) angesehen werden. Die Autoren definieren erstmals den Begriff der Energieflexibilität, aufbauend auf der allgemeine Flexibilitätsdefinition, wie folgt (REINHART ET AL. 2012B, S. 623):

„Energieflexibilität [ist] die Fähigkeit [...], sich schnell und mit sehr geringem finanziellen Aufwand an Änderungen des Energiemarktes anzupassen.“

Die genannte Fähigkeit lässt sich dabei anhand folgender Abbildung 14 näher erläutern (für ähnliche Darstellung vgl. z. B. LORENZ ET AL. (2012)).

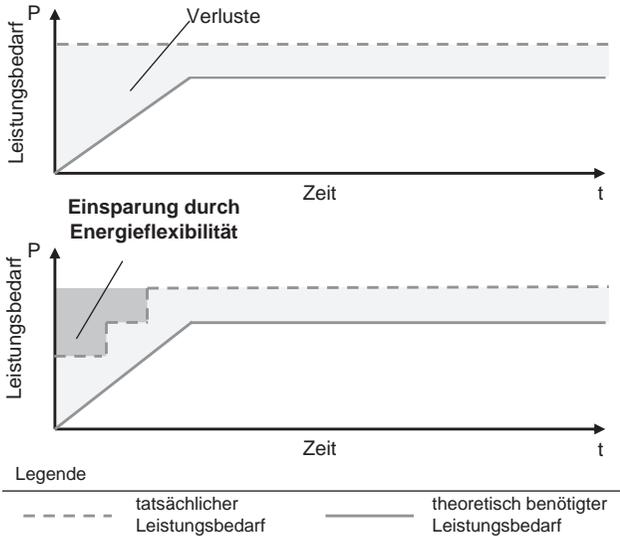


Abbildung 14: Erläuterung von Energieflexibilität in Anlehnung an MÜLLER ET AL. (2009, S. 146)

In Abbildung 14 ist ein theoretisch benötigter Leistungsbedarf einer Produktionsstation oder eines gesamten Produktionssystems dargestellt, d. h. der Leistungsbedarf, der zur Erfüllung einer Produktionsaufgabe theoretisch nötig ist. Er kann somit als Zielfunktion betrachtet werden. Darüber ist der tatsächliche auftretende Leistungsbedarf des Systems eingetragen. Die Abweichung der beiden Kurven kann dabei als Verlust (i. d. R. in Form höherer Energiekosten) angesehen werden.

In der Abbildung ist ein weiteres System dargestellt, das einen unterschiedlichen tatsächlichen Leistungsbedarf bei gleicher Zielfunktion aufweist. Das betrachtete System im zweiten Diagramm zeigt dabei energieflexibles Verhalten, wodurch eine stärkere Annäherung des tatsächlichen an den theoretisch benötigten Leistungsbedarf möglich ist. Auf diese Weise lassen sich die Verluste gegenüber dem nicht flexiblen System reduzieren. Energieflexibilität kann somit auch als Fähigkeit eines Systems verstanden werden, seinen Energiebedarf an eine Zielfunktion anzupassen.

Damit Energieflexibilität für produzierende Unternehmen wirtschaftlich bzw. lohnenswert ist, müssen den Unternehmen Möglichkeiten des Strombezugs ge-

schaffen werden, welche energieflexibles Verhalten entlohnen. Aus diesem Grund erfolgt im nächsten Abschnitt die Erläuterung möglicher variabler Strompreismodelle.

2.5.3 Mögliche Preismodelle zur Integration von energieflexiblen Fabriken in den Energiemarkt

2.5.3.1 Allgemeines

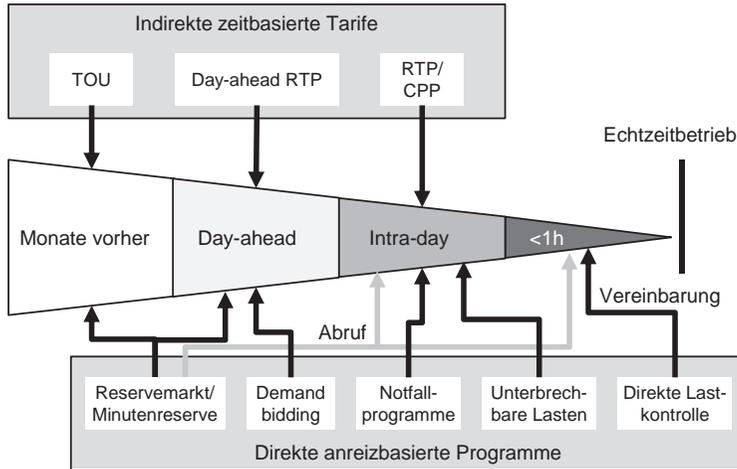
In Deutschland regelt das Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG) die Rahmenbedingungen für die Versorgung von Verbrauchern mit Gas und elektrischer Energie. Dabei schreibt § 40 Abs. 5 des EnWG vor, dass *„Lieferanten [...] für Letztverbraucher von Elektrizität einen Tarif anzubieten [haben], der einen Anreiz zu Energieeinsparung oder Steuerung des Energieverbrauchs setzt. Tarife im Sinne von Satz 1 sind insbesondere lastvariable oder tageszeitabhängige Tarife.“*

Insbesondere im Ausland wurden bereits einige Untersuchungen zur Ausgestaltung von Tarifen durchgeführt, die einen Anreiz zur Steuerung des Energieverbrauches bzw. für energieflexibles Verhalten bieten (vgl. hierzu z. B. TORRITI ET AL. 2009). Diese Untersuchungen lassen sich unter dem Begriff des Demand Response (DR) subsumieren. DR ist nach DOE (2006, S. 6) folgendermaßen definiert:

„Changes in electric usage by end-use customers from their normal consumption patterns in response to changes in the price of electricity over time, or to incentive payments designed to induce lower electricity use at times of high wholesale market prices or when system reliability is jeopardized.“

Die Definition macht deutlich, dass DR die Summe aller Aktivitäten ist, die eine kurzfristige und planbare Veränderung des Leistungsbedarfs des Verbrauchers aus Energieversorgersicht zur Folge haben (ALBADI & SAADANY 2008, S. 1990). Aus Verbrauchersicht bzw. aus Sicht des produzierenden Unternehmens muss aber erst die Flexibilität in Bezug auf die Anpassbarkeit des Energiebedarfs bestehen, um im Rahmen des DR für den Energieversorger nutzbar zu sein. Energieflexibilität stellt somit die Sicht des Verbrauchers bzw. des produzierenden Unternehmens auf die Problemstellung dar und ist damit die Grundlage für DR.

Die Instrumente des DR lassen sich in zwei Gruppen unterteilen, in die indirekten zeitbasierten Tarife und die direkten anreizbasierten Programme (DOE 2006, S. 9; ALBADI & SAADANY 2008, S. 1990)⁴. Die einzelnen Instrumente lassen sich darüber hinaus hinsichtlich der geforderten Reaktionszeit des Verbrauchers bzw. der Vorankündigungszeit des Strompreises untergliedern. Abbildung 15 gibt einen Überblick nach DOE (2006, S. 15) über die einzelnen möglichen DR Instrumente unter Berücksichtigung dieser Unterscheidungskriterien.



TOU: Time of Use-Tarif
RTP: Real Time Pricing
CPP: Critical Peak Pricing

Abbildung 15: Übersicht über mögliche Demand Response Instrumente nach DOE (2006, S. 15)

Die einzelnen in Abbildung 15 aufgeführten Instrumente sollen in den folgenden beiden Abschnitten nun näher erläutert werden.

2.5.3.2 Zeitbasierte Tarife

Im Rahmen der zeitbasierten Tarife wird versucht, das Verhalten und damit den Energiebedarf der Verbraucher indirekt durch einen variablen Arbeits- und/oder

⁴ An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass in Deutschland eine Entflechtung von Energieerzeuger, Netzbetreiber und Energieversorger gesetzlich vorgeschrieben ist (vgl. EnWG Teil 2). Dies hat zur Folge, dass die einzelnen Instrumente teilweise von unterschiedlichen Akteuren umgesetzt werden.

Leistungspreis⁵ zu beeinflussen (NABE ET AL. 2009, S. 41). Hierbei wird zwischen drei verschiedenen Tarifmodellen unterschieden, den Tarifen des Time of Use (TOU), des Critical Peak Pricing (CPP) und des Real-Time-Pricing (RTP).

TOU

Time of Use-Tarife weisen unterschiedliche Preisniveaus für bestimmte Zeiträume innerhalb eines Tages auf (SAINI 2004, S. 53) und sind meist für einen längeren Zeitraum im Voraus fixiert (DOE 2006, S. 9). Ein einfaches Beispiel eines TOU-Tarifs stellt ein Stromtarif mit Hochtarif- und Niedertarifzeiten (HT, NT) dar. Der Vorteil von TOU-Tarifen besteht in der geringen Komplexität dieser Tarifmodelle, allerdings lassen sich durch sie keine kurzfristigen Ereignisse im Netz ausgleichen (KLOBASA 2009, S. 100).

CPP

Critical Peak Pricing-Tarife stellen eine Erweiterung der TOU-Tarife dar (DOE 2006, S. 16; FARUQUI ET AL. 2011, S. 44). Wie bereits erwähnt, besteht der Nachteil der TOU-Tarife darin, dass sich durch sie keine kurzfristigen Ereignisse im Netz ausgleichen lassen. Aus diesem Grund werden die TOU- bei CPP-Tarifen mit einer Eventpreisstufe erweitert. Diese Preisstufe überschreitet die Preisstufen, die an regulären Tagen gelten, i. d. R. deutlich und tritt bei außergewöhnlichen Tagen (Events) mit einer gewissen Vorankündigungszeit in Kraft (NABE ET AL. 2009, S. 45). Die Vorankündigungszeit beträgt i. d. R. einen Tag (FARUQUI & SERGICI 2013, S. 3). Auf diese Weise kann auch auf kurzfristige Ereignisse im Netz reagiert werden, wobei die Anzahl der Zeiträume der Eventpreisstufe meist vertraglich limitiert ist.

RTP

Die dritte Kategorie der zeitbasierten Tarife stellt das sog. Real Time Pricing dar. Im Rahmen des RTP werden dem Verbraucher i. d. R. stündlich schwankende Preise am Vortag bzw. wenige Stunden vor Abnahme des Stroms zur Verfügung gestellt (SAINI 2004, S. 53; VON ROON & GROBMAIER 2010, S. 23). Die Preise des RTP spiegeln dabei die Kosten der Stromerzeugung zu diesem Zeitpunkt wider (DOE 2006, S. 9; FARUQUI & SERGICI 2013, S. 3).

⁵ Der Arbeitspreis bezieht sich auf die verrichtete Arbeit, d. h. die gelieferte Energiemenge, während der Leistungspreis die bezogene Leistung in Rechnung stellt.

2.5.3.3 Anreizorientierte Programme

Im Gegensatz zu den zeitbasierten Tarifen bekommen bei anreizorientierten Programmen die Verbraucher, welche ihren Energiebedarf anpassen, die Leistungs- und/oder Energieanpassung direkt vergütet. Eine grundsätzliche Anpassung des Arbeitspreises erfolgt dabei nicht (NABE ET AL. 2009, S. 41). Die unterschiedlichen anreizbasierten Programme sollen nun im Folgenden kurz erläutert werden.

Reservemärkte

In Deutschland ist nach § 13 Abs. 1 des EnWG der Netzbetreiber für die „Sicherheit oder Zuverlässigkeit des Elektrizitätsversorgungssystems“, d. h. für die Netzstabilität verantwortlich. Bei Zeiten zu niedriger oder zu hoher Last stehen dem Netzbetreiber hierfür Kapazitäten zur Verfügung, welche dieser zur Ausregelung des Netzes nutzen kann, die sog. Regelennergien. Es werden drei Arten von Regelennergien klassifiziert, die

- Primärregelleistung,
- Sekundärregelleistung und
- Minutenreserve bzw. Tertiärregelleistung

(REGELLEISTUNG 2013). Die drei Regelennergiearten unterscheiden sich dabei hinsichtlich ihrer geforderten Reaktionszeit, der Dauer der Lastverschiebung sowie der zu verschiebenden Energiemengen. Im Rahmen der Minutenreserve muss z. B. die Zu- oder Abschaltung der Last in Höhe von mindestens 5 MW innerhalb von 15 Minuten erfolgen und für maximal 4 Stunden aufrechterhalten werden (REGELLEISTUNG 2013).

Alle Regelennergien werden in Deutschland auf der Internetseite *regelleistung.net* gehandelt, auf der Anbieter für den Folgetag ihre regelbaren Lasten anbieten. Erhält ein Anbieter den Zuschlag für sein Gebot, so bekommt dieser je nach Gebotspreis eine Vergütung für die Vorhaltung der Last und bei Inanspruchnahme der Regelleistung durch den Netzbetreiber einen Arbeitspreis für die verschobene Energiemenge vergütet (REGELLEISTUNG 2013).

Demand Bidding

Verbraucher geben beim Demand Bidding ein Gebot für zu- oder abschaltbare Lasten auf Strombörsen ab (DOE 2006, S. 9; STRBAC 2008, S. 4424; VON ROON & GROBMAIER 2010, S. 23).

Notfallprogramme

Im Rahmen von Notfallprogrammen bekommen Verbraucher, die ihre Last bei einem kurzfristigen Ereignis im Netz verschieben, eine Vergütung (DOE 2006, S. 16). Notfallprogramme stellen keine Kapazitätsreserve dar, daher erfolgt hier im Gegensatz zu den Reservemärkten keine Vergütung für die Vorhaltung der zu- oder abschaltbaren Lasten (KLOBASA 2009, S. 103). Verbraucher haben im Gegensatz zu der unterbrechbaren Laststeuerung auch keine Strafzahlungen zu leisten, wenn sie im Bedarfsfall ihre Lasten nicht verschieben (MOGHADDAM ET AL. 2011, S. 3258).

Unterbrechbare Lasten

Unterbrechbare Lasten sind i. d. R. ein Teil des Stromvertrages. Hierbei werden dem Verbraucher Anreize in Form von z. B. günstigeren Strombezugskosten gewährt, wenn er seine Kapazitäten, Lasten abzuschalten, verpflichtend zur Verfügung stellt (KLOBASA 2009, S. 103). Kommt ein Verbraucher im Rahmen der unterbrechbaren Laststeuerung seiner Pflicht, im Bedarfsfalls Lasten zu verschieben, nicht nach, so hat er Strafzahlungen zu leisten (MOGHADDAM ET AL. 2011, S. 3258)

Direkte Lastkontrolle

Bei der direkten Lastkontrolle erhält ein Programmverantwortlicher (i. d. R. der Netzbetreiber) die Möglichkeit, einzelne elektrische Verbraucher fernzusteuern und im Bedarfsfall abzuschalten (DOE 2006, S. 9; STRBAC 2008, S. 4424). Der Teilnehmer an der direkten Lastkontrolle erhält hierfür eine Rückvergütung. Da das Eingreifen des Netzbetreibers in Produktionsprozesse kaum realisierbar ist, zielt das direkte Lastmanagement hauptsächlich auf Haushalte und private Verbraucher ab (VON ROON & GROBMAIER 2010, S. 23).

2.5.4 Charakterisierung von Energieflexibilität

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt mögliche Preismodelle dargestellt wurden, welche energieflexibles Verhalten produzierender Unternehmen entlohnen, soll nun im Rahmen dieses Abschnittes geprüft werden, ob Energieflexibilität eine eigene Flexibilitätsart im Sinne der in Abschnitt 2.2.3 vorgestellten Arten ist. Hierfür erfolgt eine Beschreibung, wie energieflexible Fabriken auf die sich aus den Strompreismodellen ergebenden Unsicherheiten reagieren müssen. Dabei soll geprüft werden, ob das Verhalten energieflexibler Fabriken den identifizier-

ten allgemeinen Charakterisierungsmerkmalen der Flexibilität aus Abschnitt 2.2.2 entspricht und Energieflexibilität somit eine eigene Flexibilitätsart darstellt.

Reaktive Anpassung

Mit Ausnahme der TOU-Tarife weisen alle DR-Instrumente unvorhergesehene Preisschwankungen auf. Es ist somit für produzierende Unternehmen nicht möglich, sich proaktiv auf Preisänderungen einzustellen. Anpassungen erfolgen daher immer reaktiv auf die unterschiedlichen Vorankündigungszeiten der jeweils gültigen Preise. Daher ist das Charakterisierungsmerkmal der reaktiven Anpassung erfüllt.

Bekannte Anpassungsmaßnahmen

Die Einteilung der einzelnen DR-Instrumente hinsichtlich ihrer Vorankündigungszeit in Abbildung 15 macht deutlich, dass bei fast allen DR-Instrumenten eine Anpassungsreaktion innerhalb von maximal 24 Stunden erfolgen muss. Für Unternehmen bedeutet dies, dass sie auf bekannte Maßnahmen zur Anpassung ihres Energiebedarfs zurückgreifen müssen, da die Identifikation und Umsetzung neuer Maßnahmen zu zeitaufwändig wären.

Aufwandsarme Anpassungsmaßnahmen

Die kurzen Vorankündigungszeiten von maximal 24 Stunden bis minimal <1 Stunde führen dazu, dass Anpassungsmaßnahmen aufwandsarm, d. h. schnell umgesetzt werden müssen. Um überhaupt von Energiepreisschwankungen profitieren zu können, müssen zudem die Kosten der Anpassungsmaßnahmen niedriger sein als die Einsparung durch die günstigeren Energiepreise.

Veränderungen innerhalb der Flexibilitätskorridore

Da jedes Unternehmen einen maximalen bzw. minimalen Leistungsbedarf aufweist – der sich aus der Summe der Maximal- bzw. Minimalleistungen aller Verbraucher ergibt – ist der Energieflexibilitätskorridor, innerhalb dessen sich der Leistungsbedarf des Produktionssystems verändern lässt, klar vorgegeben.

Reversibles Verhalten

Da bei Anpassungen des Energiebedarfs der Energieflexibilitätskorridor nicht verlassen wird, ist ein reversibles Verhalten gegeben. Dies bedeutet, dass ein vormals eingenommenes Leistungsbedarfsniveau wieder erzielt werden kann.

Nach Überprüfung der fünf Charakterisierungsmerkmale der Flexibilität anhand des Verhaltens energieflexibler Fabriken lässt sich festhalten, dass alle Merkmale vorhanden sind. Es lässt sich somit konstatieren, dass es sich bei Energieflexibilität um eine eigenständige Flexibilitätsart nach der objektorientierten Betrachtung handelt, wobei die Zielgröße der Energieflexibilität der Energiebedarf einer Produktionsstation oder eines ganzen Produktionssystems ist. Im nächsten Schritt soll nun geprüft werden, wie die drei Dimensionen der Flexibilität im Rahmen der Bewertung der Energieflexibilität zu berücksichtigen sind.

2.5.5 Berücksichtigung der Flexibilitätsdimensionen

In Abschnitt 2.3 wurden die drei Dimensionen der Flexibilität, nämlich die Zeit, die Kosten und die Anzahl der Zustände erläutert. Im Folgenden soll erörtert werden, inwieweit sie im Rahmen dieser Arbeit bei der Bewertung der Energieflexibilität berücksichtigt werden müssen.

Die Zustandsdimension gibt an, welche Zustände ein System annehmen kann, um auf Änderungen des Umfeldes reagieren zu können. In Bezug auf die Energieflexibilität ist dieses Kriterium wichtig, da die Höhe der möglichen Anpassung, d. h. die Veränderung des Energiebedarfs, die Kostenersparnis determiniert. Eine Nichtberücksichtigung dieser Dimension hätte zur Folge, dass im Rahmen der Flexibilitätsbewertung nicht ermittelt werden kann, wie stark sich ein System anpassen kann bzw. wie groß mögliche Kostenersparnisse von Anpassungsmaßnahmen sind.

Die Zeitdimension nimmt bei der Bewertung der Energieflexibilität eine herausragende Rolle ein. Da Strompreise im Extremfall stündlich schwanken können – wie bei RTP-Tarifen üblich, siehe Abschnitt 2.5.3 – mindestens aber täglich variieren, müssen mögliche Anpassungen an die geänderten Strompreise in einer Zeitspanne deutlich unterhalb der Schwankungsfrequenz der Strompreise ihre Wirkung entfalten. Des Weiteren dürfen mögliche Nutzungszeiten nicht dazu führen, dass zu viel Strom zu ungünstigen Zeiten bezogen wird.

Für die Bewertung der Energieflexibilität ist auch die Kostendimension zu berücksichtigen. Da aus Unternehmenssicht das Ziel der Energieflexibilität die Reduktion von (Energie-)Kosten ist, müssen die Kosten für Zustandswechsel unbedingt betrachtet werden. Ansonsten könnten durch mögliche Zustandswechsel zwar die Kosten für den Bezug von elektrischer Energie gesenkt werden, sind

die Kosten für den Zustandswechsel aber größer als die Energiekosteneinsparung, so reduziert sich die Wirtschaftlichkeit des Unternehmens.

Es bleibt somit festzuhalten, dass zur Bewertung der Energieflexibilität alle drei genannten Dimensionen berücksichtigt werden müssen. Eine Vereinfachung, wie von UPTON (1994, S. 80) vorgenommen, indem er die Zeit- und Kostendimension zusammenfasst, ist im Rahmen dieser Arbeit nicht zulässig.

Allerdings kann im Rahmen dieser Arbeit nicht auf ein einheitliches Bewertungsvorgehen für Flexibilität aufgebaut werden, da Flexibilität ein „komplexes, mehrdimensionales und schwer zu fassendes Konzept“ (SETHI & SETHI 1990, S. 289) ist und es in der wissenschaftlichen Literatur somit eine Vielzahl an unterschiedlichen Bewertungsvorgehen gibt. Aus diesem Grund soll nun im nächsten Kapitel der Stand der Erkenntnisse in Bezug auf die Bewertung von Energieflexibilität untersucht und der Handlungsbedarf für diese Arbeit abgeleitet werden.

3 Stand der Erkenntnisse

3.1 Untersuchungsrahmen

Wie in Abschnitt 2.5 erläutert, existiert in der wissenschaftlichen Literatur derzeit kein einheitliches Verständnis bezüglich Energieflexibilität. Dennoch gibt es eine Vielzahl an Ansätzen, welche versuchen, die in der Produktion vorhandene Energieflexibilität zu bewerten und zu nutzen. Die verschiedenen Ansätze stammen dabei vor allem aus den Bereichen der Energie- und der Verfahrenstechnik. Neben den Erläuterungen der Arbeiten aus diesen beiden Bereichen soll in diesem Kapitel zusätzlich der Stand der Erkenntnisse der Produktionstechnik in Bezug auf Energieflexibilität dargestellt werden. Die im Rahmen einer umfassenden Recherche identifizierten Arbeiten werden dabei anhand verschiedener Kriterien, der *Betrachtungsebene*, der *Betrachteten Größen* und der *Modellierungscharakteristika* untersucht.

Zunächst soll jeder identifizierte Ansatz hinsichtlich der gewählten *Betrachtungsebene* analysiert werden. Dieses Kriterium ist wichtig, da aus Unternehmenssicht die Energieflexibilität zur Energiekostensenkung genutzt werden soll. Dabei werden zur Berechnung der Energiekosten der Energie- bzw. Leistungsbedarf einer Fabrik herangezogen. Aus diesem Grund muss diese Ebene entsprechend berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist aber zusätzlich der Energiebedarf auf Stationsebene zu betrachten, da sich der Energiebedarf eines Produktionssystems bzw. einer Fabrik aus den Bedarfen der einzelnen Stationen zusammensetzt (vgl. Abschnitt 1.3.2). Da die Zielsetzung dieser Arbeit die Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion ist, soll im Rahmen der folgenden Betrachtung darüber hinaus eine Unterscheidung der Stationen vorgenommen werden. Es wird zum einen in Produktionsstationen unterschieden werden, d. h. Stationen, welche direkt Wertschöpfung vollführen und somit zur Herstellung eines Produktes verwendet werden. Zum anderen sollen Stationen, welche nicht direkt der Herstellung eines Produktes dienen, in sonstige Stationen eingeteilt werden. In der Regel handelt es sich dabei um Anlagen zur Erzeugung von Raumkälte.

Im Rahmen der Analyse der verschiedenen Ansätze nach den *Betrachteten Größen* soll untersucht werden, inwieweit die drei Dimensionen der Flexibilität (vgl. Abschnitt 2.3) berücksichtigt werden. Da das Ziel der Energieflexibilität eines Unternehmens die Senkung der Energiekosten ist, müssen die Energiekosten von

den Ansätzen betrachtet werden. Allerdings entstehen durch Anpassungen im Rahmen der einem Unternehmen zur Verfügung stehenden Energieflexibilität Kosten, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen, da u. U. die Kosten für Anpassungen die Einsparungen, welche sich daraus ergeben, übersteigen und die Anpassungen somit nicht wirtschaftlich sind. Des Weiteren sind die Leistungsanpassungen und die Anpassungszeiten von Maßnahmen zu berücksichtigen. Um eine Entscheidung über Anpassungen an sich ändernde Strompreise treffen zu können, muss bekannt sein, welche Energiemengen wie schnell und für wie lange verschoben werden können.

Als drittes Analysekriterium werden die *Modellierungscharakteristika* der jeweiligen Ansätze betrachtet. Hierbei wird untersucht, wie das energieflexible Verhalten eines Produktionssystems bzw. einer Station von den verschiedenen Autoren modelliert wird. Der Leistungsbedarf einer Produktionsstation hängt von den jeweiligen Zuständen ab, welche die Station einnehmen kann (vgl. Abschnitt 4.3). Somit sind die jeweiligen Zustände der Verbraucher zu berücksichtigen. Des Weiteren sind die Abhängigkeiten der Zustände untereinander zu betrachten, da Zustandswechsel nicht beliebig vollzogen werden können und bestimmte Zustandsreihenfolgen beachtet werden müssen. Als weiteres Kriterium soll untersucht werden, inwieweit Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt werden. Eine Maßnahme stellt in diesem Zusammenhang der Wechsel eines Verbrauchers bzw. des Produktionssystems von einem Zustand mit definiertem Leistungsniveau in einen anderen Zustand höheren oder niedrigeren Leistungsniveaus dar. Dieses Kriterium ist wichtig, da für eine Entscheidung über mögliche Anpassungen an sich ändernde Strompreise die einem Unternehmen zur Verfügung stehenden Anpassungsmaßnahmen bekannt sein müssen (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Im folgenden Abschnitt 3.2 soll zunächst auf die energie- und verfahrenstechnischen Ansätze in der wissenschaftlichen Literatur eingegangen werden. Eine Betrachtung der produktionstechnischen Ansätze schließt diesen Abschnitt ab. Anschließend wird in Abschnitt 3.3 eine Zusammenfassung des Stands der Erkenntnisse in den verschiedenen Bereichen durchgeführt und hieraus der Handlungsbedarf für diese Arbeit abgeleitet.

3.2 Ansätze zur Bewertung und Nutzung von Energieflexibilität

3.2.1 Analyse energietechnischer Ansätze

In der wissenschaftlichen Literatur im Bereich der Energietechnik gibt es eine Vielzahl an Ansätzen, welche das zeitliche Verschieben von Lasten privater Verbraucher untersuchen (ZEHIR & BAGRIYANIK 2012; STADLER ET AL. 2009; KAMPER 2010). Hierbei wird insbesondere das Verhalten von Kühlgeräten, wie z. B. Kühl- oder Gefrierschränken, und Spülmaschinen untersucht, da diese die Hauptverbraucher privater Haushalte sind (FINN ET AL. 2013). Allerdings setzen die Arbeiten voraus, dass die Stationen von einer zentralen externen Stelle aus gesteuert werden und nicht vom Verbraucher selbst aufgrund eines Preissignals. Es erfolgt somit i. d. R. auch keine detaillierte Kostenbetrachtung. Die Ansätze lassen sich aus diesen Gründen nicht auf die Fragestellungen des verarbeitenden Gewerbes übertragen.

HA ET AL. (2012) untersuchen die Bedarfe an elektrischer Leistung von Wohn- und Bürogebäuden. Hierfür teilen sie die verschiedenen Verbraucher der Gebäude in drei Kategorien ein und schlagen für jede Verbraucherkategorie eine entsprechende Modellierung vor, z. B. eine Petri-Netz-basierte Modellierung für Verbraucher mit unterschiedlichen Zuständen. Mithilfe der Modellierungen erarbeiten sie dann einen Planungs- und Entscheidungsalgorithmus, um auf das aktuelle Stromangebot im Netz ggf. reagieren zu können. Allerdings setzt auch der Ansatz von HA ET AL. (2012) eine zentrale Steuerung der Verbraucher z. B. durch den Energieversorger voraus. Eine Kostenbetrachtung von Anpassungsmaßnahmen findet daher nicht statt, wodurch der Ansatz nicht direkt für die produzierende Industrie übernommen werden kann.

Der Fokus der Arbeit von KWANG & KIM (2012) liegt auf der Modellierung des Verhaltens von Verbrauchern aus Sicht der Stromerzeuger, mit dem Ziel, die Kosten für die Stromerzeugung zu minimieren. Hierfür nutzen die Autoren verschiedene Kennzahlen und binäre Statusinformationen, um die Energieflexibilität von Verbrauchern in aggregierter Form widerspiegeln zu können. Im Rahmen der Modellierung werden die Bewertungsgrößen Zeit und Leistungsänderung berücksichtigt. Eine Kostenbetrachtung wird aber lediglich aus Erzeugersicht vorgenommen. Maßnahmen, wie der Stromverbraucher seinen Bedarf anpassen kann, werden nicht aufgeführt.

Am Beispiel von Kühlprozessen in der spanischen Nahrungsmittelindustrie zeigen ALCÁZAR-ORTEGA ET AL. (2012A; 2012B) einen Ansatz zur Bewertung der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen von Energieflexibilität auf. Hierbei werden die verschiedenen Kosten berechnet, die bei Anpassungen des Energiebedarfs an Änderungen des Energiemarkts für Unternehmen entstehen, und den möglichen Einsparungen durch niedrigere Stromkosten gegenübergestellt. Es wird dabei herausgearbeitet, dass u. U. nach einer Flexibilitätsmaßnahme ein erhöhter Leistungsbedarf besteht, um einen Verbraucher in seinen Ausgangszustand zurückzuführen. Da der Bewertungsansatz auf Kühlprozesse ausgerichtet ist, kann die Vorgehensweise nur eingeschränkt auf andere Problemstellungen übertragen werden.

In folgender Tabelle 1 sind die analysierten energietechnischen Ansätze hinsichtlich ihrer Erfüllung der Kriterien Betrachtungsebene, betrachtete Größen sowie Modellierungscharakteristika gegenübergestellt.

Tabelle 1: Analyse energietechnischer Ansätze

			Zehir & Bagrıyanik 2012	Stadler et al. 2009	Kemper 2010	Ha et al. 2012	Kwang & Kim 2012	Alcázar-Ortega et al. 2012
Betrachtungsebene	Fabrik/Produktionssystem		○	○	○	◐	●	○
	Station	Produktionsstation	○	○	○	◐	○	○
		Sonstige Station	●	●	●	●	○	●
Betrachtete Größen	Anpassungszeiten		◐	●	●	◐	●	○
	Leistungsänderung		●	●	●	●	●	○
	Anpassungskosten		○	○	○	○	○	●
	Energiekosten		●	○	○	●	●	●
Modellierungscharakteristika	Zustände		●	●	●	●	○	○
	Zustandsabhängigkeiten		●	◐	◐	●	○	○
	Maßnahmen für Anpassungen		◐	◐	◐	◐	○	◐

3.2.2 Analyse verfahrenstechnischer Ansätze

Eine der ältesten Arbeiten in Bezug auf die flexible Reaktion von Fabriken auf sich ändernde Strompreise stammt von DARYANIAN ET AL. (1987). Sie stellen einen einfachen Algorithmus vor, welcher für Fabriken der Verfahrenstechnik eine angepasste Produktionsplanung in Abhängigkeit vom aktuellen Strompreis berechnet. Die hierfür nötige Energieflexibilität wird von Speichermöglichkeiten des finalen Produkts bereitgestellt. Der Ansatz betrachtet allerdings keine Zeit- und Kostenabhängigkeiten von Laständerungen der Produktion. Des Weiteren wird die Produktion eines einzelnen Produkts vorausgesetzt. Aus diesem Grund lässt sich die Arbeit von DARYANIAN ET AL. (1987) nicht auf Fabriken außerhalb der Verfahrenstechnik übertragen.

ROOS & LANE (1998) entwickeln eine Modellierung von stündlich wechselnden Energiepreisen, d. h. eines RTP-Tarifs. Diese Modellierung wird anschließend genutzt, um für Fabriken eine optimale Produktionsstrategie abzuleiten, welche minimale Energiekosten bei gleichzeitiger Befriedigung der Kundenwünsche ermöglicht. Da die in dem Ansatz betrachteten Fabriken lediglich ein Produkt herstellen und ein linearer Zusammenhang zwischen Produktionsausstoß und Energiebedarf besteht, ist er den verfahrenstechnischen Ansätzen zuzuordnen. In dem beschriebenen Ansatz werden weder Maßnahmen noch deren Kosten oder zeitliche Bedingungen, wie z. B. Aktivierungsdauern, betrachtet. Deshalb ist die Anwendbarkeit des Ansatzes für Bereiche außerhalb der Verfahrenstechnik fraglich.

Das von VIN ET AL. (2000) erläuterte mathematische Vorgehen hat das Ziel, die Produktions- bzw. Energiekosten für Fabriken der verfahrenstechnischen Industrie zu minimieren und gleichzeitig die hierfür nötige Rechenzeit möglichst gering zu halten. Die in dem entwickelten Modell abgebildete Fabrik kann dabei drei verschiedene Zustände mit unterschiedlichen Leistungsniveaus einnehmen, wobei zeitliche und logische Abhängigkeiten zwischen den Zuständen berücksichtigt werden. Eine detaillierte Kostenbetrachtung von möglichen Anpassungen findet in dem Vorgehen allerdings nicht statt.

KARWAN & KEBLIS (2007) bauen auf der Arbeit von VIN ET AL. (2000) auf und vergleichen den Einsatz unterschiedlicher Strompreismodelle in Abhängigkeit der Energieflexibilität einer Fabrik. Hierzu bilden sie das Verhalten einer Fabrik nach, welche verschiedene Produkte produzieren, unterschiedliche Zustände einnehmen und zwischen den Zuständen unter Berücksichtigung von Hoch- und Runterfahrzeiten wechseln kann. KARWAN & KEBLIS (2007) zeigen

auf, dass der Nutzen von RTP-Modellen nur bei vorhandener Energieflexibilität gegeben ist, andernfalls sind TOU-Modelle für Produktionssysteme wirtschaftlicher. Allerdings führen auch KARWAN & KEBLIS (2007) nur eine unzureichende Kostenbetrachtung von Anpassungsmaßnahmen durch.

MITRA ET AL. (2012) entwickeln in ihrer Arbeit eine Modellierung für Fabriken der Verfahrensindustrie mit dem Ziel, Entscheidungen bezüglich möglicher Anpassungen des Energiebedarfs an den aktuellen stündlichen Strompreis treffen zu können. Hierzu definieren sie mithilfe eines Zustandsgraphen verschiedene Fabrikzustände, wie „Aus“, „Hochfahren“ sowie „Produktion“, und stellen die zeitlichen und logischen Abhängigkeiten der Zustände untereinander dar. Des Weiteren berücksichtigen sie in ihrem Ansatz Randbedingungen, wie die minimale oder maximale Verweildauer in einem Zustand. An einem Beispiel errechnen MITRA ET AL. (2012), dass durch Nutzung der Energieflexibilität einer Fabrik Energiekosteneinsparungen von 5 % möglich sind. Da der Ansatz auf kontinuierliche Prozesse der Verfahrensindustrie fokussiert ist, lässt er sich nicht direkt auf die Problemstellung und Fokussierung dieser Arbeit anwenden.

In folgender Tabelle 2 sind die analysierten verfahrenstechnischen Ansätze in der wissenschaftlichen Literatur hinsichtlich ihrer Erfüllung der Kriterien Betrachtungsebene, betrachtete Größen sowie Modellierungscharakteristika bewertet sowie gegenübergestellt.

Tabelle 2: Analyse verfahrenstechnischer Ansätze

		Erläuterung:					
		○ Eigenschaft trifft nicht zu	◐ Eigenschaft trifft teilweise zu	◑ Eigenschaft trifft im vollen Umfang zu			
			Dayanyan et al. 1987	Roos & Lane 1998	Vin et al. 2000	Karwan & Kebifis 2007	Mitra et al. 2012
Betrachtungsebene	Fabrik/Produktionssystem		◐	◑	◑	◑	◑
	Station	Produktionsstation	◐	◑	◑	◑	◑
		Sonstige Station		○	○	○	○
Betrachtete Größen	Anpassungszeiten		○	○	◐	◑	●
	Leistungsänderung		◐	◑	◑	●	●
	Anpassungskosten		○	○	○	◐	◑
	Energiekosten		●	●	●	●	●
Modellierungscharakteristika	Zustände		◐	○	●	●	●
	Zustandsabhängigkeiten		○	○	○	●	●
	Maßnahmen für Anpassungen		◐	◑	◑	◑	◑

3.2.3 Analyse produktionstechnischer Ansätze

YUSTA ET AL. (2012) stellen einen Ansatz zur Gewinnmaximierung durch die Beeinflussung des zeitlichen Energiebedarfs einer Werkzeugmaschine in Abhängigkeit der gewählten Prozessparameter vor. Hierzu werden die Produktionskosten einer Drehmaschine, die Energie-, Material-, Werkzeug- und Personalkosten, abgebildet und unter Berücksichtigung von variablen Strompreisen optimiert. Durch den gewählten Ansatz zeigen YUSTA ET AL. (2012) auf, dass die Energieflexibilität von der Auslastung der Maschine abhängt. Allerdings erfolgt in der Arbeit nur die Variation der Schnittparameter. Weitere Maßnahmen zur Beeinflussung des zeitlichen Energiebedarfs werden nicht untersucht. Dem Ansatz kann somit eine geringe Übertragbarkeit des Vorgehens auf andere Maschinentypen attestiert werden.

JUNGE (2007) koppelt eine thermische Gebäudesimulation mit einer Materialflusssimulation, um eine energieeffiziente Produktionssteuerung zu verwirklichen. Hierfür definiert er allgemeine Maßnahmen, mithilfe derer der zeitliche

Energiebedarf variiert werden kann. Anhand eines Beispiels aus der kunststoffverarbeitenden Industrie simuliert er anschließend verschiedene Anwendungsszenarien. Dabei wird auch der Fall von stundenweise schwankenden Strompreisen betrachtet. Allerdings erläutert JUNGE (2007) nicht, welche Kosten durch die verschiedenen Maßnahmen entstehen oder wie schnell Zustandswechsel des betrachteten Systems vollzogen werden können.

Am Beispiel von identischen parallelen Maschinen aus dem Bereich der Textilveredelung entwickelt RAGER (2006) einen Ansatz zur energieorientierten Maschinenbelegungsplanung. Hierbei nutzt er einen hybriden evolutionären Algorithmus, welcher eine Minimierung der Anzahl der belegten Maschinen sowie die Glättung des zeitlichen Verlaufs des Einsatzenergeträgerbedarfs ermöglicht. Kosten und Reaktionszeiten von möglichen Maßnahmen zur Anpassung des Energiebedarfs werden nicht betrachtet. Da das Vorgehen auf die Vermeidung von Lastspitzen fokussiert ist, lässt es sich nicht auf die im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Problemstellung von zeitlich variierenden Strompreisen übertragen.

WEINERT (2010) schlägt in seiner Arbeit zur Planung und zum Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme das Konzept der „Energyblocks“ vor. Hierbei handelt es sich um mithilfe von Potenzreihen mathematisch modellierte Energieverbrauchsprofile von Produktionsanlagen. Dabei wird der zeit- und betriebszustandsabhängige Energiebedarf von Anlagen modelliert und diese dann zu den sog. „Energyblocks“ kombiniert. Als mögliches Anwendungsfeld der „Energyblocks“ führt WEINERT (2010, S. 86) die Produktionsplanung und -steuerung auf: „Vor dem Hintergrund täglich veränderter Energiepreise [...] wird auch eine Anpassung des Produktionsablaufs an äußere Bedingungen möglich“. Allerdings erläutert er nicht, wie diese Anpassungen vollzogen werden können oder welche Kosten und Einsparungen damit erzielt werden können.

BONNESCHKY (2002) bildet Produktionssysteme mithilfe der sog. UPN-Modellierung ab. Hierbei werden alle energieverbrauchenden Aggregate eines Produktionssystems den Klassen (U)-Umwandlungs-, (P)-Produktions- sowie (N)-Nebenanlagen zugeteilt. Für diese Klassen definiert BONNESCHKY (2002) Energiekennzahlen, um energiewirtschaftliche Aspekte in Systeme der Produktionsplanung und -steuerung integrieren zu können. Zwar skizziert er die Möglichkeit der Lastprognose, d. h. der Vorhersage des zeitlichen Energiebedarfs, um den Energiebedarf eines Produktionssystems auf das Energieangebot abzustimmen, allerdings erläutert er nicht, wie diese Kennzahlen genutzt werden können, um Entscheidungen über mögliche Anpassungen des Energiebedarfs zu treffen.

Einen Ansatz zur energiesensitiven Produktionsplanung und -steuerung, mit dem sich Unternehmen an sich ändernde Strompreise anpassen können, erläutern NEUGEBAUER ET AL. (2012). Sie führen dabei auf, dass die verschiedenen Zustände von Produktionsstationen und dem Produktionssystem, die Abhängigkeiten der Zustände untereinander, die Wechselwirkungen der einzelnen Stationen sowie einzelner Parameter, wie z. B. die Zeiten und Kosten für Hoch- und Herunterfahren von Stationen beachtet werden müssen. Konkrete Vorschläge, wie hierfür geeignete Kennzahlen oder Vorgehensweisen zur Bewertung gestaltet sein könnten, geben NEUGEBAUER ET AL. (2012) aber nicht.

PECHMANN & SCHÖLER (2011) stellen ein Vorgehen zur Entwicklung von Energiekennzahlen vor, welche sich in die Produktionsplanung und -steuerung integrieren lassen. Mithilfe der so zu entwickelnden Kennzahlen sollen Maßnahmen zur Beeinflussung des zeitlichen Energiebedarfs, wie z. B. das Starten oder Pausieren eines Produktionsauftrags, bewertet werden können und sich somit ggf. Energiekosten einsparen lassen. Zwar führen die Autorinnen konkrete Maßnahmen auf, sie versäumen aber, zeitliche Auswirkungen und Kosten der Maßnahmen aufzuführen. Auch fehlt es an definierten Kennzahlen, mithilfe derer die Maßnahmen bewertet werden könnten. Somit ist die Arbeit von einem hohen Abstraktionsgrad geprägt und liefert kaum konkrete Hilfestellungen für produzierende Unternehmen.

Die umfassendste Sammlung an Maßnahmen zur Anpassung des Energiebedarfs, wie z. B. die Nutzung von Energiespeichern oder das Verschieben von Pausenzeiten, präsentieren GRISMAJER & SELIGER (2012). Allerdings fokussieren sie in ihrer Arbeit nicht die Bewertung der Energieflexibilität, sondern analysieren, welche Informationen den jeweiligen Stakeholdern zur Verfügung gestellt werden müssen, damit diese eine ausreichende Motivation haben, die Energieflexibilität einer Fabrik zu nutzen. Es erfolgt daher keine detaillierte Betrachtung von Größen zur Beschreibung oder Quantifizierung der Energieflexibilität.

EMEC ET AL. (2013) präsentieren einen MILP-Optimierungsansatz zur Produktionsplanung- und Steuerung unter Berücksichtigung von volatilen Energiepreisen. Dabei modellieren sie die Zustände und Übergangszeiten und berechnen die sich ergebenden Energiekosten, wenn sich die Maschinenbelegung nach den schwankenden Strompreisen richtet. Die Kosten der Zustandswechsel sowie weitere mögliche Maßnahmen werden aber nicht betrachtet. Als Ergebnis stellen die Autoren fest, dass das Einsparpotential für Unternehmen bei Nutzung von

volatilen Energiepreisen hauptsächlich von der Flexibilität der Produktionslinie abhängt.

Die analysierten Ansätze im Bereich der Produktionstechnik sind in Bezug auf die Erfüllung der betrachteten Kriterien – Betrachtungsebene, betrachtete Größen und Modellierungscharakteristika – in Tabelle 3 gegenübergestellt.

Tabelle 3: Analyse produktionstechnischer Ansätze

		Yusta et al. 2010	Junge 2007	Rager 2006	Weinert 2010	Bonneschky 2002	Neugebauer et al. 2012	Pechmann & Schöler 2011	Grtismajer & Seliger 2012	Emec et al. 2013
Betrachtungsebene	Fabrik/Produktionssystem	○	◐	◐	●	●	●	●	●	●
	Station	Produktionsstation	●	●	●	●	●	●	○	●
		Sonstige Station	○	●	○	○	○	●	○	○
Betrachtete Größen	Anpassungszeiten	○	○	○	○	○	◐	○	○	◐
	Leistungsänderung	●	○	◐	○	○	○	○	○	◐
	Anpassungskosten	●	◐	○	○	○	○	○	○	○
	Energiekosten	●	●	●	●	●	●	◐	○	●
Modellierungscharakteristika	Zustände	●	●	●	●	○	●	◐	○	●
	Zustandsabhängigkeiten	○	●	○	●	○	●	◐	○	○
	Maßnahmen für Anpassungen	◐	◐	◐	◐	○	●	◐	●	◐

3.3 Zusammenfassung und Handlungsbedarf

Die Analyse des Stands der Erkenntnisse hat eine Vielzahl an Ansätzen in unterschiedlichen Bereichen aufgezeigt, welche versuchen, die Energieflexibilität von einzelnen Stationen oder ganzen Fabriken zu bewerten und nutzbar zu machen. In diesem Abschnitt soll eine kurze Zusammenfassung dieser Analyse der einzelnen Arbeiten gegeben und der Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit herausgestellt werden.

Im Bereich der Energietechnik gibt es einige Arbeiten, welche die Energieflexibilität einzelner Stationen untersuchen. Hierbei liegt der Fokus in der Regel auf

Verbrauchern von Haushalten, wie z. B. Waschmaschinen oder Kühlschränke. Im Rahmen dessen wird davon ausgegangen, dass diese Anlagen von zentraler externer Stelle aus gesteuert werden. Aus diesem Grund wird dabei auch keine Kostenbetrachtung von Anpassungsmaßnahmen durchgeführt. Vereinzelt gibt es auch Ansätze, welche versuchen, die Erkenntnisse der Energietechnik in die produzierende Industrie zu transferieren, wie z. B. ALCÁZAR-ORTEGA ET AL. (2012A; 2012B). Dabei werden aber nur einzelne Stationen außerhalb der Produktion, wie z. B. Lüftungsanlagen betrachtet. Eine allgemeine Bewertungslogik wurde bisher nicht erarbeitet. Ein weiteres Feld der Arbeiten im Bereich der Energietechnik ist die Modellierung des energetischen Verhaltens von Produktionssystemen aus Energieversorgersicht, wie z. B. die Arbeit von KWANG & KIM (2012). Diese betrachten allerdings weder konkrete Anpassungsmaßnahmen noch relevante Bewertungsgrößen wie Anpassungszeiten oder -kosten und können somit nicht auf die Problemstellung dieser Arbeit angewendet werden.

Die Arbeit von DARYANIAN ET AL. 1987 macht deutlich, dass die Herausforderungen und Potentiale schwankender Strompreise im Bereich der Verfahrenstechnik bereits sehr früh erkannt wurden. Dementsprechend ist der Stand der Erkenntnisse im Bereich Energieflexibilität dort weit fortgeschritten. So existierten einige Ansätze, wie z. B. die Arbeiten von KARWAN & KEBLIS (2007) und MITRA ET AL. (2012), welche nahezu alle Dimensionen – auch Anpassungszeiten und Anpassungskosten – der Energieflexibilität ausreichend betrachten. Allerdings lassen sich diese Ansätze nicht ohne weiteres auf die Problemstellung dieser Arbeit übertragen, da Fabriken der Verfahrenstechnik ein signifikant anderes Verhalten aufweisen als produktionstechnische Stationen oder Produktionssysteme. Insbesondere die Steuerbarkeit der Fabrik sowie die Anzahl der Systemzustände unterscheiden sich grundlegend.

Verglichen mit den Ansätzen im Bereich der Energie- und Verfahrenstechnik weisen die produktionstechnischen Ansätze einen deutlich niedrigeren Wissensstand auf. Zwar werden die Herausforderungen und die Potentiale, welche aus dem Ausbau erneuerbarer volatiler Energien resultieren, und die Lösungsstrategie der Energieflexibilität von einigen Arbeiten skizziert, allerdings existieren kaum konkrete Ansätze, welche für die produzierende Industrie in den aufgezeigten Szenarien nutzbar wären. Dies wird insbesondere bei Betrachtung der von den Arbeiten einbezogenen Bewertungsgrößen deutlich. Anpassungszeiten, die berücksichtigen, welche Energiemengen wie schnell und für wie lange verschoben werden können, und Kosten, die im Rahmen von Anpassungsmaßnahmen anfallen, werden mit Ausnahme von YUSTA ET AL. (2012) und EMEC ET AL.

(2013) nicht bzw. nicht ausreichend berücksichtigt. Diese Größen stellen allerdings wichtige Kriterien im Rahmen der Entscheidungsfindung über mögliche Anpassungen dar.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es derzeit keine für die Produktionstechnik geeigneten Ansätze gibt, die eine Bewertung der Energieflexibilität in der industriellen Produktion ermöglichen. Die Arbeiten, welche sich in den verschiedensten Disziplinen mit der Anpassbarkeit von elektrischen Verbrauchern an schwankende Strompreise auseinandersetzen, zielen sehr stark auf die Entwicklung von Strategien zur Steuerung von Stationen und Fabriken ab. Dabei finden aber wichtige Entscheidungsgrößen, wie Anpassungszeiten und -kosten, kaum Berücksichtigung. Darüber hinaus existiert derzeit keine ganzheitliche Betrachtung bzw. Sammlung möglicher Anpassungsmaßnahmen. Obwohl eine Vielzahl an Autoren in ihren Arbeiten die Bedeutung der Energieflexibilität für die Anpassung an schwankende Strompreise feststellten und eine Bewertung der Energieflexibilität fordern, gibt es derzeit keine Ansätze, welche sich die Bewertung der Energieflexibilität zum Ziel gesetzt haben. Hieraus leitet sich der Handlungsbedarf nach der Entwicklung einer Vorgehensweise zur Bewertung der Energieflexibilität ab. Diese muss mögliche Maßnahmen zur Anpassung des Energiebedarfs berücksichtigen und dabei die relevanten Zeitvariablen für Anpassungen und die induzierten Kosten berücksichtigen. Im folgenden Kapitel soll nun auf Basis dessen die Konzeption der Bewertung der Energieflexibilität vorgenommen werden.

4 Konzeption der Bewertung der Energieflexibilität

4.1 Allgemeines

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion zu entwickeln. Um dabei eine hohe Aussagekraft des Bewertungsergebnisses zu ermöglichen und die Anwendbarkeit in der industriellen Praxis gewährleisten zu können, muss die Bewertung verschiedenen Anforderungen genügen. Diese werden in Abschnitt 4.2 erläutert. Im nächsten Schritt wird in Abschnitt 4.3 die Modellierung des Verhaltens von Produktionsstationen vorgenommen. Dabei werden insbesondere die Bedeutung der Zustände und Maßnahmen für die Energieflexibilität herausgearbeitet und die Identifikation allgemeiner Maßnahmen zur Beeinflussung des Energiebedarfs durchgeführt. Anschließend erfolgt in Abschnitt 4.4 die Ableitung der Energieflexibilitätsaxiome durch den theoretischen Vergleich verschiedener Systeme und die anschließende Deduktion der Eigenschaften der Energieflexibilität.

4.2 Anforderungen

Im Folgenden werden unterschiedliche Anforderungen an die Bewertung erläutert, welche aus der Bewertungsaufgabe resultieren sowie sich aus der Anwendbarkeit der Vorgehensweise zur Bewertung ergeben.

- *Quantitative Bewertung:* Um eine eindeutige Aussage bezüglich der Energieflexibilität in der Produktion zu erzielen und auf Basis des Bewertungsergebnisses Entscheidungen, wie z. B. über Anpassungen des Energiebedarfs treffen zu können, ist ein quantitatives Bewertungsergebnis notwendig. Das Bewertungsergebnis soll dabei in Form einer Kennzahl vorliegen.
- *Berücksichtigung der Flexibilitätsdimensionen:* Wie in Abschnitt 2.3 erläutert, lässt sich Flexibilität unter Berücksichtigung der drei Dimensionen, die Zustands-, die Zeit- sowie die Kostendimension bewerten. Daher sollen diese drei Dimensionen im Rahmen der Bewertung der Energieflexibilität miteinbezogen werden.

- *Betrachtung von Maßnahmen:* Um in einem Unternehmen Entscheidungen über die Anpassung des Energiebedarfs treffen zu können, müssen die Maßnahmen bekannt sein, mithilfe derer das Unternehmen seinen Energiebedarf verändern kann. Eine Vorgehensweise zur Bewertung muss daher die dem Unternehmen zur Verfügung stehenden Maßnahmen berücksichtigen.
- *Berücksichtigung von Anforderungen des Strompreismodells:* Es wurde gezeigt, dass unterschiedliche Preismodelle unterschiedliche Anforderungen an die Energieflexibilität stellen, wie z. B. die geforderten Reaktionszeiten. Aus diesem Grund sind die unterschiedlichen Anforderungen der Strompreismodelle in der Bewertung entsprechend zu berücksichtigen.
- *Praxistauglichkeit:* Die Vorgehensweise zur Bewertung der Energieflexibilität soll in der industriellen Praxis einfach zu nutzen sein. Hierfür ist die Berechnung zur Ermittlung der Kennzahl in einem Softwaretool zu implementieren, welches die aufwandsarme Anwendung der Bewertung fördert.
- *Übertragbarkeit:* Da die Vorgehensweise zur Bewertung der Energieflexibilität sowohl in unterschiedlichen Produktionsbereichen als auch in verschiedenen Unternehmen einsetzbar sein soll, muss sie eine gewisse Übertragbarkeit aufweisen.

4.3 Modell zur Energieflexibilitätsbewertung

4.3.1 Zustands- und Maßnahmendefinition

Der Leistungsbedarf und damit der Energiebedarf einer Produktionsstation hängen maßgeblich von den Zuständen ab, welche die Produktionsstation einnehmen kann (DIETMAIR ET AL. 2008, S. 642; KULUS ET AL. 2011, S. 568; REINHART ET AL. 2011A, S. 312). Folgendes Beispiel von WEINERT ET AL. (2011, S. 42) verdeutlicht anhand einer Laserschweißanlage diesen Zusammenhang von Leistungs- bzw. Energiebedarf und eingenommenem Zustand der Produktionsstation.

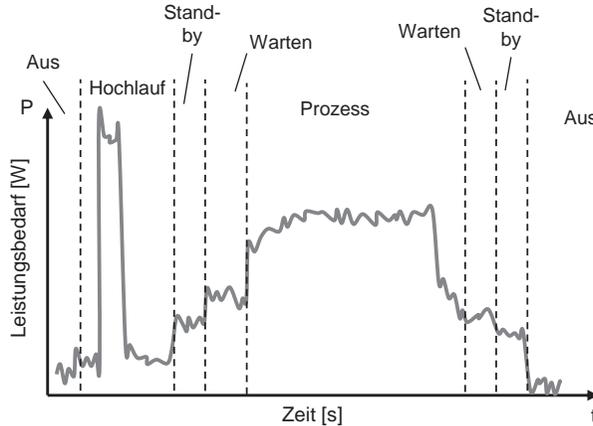


Abbildung 16: Zustände einer Laserschweißanlage nach WEINERT ET AL. (2011, S. 42)

WEINERT (2010, S. 62) definiert in diesem Zusammenhang einen Zustand als separaten Abschnitt einer Produktionsstation, welcher in seiner Folge eine Produktionsaufgabe repräsentiert. Andere Autoren nehmen ähnliche funktionsorientierte Zustandsdefinitionen vor, eine Übersicht ist dem Anhang zu entnehmen.

Es zeigt sich, dass bei der Zustandsdefinition i. d. R. die Funktion herangezogen wird, welche die Produktionsstation in diesem Stadium erfüllt, wie z. B. die Funktion der Bearbeitung des Werkstücks im Zustand „Prozess“. Die Funktion der Produktionsstation wird dabei durch auslösende und abschließende Ereignisse definiert. So führt das auslösende Ereignis des Startens des Prozesses zu einem Wechsel vom Zustand „Warten“ in den Zustand „Prozess“. Das Ende des Prozesses stellt dann das abschließende Ereignis dar und führt wieder zum Wechsel in den Zustand „Warten“. Im Rahmen dieser Arbeit soll der Zustand einer Produktionsstation daher folgendermaßen definiert werden:

Ein Zustand ist ein Stadium einer Produktionsstation, in dem sie eine bestimmte Funktion ausführt. Ein Zustand weist ein oder mehrere auslösende und mindestens ein abschließendes Ereignisse auf, welche die Funktion des Zustandes definieren. Dabei weist ein Zustand einen einheitlichen Leistungsbedarf auf.

Mithilfe dieser Definition lassen sich u. U. mehrere Zustände identifizieren, in welchen eine Produktionsstation die gleiche Funktion ausführt, wie z. B. Produ-

Konzeption der Bewertung der Energieflexibilität

zieren, die Station dabei aber unterschiedliche Leistungsbedarfe aufweist. Dieser Sachverhalt ist für das Beispiel aus Abbildung 16 in folgender Abbildung 17 durch die Darstellung mehrerer „Prozess“-Zustände unterschiedlicher Konfigurationen verdeutlicht.

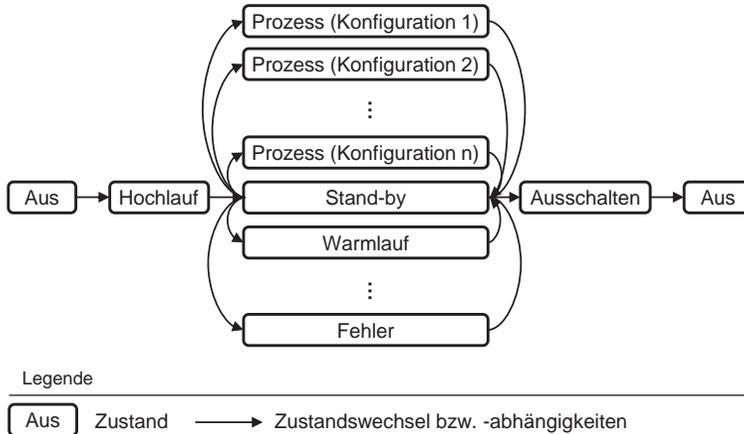


Abbildung 17: Abhängigkeiten zwischen Anlagenzuständen nach WEINERT (2010, S. 62)

Im Rahmen der Energieflexibilität gilt es, den Energiebedarf einer Produktionsstation bzw. eines Produktionssystems bewusst zu beeinflussen. Aufgrund der Abhängigkeit des Energiebedarfs einer Produktionsstation von dem eingenommenen Zustand kann eine Anpassung des Energiebedarfs somit nur durch Zustandswechsel der Produktionsstation erzielt werden. Hierbei ist allerdings ein beliebiger Wechsel von Zuständen nicht möglich, da diese untereinander Abhängigkeiten unterliegen. In Abbildung 17 sind diese Abhängigkeiten der Zustände verdeutlicht. Die Abbildung zeigt beispielsweise, dass die Produktionsstation, wenn sie sich gerade im Zustand „Aus“ befindet, erst den Zustand „Hochlauf“ durchlaufen muss, bevor sie den Zustand „Prozess“ einnehmen kann.

Bei Betrachtung der modellierten Produktionsstation in Abbildung 17 wird darüber hinaus deutlich, dass diese Zustandswechsel sowohl beeinflussbar als auch unbeeinflussbar ablaufen können. So ist bei dem aufgeführten Beispiel davon auszugehen, dass der Hochlauf eine bestimmte Zeitspanne dauert und die Anlage nach Ablauf dieser Zeitspanne automatisch, d. h. unbeeinflusst, in den Zustand

„Stand by“ wechselt. Ein Wechsel der Anlage in den Zustand „Prozess“ kann dagegen nur durch bewusste Beeinflussung der Produktionsstation eingenommen werden, d. h. durch Starten des Prozesses.

Um im Rahmen der Energieflexibilität auf Änderungen des Energiemarktes reagieren zu können, müssen die Zustandswechsel bewusst ausgeführt werden können, d. h. es müssen beeinflussbare Zustandswechsel vollzogen werden. Diese beeinflussbaren Zustandswechsel werden dabei von bestimmten Maßnahmen repräsentiert, wie z. B. dem „Starten des Prozesses“. Im Rahmen dieser Arbeit ist eine Maßnahme daher folgendermaßen definiert:

Eine Maßnahme ist eine bewusste Aktion zur Durchführung eines definierten Zustandswechsels.

4.3.2 Modellierung von Produktionsstationen

Auf Basis der Überlegungen im vorangegangenen Abschnitt soll in diesem Abschnitt eine Modellierung des Verhaltens von Produktionsstationen zur Bewertung der Energieflexibilität vorgenommen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass einzelne Maßnahmen nur in bestimmten Zuständen zur Verfügung stehen. So lässt sich z. B. eine Produktionsstation nur dann ausschalten, wenn sie nicht aus ist, d. h. sich in dem Zustand „Produzieren“ o. ä. befindet. Die Maßnahmen, welche einer Produktionsstation zur Verfügung stehen, lassen sich somit den einzelnen Zuständen in einer 1:n-Beziehung zuordnen. Demnach können in einem Zustand mehrere Maßnahmen identifiziert werden, die einen Zustandswechsel ausgehend von diesem Zustand zulassen. Im Rahmen dieser Arbeit soll dabei zwischen Ausgangszuständen und Zielzuständen unterschieden werden:

Ein Ausgangszustand ist ein Zustand, in welchem eine bestimmte Sammlung an Maßnahmen zur Verfügung steht.

Ein Zielzustand ist ein Zustand, welcher mithilfe einer Maßnahme, ausgehend vom Ausgangszustand, eingenommen wird.

Die Unterscheidung zwischen Ausgangs- und Zielzustand wird getroffen, da sich u. U. mehrere Zustände identifizieren lassen, in welchen eine Produktionsstation die gleiche Funktion ausführt, die Station dabei aber unterschiedliche Leistungsbedarfe aufweist. So weist z. B. eine Laserschneidanlage in Abhängigkeit der bearbeiteten Bleche unterschiedliche Leistungsniveaus im Zustand „Produzieren“ auf. Eine Produktionsstation besitzt daher ggf. Zustandskorridore, innerhalb derer

Konzeption der Bewertung der Energieflexibilität

die diskreten Leistungsbedarfe ähnlicher Zustände liegen können, d. h. Zustände gleicher Funktion. Im Rahmen der Modellierung des Stationsverhaltens zur Abbildung der Energieflexibilität ist dabei aber entscheidend, ob innerhalb eines Zustandskorridors unterschiedliche Maßnahmen zur Verfügung stehen. Meist stehen aber innerhalb eines Zustandskorridors gleiche Maßnahmen zur Verfügung. Dann können mehrere Zustände zu einem zusammengefasst und auf diese Weise der Modellierungsaufwand reduziert werden. Somit muss lediglich ein repräsentativer Ausgangszustand innerhalb des Zustandskorridors gewählt und diesem die Maßnahmen zugeordnet werden, die innerhalb des Zustandskorridors zur Verfügung stehen. Das beschriebene Modell einer Produktionsstation, welches zur Bewertung der Energieflexibilität herangezogen werden soll, ist in folgender Abbildung 18 dargestellt.

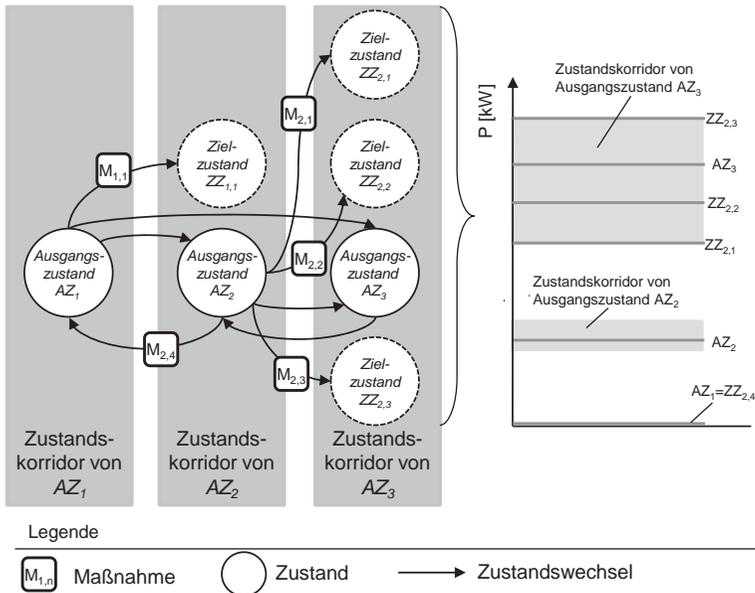


Abbildung 18: Modellierung von Produktionsstationen

Mithilfe der Maßnahmen, welche in den modellierten Ausgangszuständen zur Verfügung stehen, lassen sich mehrere Zielzustände einnehmen. Dabei kann die Anzahl der Zielzustände größer sein als die Anzahl der Ausgangszustände. Auf diese Weise finden auch die anderen Zustände innerhalb eines Zustandskorridors Berücksichtigung. Dabei werden die Ausgangszustände mit AZ_i bezeichnet und

entsprechend nummeriert. Die Maßnahmen werden mit $M_{i,m}$ bezeichnet. Hierbei kennzeichnet die Laufvariable i den Ausgangszustand, in dem die Maßnahme zur Verfügung steht, die Laufvariable m kennzeichnet die Maßnahme und somit den Zielzustand $ZZ_{i,m}$, welcher durch die Maßnahme $M_{i,m}$ ausgehend vom Ausgangszustand AZ_i eingenommen werden kann.

Jedem Zustand wird dabei ein konstantes gleichbleibendes Leistungsniveau zugeordnet. Da zur Berechnung der Energiekosten die verbrauchte Energiemenge herangezogen wird, d. h. der Leistungsbedarf über die Zeit, sind einzelne kurzfristige Leistungsspitzen oder Leistungsschwankungen in einem Zustand im Rahmen dieser Betrachtung nicht relevant. Der Leistungsbedarf eines Zustands errechnet sich somit nach folgender Formel (4.1).

$$P_i = \frac{\int_{t_{aus,i}}^{t_{ab,i}} p_i(t) dt}{t_{aus,i} - t_{ab,i}} \quad (4.1)$$

- P_i *Leistungsbedarf von Ausgangszustand i*
- $P_i(t)$ *Zeitliche Leistungsänderung von Ausgangszustand i*
- $t_{ab,i}$ *Zeitpunkt des abschließenden Ereignisses von Ausgangszustand i*
- $t_{aus,i}$ *Zeitpunkt des auslösenden Ereignisses von Ausgangszustand i*

Abbildung 19 verdeutlicht die vorgenommene Modellierung des Leistungsbedarfs eines Zustands im Rahmen dieser Arbeit.

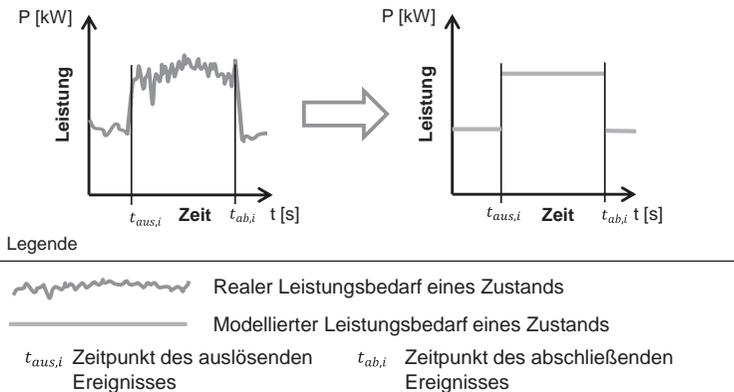


Abbildung 19: Leistungsbedarfsmodellierung eines Zustands

4.3.3 Maßnahmenidentifikation

4.3.3.1 Grundüberlegungen

Um im Rahmen der Energieflexibilität auf Änderungen des Energiemarktes reagieren zu können, müssen die Zustandswechsel durch Maßnahmen bewusst ausgeführt werden können. Somit kann der Energiebedarf i. d. R. nicht direkt beeinflusst werden, vielmehr müssen Veränderungen und Anpassungen im Produktionsprozess vorgenommen werden, welche einen Wechsel der eingenommenen Zustände zur Folge haben. Auf diese Weise wird der Energiebedarf einer Produktionsstation indirekt beeinflusst (REINHART & GRASSL 2013). Die zur Verfügung stehenden Maßnahmen im Rahmen der Energieflexibilität resultiert daher aus verschiedenen anderen Flexibilitätsarten, wie z. B. der Mengenflexibilität (vgl. hierzu Abschnitt 2.2.3), welche eine Anpassung des Produktionsprozesses und damit des Energiebedarfs ermöglichen. Ziel dieses Abschnittes ist es daher, die im Rahmen der Energieflexibilität grundsätzlich zur Verfügung stehenden Maßnahmen zu identifizieren. Hierzu wird zunächst in Abschnitt 4.3.3.2 auf Basis der bekannten Flexibilitätsarten ein Suchraum aufgespannt. Dieser soll genutzt werden, um in Abschnitt 4.3.3.3 Energieflexibilitätsmaßnahmen zu ermitteln und zu beschreiben.

4.3.3.2 Definition des Suchraums

In diesem Abschnitt erfolgt die Definition des Suchraums zur Identifikation der Energieflexibilitätsmaßnahmen. Wie bereits einführend erläutert, ergeben sich die Maßnahmen zur Beeinflussung des Energiebedarfs aus den bekannten Flexibilitätsarten. Aus diesem Grund soll eine Dimension des Suchraums von den in Abschnitt 2.2.3 vorgestellten Flexibilitätsarten aufgespannt werden, der

- Mengenflexibilität,
- Routenflexibilität,
- Produktflexibilität,
- Personaleinsatzflexibilität und der
- Maschinenflexibilität.

Da das Ziel der Energieflexibilitätsmaßnahmen die Anpassung des Energiebedarfs ist, wird der Suchraum darüber hinaus durch die Faktoren aufgespannt, welche den Energiebedarf einer Produktionsstation beeinflussen. Dies sind zum einen die stationsspezifischen Daten, wie z. B. die Technologie, die Art, das

Alter oder der Hersteller der Produktionsstation. Diese Faktoren sollen allgemein unter dem Begriff *Eingesetzte Produktionsstation* zusammengefasst werden. Zum anderen sind die *Eingenommenen Zustände* sowie die *Zeitlichen Anteile der Zustände* als energiebedarfsbeeinflussende Faktoren zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist die *Zeitliche Abfolge der Zustände* relevant.

Auf Basis dieses Suchraums, sollen zur Identifikation der Energieflexibilitätsmaßnahmen theoretisch Anpassungen im Produktionsprozess durchgeführt werden, welche die jeweiligen Flexibilitätsarten erlauben, und die Auswirkungen auf die energiebedarfsbeeinflussenden Faktoren untersucht werden. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Suchraum zur Identifikation von Energieflexibilitätsmaßnahmen

Legende: - nicht relevant ○ kein/geringer Einfluss ◐ mittlerer Einfluss ● großer Einfluss		Eingesetzte Produktionsstation	Eingenommene Zustände der Station	Zeitliche Anteile der Zustände	Zeitliche Abfolge der Zustände
...haben Einfluss auf...					
Anpassungen im Rahmen der...	Mengenflexibilität	◐	◐	●	◐
	Routenflexibilität	●	◐	◐	◐
	Produktflexibilität	○	○	◐	●
	Personaleinsatzflexibilität	○	○	○	●
	Maschinenflexibilität	-	●	◐	○

In Tabelle 4 ist ersichtlich, wie Anpassungen im Rahmen der jeweiligen Flexibilitätsarten den Energiebedarf beeinflussen. Hierbei wird zwischen drei Abstufungen unterschieden: Änderungen im Produktionsprozess, die keinen bzw. nur einen sehr geringen, die einen mittleren oder die einen großen Einfluss auf die energiebeeinflussenden Faktoren haben. Dabei zeigen insbesondere die Felder des Suchraums mögliche Maßnahmen auf, in denen ein großer Einfluss einer Flexibilitätsart auf einen energiebedarfsbeeinflussenden Faktor besteht.

Konzeption der Bewertung der Energieflexibilität

Unter Mengenflexibilität wird die Fähigkeit eines Produktionssystems verstanden, wirtschaftlich bei unterschiedlichen Ausbringungsmengen zu agieren. Wird im Zuge dessen die Ausbringungsmenge angepasst, so verändern sich primär die zeitlichen Anteile der Zustände als Folge der Auslastungsänderung. Darüber hinaus werden aber ggf. auch andere Produktionsstationen genutzt, um die Ausbringungsänderung zu erzielen, was wiederum Auswirkungen auf die eingenommenen Zustände der Produktionsstationen sowie die zeitliche Abfolge der Zustände hat.

Routenflexibilität beschreibt die Möglichkeit eines Produktionssystems, bestimmte Produkte über alternative Routen oder Fertigungspfade herzustellen. Bei Anpassungen im Rahmen der Routenflexibilität, d. h. der Herstellung eines Produktes auf einer alternativen Route, werden insbesondere andere Produktionsstationen zur Herstellung des Produktes genutzt. In Folge dessen verschieben sich die zeitlichen Anteile, die zeitliche Abfolge und ggf. auch die eingenommenen Zustände der von der Anpassung betroffenen Produktionsstation.

Als Produktflexibilität wird die Fähigkeit eines Produktionssystems verstanden, verschiedene Arten von Produkten fertigen zu können bzw. ein bestehendes Produktionssystem an wechselnde Produkte anzupassen. Sie ermöglicht es somit auch, wirtschaftlich unterschiedliche Produkte in kleinen Losgrößen herzustellen. Eine Anpassung der Losgröße hat dabei hauptsächlich Auswirkungen auf die Abfolge der eingenommenen Zustände, wenn z. B. zunächst ein energieintensives und anschließend ein weniger energieintensives Bauteil hergestellt werden.

Die Personaleinsatzflexibilität ermöglicht es, Mitarbeiter in der Produktion flexibel einzusetzen. Bei Nutzung verschiedener Arbeitszeitmodelle, d. h. variabler Pausen- und Schichtzeiten, verändern sich weder die eingesetzten Produktionsstationen noch die eingenommenen Zustände der Produktionsstationen. Einzig die Abfolge der Zustände wird angepasst, sodass es zu einer Veränderung des Lastgangs kommt.

Maschinenflexibilität bezieht sich auf die verschiedenen Operationen, welche eine Produktionsstation ohne großen Umrüstaufwand ausführen kann. Werden im Rahmen dieser Flexibilitätsart andere Prozessparameter zur Herstellung eines Produktes gewählt, so nimmt die Produktionsstation andere Zustände mit anderen Leistungsniveaus ein. Gegebenenfalls kommt es im Zuge dessen zu einer Veränderung der zeitlichen Anteile der Zustände, da einzelne Prozesse durch die Anpassung der Prozessparameter schneller oder langsamer ablaufen.

4.3.3.3 Identifikation von Maßnahmen

In diesem Abschnitt sollen Energieflexibilitätsmaßnahmen identifiziert und beschrieben werden. Zur Ermittlung der Maßnahmen dient dabei der im vorangegangenen Abschnitt definierte Suchraum. Hierbei zeigen insbesondere die Felder des Suchraums mögliche Maßnahmen auf, in denen ein großer Einfluss einer Flexibilitätsart auf einen energiebedarfsbeeinflussenden Faktor besteht. Somit lassen sich insgesamt acht Energieflexibilitätsmaßnahmen ableiten, wie in Tabelle 5 ersichtlich.

Tabelle 5: Identifizierte Energieflexibilitätsmaßnahmen

...haben Einfluss auf...		Eingesetzte Produktionsstation	Eingenommene Zustände der Station	Zeitliche Anteile der Zustände	Zeitliche Abfolge der Zustände
Anpassungen im Rahmen der...	Mengenflexibilität				
	Routenflexibilität				
	Produktflexibilität				
	Personaleinsatzflexibilität				
	Maschinenflexibilität				

	Anpassung von Prozessstarts		Anpassung von Schichtzeiten		Unterbrechung von Prozessen
	Anpassung der Maschinenbelegung		Anpassung der Auftragsreihenfolge		Anpassung von Prozessparametern
	Anpassung von Pausenzeiten				

Im Folgenden sollen nun die einzelnen identifizierten Maßnahmen beschrieben und definiert werden.

Anpassung von Prozessesstarts (kurzfristig)

Die Maßnahme *kurzfristige Anpassung von Prozessesstarts* beschreibt das vorzeitige oder verzögerte Beginnen von Prozessen innerhalb kürzerer Zeiträume. Im Rahmen dessen werden Pufferzeiten im Produktionsablauf genutzt, um Aufträge kurzfristig zeitlich zu verschieben. In Folge dessen kommt es zu einer zwischenzeitlichen Änderung im Energiebedarf einer Fabrik.

Anpassung von Prozessesstarts (mittelfristig)

Die Maßnahme *mittelfristige Anpassung von Prozessesstarts* beschreibt das vorzeitige oder verzögerte Beginnen von Prozessen innerhalb längerer Zeiträume. Hierbei werden freie Produktionskapazitäten genutzt, um zusätzliche Aufträge in der jeweiligen Periode zu produzieren. In Folge dessen kommt es zu einer Änderung im Energiebedarf einer Fabrik.

Anpassung der Maschinenbelegung

Die Maßnahme *Anpassung der Maschinenbelegung* beschreibt die Veränderung der Zuordnung eines Produktes zu den zur Herstellung des Produktes genutzten Produktionsstation. Auf diese Weise kann der Leistungsbedarf bei der Herstellung des Produktes verändert werden, da einzelne Produktionsstationen je nach eingesetzter Technologie, Alter und Hersteller der Produktionsstation unterschiedliche Energiebedarfe aufweisen.

Anpassung der Auftragsreihenfolge

Die Maßnahme *Anpassung der Auftragsreihenfolge* beschreibt die Veränderung der Bearbeitungsreihenfolge von unterschiedlichen Produkten. Die Wirkungsweise dieser Maßnahme rührt daher, dass zwei Produkte u. U. einen unterschiedlichen Leistungsbedarf in ihrer Herstellung aufweisen, d. h. die Produktionsstation, welche die Produkte fertigt, nimmt bei deren Herstellung unterschiedliche Zustände ein. Diese Leistungsunterschiede treten z. B. beim Schneiden von Blechen bei einer Laserschneidanlage auf (REINHART & GRASSL 2013).

Anpassung von Pausenzeiten

Die Maßnahme *Anpassung von Pausenzeiten* beschreibt das kurzfristige Verschieben der Pausenzeiten von Mitarbeitern. Diese Maßnahme ist dabei nur in

Bereichen wirksam, in welchen der Mitarbeiter einen direkten Einfluss auf den Energiebedarf hat.

Anpassung von Schichtzeiten

Die Maßnahme *Anpassung von Schichtzeiten* beschreibt das Verschieben der Produktionszeiten in Zeiträume mit einem großen Stromangebot. So können beispielsweise die i. d. R. niedrigen Stromkosten an Feiertagen, Wochenenden oder Brückentagen ausgenutzt werden.

Unterbrechung von Prozessen

Die Maßnahme *Unterbrechung von Prozessen* beschreibt das zeitweise Stoppen eines Prozesses sowie das Fortsetzen des Prozesses nach einer gewissen Zeitdauer. Die Produktionsstation, an welcher der Prozess gestoppt wurde, nimmt dabei während der Unterbrechung i. d. R. einen Zustand niedrigeren Leistungsniveaus an. Meist eignen sich für diese Maßnahme nicht direkt wertschöpfende Prozesse, wie z. B. Testanlagen.

Anpassung von Prozessparametern

Die Maßnahme *Anpassung von Prozessparametern* beschreibt die Herstellung eines Produktes durch eine Produktionsstation mit gegenüber dem Regelprozess veränderten Prozessparametern. Dadurch nimmt die Produktionsstation bei der Herstellung des Produktes gegenüber dem Regelprozess einen anderen Zustand mit einem veränderten Leistungsbedarf ein. Als Beispiel für eine solche Maßnahme kann die Wahl eines höheren Temperaturniveaus bei einem Ofenprozess sein.

Neben diesen Energieflexibilitätsmaßnahmen, welche sich aus den bestehenden Flexibilitätsarten ableiten, lassen sich noch zwei weitere Maßnahmen identifizieren, die *Speicherung von Energie* sowie der *Wechsel der Energiequelle*.

Speicherung von Energie

Die Maßnahme *Speicherung von Energie* beschreibt die bewusste Speicherung von Energie in einem geeigneten Speichermedium. Auf diese Weise kann zeitweise zusätzliche Energie abgerufen (Einspeicherung) bzw. weniger Energie benötigt (Auspeicherung) werden. Mögliche Speichermedien sind hierbei z. B. Druckluftspeicher oder Schwungradspeicher (QUASCHNING 2013, S. 229; KARL 2012, S. 340 ff.).

Wechsel der Energiequelle

Die Maßnahme *Wechsel der Energiequelle* beschreibt die Nutzung unterschiedlicher Energieträger zur Leistungserbringung eines Prozesses. Ein Wechsel der Energiequelle bzw. des Energieträgers von bzw. hinzu elektrischen Strom hat somit eine Beeinflussung des Strombedarfs zur Folge. Als Beispiele können die Nutzung eines Notstromaggregats oder der Betrieb eines Ofens mit wahlweise Gas oder Strom genannt werden.

4.3.3.4 Fazit

In diesem Abschnitt wurden insgesamt zehn unterschiedliche Maßnahmen zur Beeinflussung des Energiebedarfs identifiziert. Hierbei ist ein Suchraum genutzt worden, welcher sich aus den bekannten Flexibilitätsarten und energiebedarfsbeeinflussenden Faktoren aufspannt. Flexible Fabriken im klassischen Sinne weisen dabei auch ein höheres Maß an Energieflexibilität auf, da die Möglichkeit, Produktionsprozesse im Rahmen von Flexibilitätsarten zu beeinflussen, auch die Möglichkeit beinhalten, den Energiebedarf einer Fabrik zu verändern. Allerdings herrscht hierbei kein linearer Zusammenhang, d. h. ein mengenflexibles Produktionssystem ist nicht im selben Maße energieflexibel. Die Flexibilitätsarten eines Produktionssystems lassen aber Schlüsse auf die im Rahmen der Energieflexibilität zur Verfügung stehenden Maßnahmen zu.

In Bezug auf die identifizierten Energieflexibilitätsmaßnahmen lässt sich festhalten, dass alle Maßnahmen sowohl eine Vergrößerung als auch eine Verringerung des Leistungsbedarfs erlauben. Die einzige Ausnahme stellt dabei das Unterbrechen von Prozessen dar. Auf diese Weise kann nur eine kurzfristige Leistungsreduktion erzielt werden. Über den Nutzen einzelner Maßnahmen kann generell keine Aussage getroffen werden. Dies hängt vielmehr von den individuell eingesetzten Technologien, Prozessen und herzustellenden Produkten ab. Während für ein Unternehmen die Anpassung von Prozessparametern lohnenswert ist, stellt für ein anderes Unternehmen das Verschieben von Schichtzeiten ein wirkungsvolles Instrument zur Anpassung des Energiebedarfs dar.

4.4 Ableitung von Energieflexibilitätsaxiomen

4.4.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt sollen grundlegende Axiome der Energieflexibilität ermittelt werden. Diese Axiome sollen als Basis bzw. als Anforderungen für die Entwicklung des Bewertungsvorgehens in Abschnitt 5 dienen. Die Ableitung der Energieflexibilitätsaxiome erfolgt dabei durch den theoretischen Vergleich verschiedener Systeme und die anschließende Deduktion der Eigenschaften und somit der Axiome der Energieflexibilität. Ziel ist hierbei, qualitative Aussagen in Bezug auf die Energieflexibilität unterschiedlicher Systeme treffen zu können. Da Flexibilität durch die drei Dimensionen, der Zustands-, Zeit- sowie Kostendimension aufgespannt wird (vgl. Abschnitt 2.3), sollen die Energieflexibilitätsaxiome ebenfalls diesen drei Dimensionen zugeordnet werden.

4.4.2 Zustandsbezogene Axiome

Zunächst soll die Auswirkung der Anzahl der Zielzustände bzw. der Maßnahmen auf die Energieflexibilität untersucht werden. Hierfür werden verschiedene Systeme betrachtet und die Anzahl der Zielzustände mit ihren jeweiligen Leistungsbedarfen auf einem Leistungsstrahl eingezeichnet. Die jeweiligen Zielzustände werden mit $ZZ_{i,m}$ und die durch die Zustände erzielbaren Leistungsänderungen mit $P_{i,m}$ beschrieben. Der Ausgangszustand und dessen Leistungsbedarf werden durch AZ_i bzw. P_i gekennzeichnet, siehe Abbildung 20.

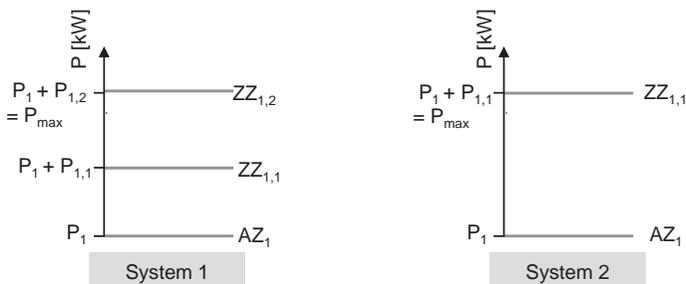


Abbildung 20: Untersuchung von Systemen mit unterschiedlicher Anzahl an Zuständen

Konzeption der Bewertung der Energieflexibilität

Die beiden in Abbildung 20 dargestellten Systeme weisen jeweils den gleichen Ausgangszustand sowie einen gleichen Zielzustand mit maximalem Leistungsbedarf P_{max} . Die jeweiligen Zielzustände $ZZ_{1,1}$ bzw. $ZZ_{1,2}$ können dabei durch verschiedene Maßnahmen eingenommen werden. Im Zuge dessen weist das System 1 im Gegensatz zu System 2 einen weiteren Zielzustand auf. Dem System 1 steht somit ein weiterer Zielzustand zur Verfügung, um auf Änderungen des Strommarktes zu reagieren. System 1 hat somit die Möglichkeit, sich besser an die geforderten Änderungen anzupassen und ist daher flexibler als System 2, was den allgemeinen Flexibilitätseigenschaften aus Abschnitt 2.3 entspricht. Die gewonnene Erkenntnis lässt sich in einem ersten Axiom folgendermaßen formulieren (GRASSLET AL. 2013):

Energieflexibilitätsaxiom Nr. 1:

Je größer/geringer die Anzahl der Zielzustände eines Systems ist, desto flexibler/unflexibler ist es.

Im nächsten Schritt soll nun der Einfluss der Verteilung der Zielzustände auf die Energieflexibilität eines Systems untersucht werden. Hierfür wird mit Abbildung 21 eine ähnliche Darstellung wie in Abbildung 20 genutzt. Ausgangspunkt für Anpassungen des Energiebedarfs ist wiederum Ausgangszustand AZ_1 . Die jeweiligen Zielzustände $ZZ_{1,1}$ bzw. $ZZ_{1,2}$ lassen sich durch die Ausführung verschiedener Maßnahmen einnehmen.

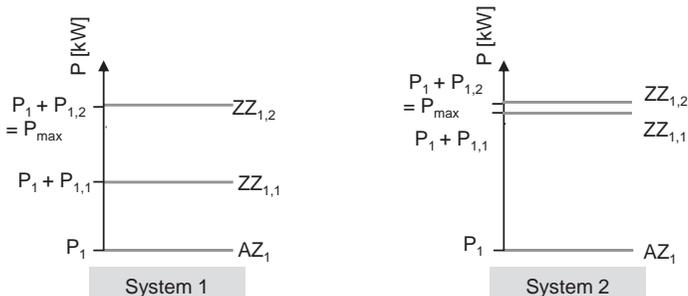


Abbildung 21: Untersuchung von Systemen mit unterschiedlicher Verteilung der Zustände

Die beiden in Abbildung 21 dargestellten Systeme sind mit Ausnahme der Leistungsdifferenz $P_{1,1}$ von Zielzustand $ZZ_{1,1}$ gegenüber dem Ausgangszustand AZ_1 und damit der Verteilung der Zielzustände identisch. Der Zielzustand $ZZ_{1,1}$ des Systems 2 liegt auf dem Leistungsband sehr nahe am Zielzustand $ZZ_{1,2}$. Dies hat

zur Folge, dass bei System 2 – im Gegensatz zu System 1 – durch einen Wechsel in den Zielzustand $ZZ_{1,2}$ nur eine geringfügige Änderung des Leistungsbedarfes, verglichen mit einem Wechsel in Zielzustand $ZZ_{1,1}$, vollzogen wird. Der Zielzustand $ZZ_{1,1}$ in System 2 bietet somit gegenüber Zielzustand $ZZ_{1,2}$ kaum einen Mehrwert in Bezug auf die Möglichkeiten zur optimalen Anpassbarkeit auf Änderungen des Energiemarktes. Die Energieflexibilität von System 1 wird daher durch den Zielzustand $ZZ_{1,1}$ positiver beeinflusst als bei System 2. Eine ähnliche, allgemeine Erkenntnis in Bezug auf die Verteilung von Zuständen wurde für andere Flexibilitätsarten von UPTON (1994, S. 80) formuliert und als „Uniformity“ bezeichnet. Das zweite Axiom, welches sich auf die Verteilung der Zustände bezieht, lautet demnach folgendermaßen:

Energieflexibilitätsaxiom Nr. 2:

Je gleichmäßiger/ungleichmäßiger die Verteilung der Zielzustände eines Systems ist, desto flexibler/unflexibler ist es.

4.4.3 Zeitbezogene Axiome

Als weitere Dimension der Flexibilität sollen nun in diesem Abschnitt die zeitbezogenen Axiome der Energieflexibilität ermittelt werden. Zunächst gilt es dabei, den Einfluss der Dauer eines Zustandswechsels bzw. der Aktivierungsdauer (vgl. Abbildung 11) einer Maßnahme auf die Energieflexibilität eines Systems zu untersuchen. Dies soll mithilfe von Abbildung 22 geschehen.

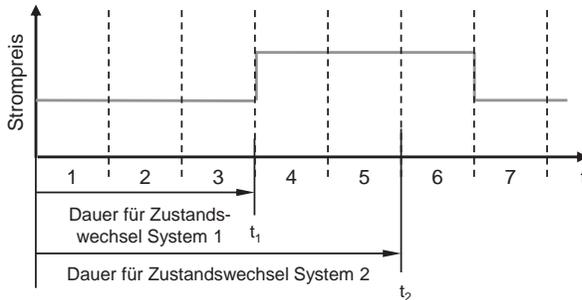


Abbildung 22: Untersuchung von Systemen mit unterschiedlichen Zustandswechselzeiten

In Abbildung 22 ist die Änderung eines Strompreises über die Zeit dargestellt. Der Strompreis verteuert sich nach Periode 3 und sinkt wieder auf ein günstige-

Konzeption der Bewertung der Energieflexibilität

res Niveau nach Periode 6 ab. Darüber hinaus sind die Zustandswechselzeiten für zwei Systeme dargestellt, welche den Aktivierungsdauern der Maßnahmen entsprechen, durch welche die Zustandswechsel vollzogen werden. System 1 weist eine Zustandswechselzeit von 3 Perioden auf, die Zustandswechselzeit von System 2 beträgt 5 Perioden. Unter der Annahme, dass die Strompreisänderung in Periode 3 in Periode 0 bekannt wird, zeigt sich, dass System 2 nicht schnell genug auf den geänderten Strompreis reagieren kann und somit ggf. höhere Stromkosten zu zahlen hat. Je schneller ein System einen Zustandswechsel vollziehen kann, desto eher kann das System sich auch auf kurzfristig ändernde Strompreise einstellen. Das entsprechende Energieflexibilitätsaxiom lautet demnach folgendermaßen:

Energieflexibilitätsaxiom Nr. 3:

Je schneller/langsamer ein Wechsel zwischen den Zuständen eines Systems durchgeführt werden kann, desto flexibler/unflexibler ist es.

Als weitere Größen sollen nun minimale und maximale Verweildauern von Zuständen betrachtet werden. Wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, dienen Zustandswechsel der Anpassung an Änderungen des Energiemarktes. Dabei ist es entscheidend, wie lange der Zielzustand eingenommen werden muss (minimale Verweildauer) bzw. kann (maximale Verweildauer). Die Auswirkungen von minimalen Verweildauern sollen mithilfe von Abbildung 23 verdeutlicht werden.

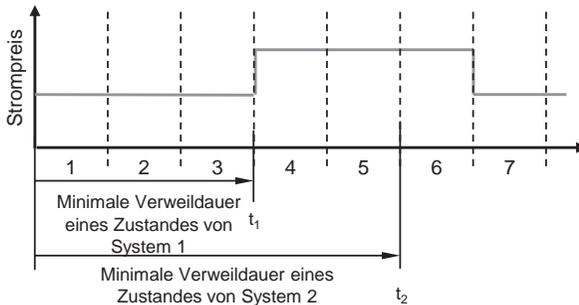


Abbildung 23: Untersuchung von Systemen mit unterschiedlichen minimalen Verweildauern von Zuständen

Abbildung 23 zeigt ebenfalls wie Abbildung 22 die Änderung eines Strompreises über die Zeit. Außerdem ist die minimale Verweildauer eines Zustandes für zwei Systeme dargestellt. System 1 weist eine minimale Verweildauer von 3 Perioden

auf, die minimale Verweildauer von System 2 beträgt 5 Perioden. Aufgrund der langen minimalen Verweildauer des eingenommenen Zustandes von System 2 kann das System im Gegensatz zu System 1 nicht schnell genug auf die Strompreisänderung nach Periode 3 reagieren. Aus dieser Erkenntnis lässt sich folgendes Axiom ableiten:

Energieflexibilitätsaxiom Nr. 4:

Je kürzer/länger die minimale Verweildauer der Zustände eines Systems ist, desto flexibler/unflexibler ist es.

Die Überlegungen zur minimalen Verweildauer lassen sich auch auf die maximale Verweildauer übertragen, siehe Abbildung 24.

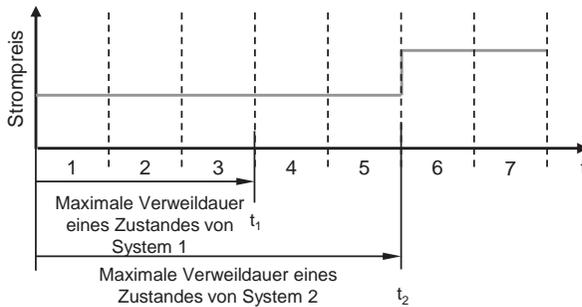


Abbildung 24: Untersuchung von Systemen mit unterschiedlichen maximalen Verweildauern von Zuständen

Das in Abbildung 24 dargestellte System 1 hat eine maximale Verweildauer eines Zustandes von 3 Perioden. Da das niedrige Strompreinsniveau aber 5 Perioden dauert, kann System 1 nicht die gesamte Dauer von dem niedrigen Strompreis profitieren und muss ab Periode 4 einen anderen, ggf. ungünstigeren Zustand einnehmen. System 2 kann dagegen die gesamte Dauer von 5 Perioden von dem niedrigen Strompreis profitieren. Das daraus folgende Energieflexibilitätsaxiom lautet:

Energieflexibilitätsaxiom Nr. 5:

Je länger/kürzer die maximale Verweildauer der Zustände eines Systems ist, desto flexibler/unflexibler ist es.

4.4.4 Kostenbezogene Axiome

Wie für Flexibilität im Allgemeinen bereits in Abschnitt 2.3.4 erläutert wurde, entstehen bei Zustandswechsel Kosten. Im Rahmen der Energieflexibilität treten ebenfalls Kosten bei Zustandswechsel, d. h. beim Ausführen von Maßnahmen, auf. So ist z. B. nach dem Abschalten einer Produktionsstation bei hohen Strompreisen anschließend ein zusätzlicher Hochfahrprozess der Station nötig, welcher zusätzliche Energie benötigt und somit Kosten verursacht. Da das Ziel der Energieflexibilität die Senkung der Gesamtkosten ist, müssen die entstehenden Kosten geringer als die Energiekosteneinsparungen durch energieflexibles Verhalten sein. Daraus folgt das entsprechende Energieflexibilitätsaxiom Nr. 6:

Energieflexibilitätsaxiom Nr. 6:

Je günstiger/teurer ein Wechsel zwischen den Zuständen eines Systems ist, desto flexibler/unflexibler ist es.

5 Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

5.1 Allgemeines

Im Rahmen dieses Kapitels soll eine Kennzahl entwickelt werden, welche die Bewertung der Energieflexibilität einzelner Produktionsstationen ermöglicht. Hierzu soll zunächst das in Abschnitt 4.3 vorgestellte Modell hinsichtlich Leistungs-, Zeit- und Kostenparameter erweitert werden, um somit die Basis für eine Bewertung der Energieflexibilität zu schaffen. Im nächsten Schritt wird in den Abschnitten 5.3 und 5.4 schrittweise die Formel zur Bewertung der Energieflexibilität entwickelt. Hierzu werden aufbauend auf einer grundlegenden Gleichung, welche die Axiome Nr. 1 und 2 erfüllt, weitere (Gewichtungs-)Faktoren erarbeitet, welche die identifizierten Axiome des vorangegangenen Abschnittes berücksichtigen sollen. Zudem werden auch Wechselwirkungen einer Produktionsstation mit weiteren Stationen mit einbezogen. Abschließend werden im Abschnitt 5.5 Kostenarten ermittelt, welche bei der Ausführung von Energieflexibilitätsmaßnahmen auftreten können.

5.2 Erweiterung des Bewertungsmodells

In diesem Abschnitt wird das in Abschnitt 4.3 erläuterte Modell zur Bewertung der Energieflexibilität mit quantifizierbaren Faktoren erweitert. Auf diese Weise soll die Basis für eine Bewertung der Energieflexibilität geschaffen werden. Eine Produktionsstation lässt sich dabei durch das Modell mithilfe von Ausgangszuständen und Maßnahmen bzw. Zielzuständen beschreiben. Die Faktoren, welche eine Quantifizierung der Energieflexibilitätsaxiome aus Abschnitt 4.4 ermöglichen sollen, können in dem Modell daher entweder den Maßnahmen oder den Ausgangszuständen zugeordnet werden. Die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommene Zuordnung der Axiome zu den beiden Elementen des Modells zeigt Tabelle 6.

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

Tabelle 6: Beschreibungsgrößen zur Bewertung der Energieflexibilität

Axiom		Bewertungsmodell			
Nr.	Bezeichnung	Zustand	Maßnahme	Beschreibungsgröße	Einheit
1	Anzahl der Zielzustände			Anzahl der Maßnahmen	-
2	Verteilung der Zielzustände			Leistungsänderung	kW
3	Dauer für Zustandswechsel			Aktivierungszeit	Min.
				Deaktivierungszeit	Min.
4	Minimale Verweildauer			Minimale Verweildauer	Min.
5	Maximale Verweildauer			Maximale Verweildauer	Min.
6	Kosten für Zustandswechsel			Kosten der Maßnahme	€
				Zeitlicher Anteil des Zustands	%
				Leistungsbedarf des Ausgangszustands	kW

In Tabelle 6 sind die sechs Energieflexibilitätsaxiome sowie ihre korrespondierenden Beschreibungsgrößen im Modell dargestellt. Dabei lässt sich für jedes Axiom eine quantifizierbare Größe identifizieren und den Maßnahmen des Bewertungsmodells zuordnen. Darüber hinaus sind noch zwei weitere Beschreibungsgrößen des Stationsverhaltens nötig, um die Energieflexibilität bewerten zu können. Diese werden den Zuständen zugeordnet.

Axiom Nr. 1 wird durch die Anzahl der Maßnahmen eines Ausgangszustands berücksichtigt, welche die Wechsel in die möglichen Zielzustände zulassen. Mithilfe der Leistungsänderungen, die durch eine Maßnahme, bezogen auf den Ausgangszustand, erzielt werden können, lässt sich die Verteilung der Zielzustände eines Systems ermitteln. Daher ist Axiom Nr. 2 durch die Beschreibung der Leistungsänderung einer Maßnahme zu berücksichtigen.

Die Berücksichtigung des Axioms Nr. 3 muss im Bewertungsmodell dagegen differenzierter erfolgen. Da ein Zustandswechsel durch definierte Maßnahmen

vollzogen wird, ist die Dauer für einen Zustandswechsel den Maßnahmen zuzuordnen. Hierbei ist aber nicht nur entscheidend, wie schnell eine Maßnahme aktiviert werden kann, die sog. Aktivierungsdauer, sondern auch, wie schnell eine Maßnahme wieder zurückgenommen werden kann, um den Wechsel in einen neuen Zustand zu ermöglichen. Die Berücksichtigung des Axioms Nr. 3 erfolgt daher auch durch die Beschreibung einer Maßnahme mithilfe der sog. Deaktivierungsdauer der Maßnahme.

Die minimale sowie maximale Verweildauer sind Größen, die entweder technisch oder organisatorisch determiniert sind. Sie beschreiben, wie lange ein bestimmter Zustand eingenommen werden kann bzw. muss. In der Regel sind diese Größen unabhängig von der Maßnahme, durch die der jeweilige Zielzustand eingenommen wurde. So legt z. B. die Kapazität eines Energiespeichers fest, wie lange der Zustand „Speicher füllen“ eingenommen werden kann. Allerdings beeinflussen auch die Maßnahmen selbst die Verweildauern. Beim Verschieben von Pausenzeiten zur Beeinflussung des zeitlichen Energiebedarfs ist z. B. die maximale Verweildauer durch die Maßnahme „Pausenzeiten verschieben“ begrenzt und nicht durch den eingenommenen Zustand, bei dem die Produktionsstation beispielsweise im Zustand „Stand-by“ ist. Um eine Beschreibung weitestgehend aller auftretenden Fälle zu ermöglichen, werden die minimale sowie maximale Verweildauer im Modell daher den Maßnahmen zugeordnet.

Das Axiom Nr. 6 wird durch die spezifischen Kosten für jede Maßnahme berücksichtigt.

Darüber hinaus müssen noch zwei weitere Beschreibungsgrößen beachtet werden. Zum einen die Leistungsbedarfe der Ausgangszustände und zum anderen die zeitlichen Anteile der Ausgangszustände. Da die Maßnahmen einer Produktionsstation nur in bestimmten (Ausgangs-)Zuständen zur Verfügung stehen – eine Produktionsstation lässt sich z. B. nur abschalten, wenn sie im Zustand „an“ ist – führt eine Veränderung der zeitlichen Anteile der Ausgangszustände auch zu einer Veränderung der zeitlichen Anteile, in denen bestimmte Maßnahmen zur Verfügung stehen und somit auch zu einer Steigerung und Senkung der Energieflexibilität. Aus diesem Grund sind die zeitlichen Anteile der Ausgangszustände zu berücksichtigen.

Nachdem in diesem Abschnitt das Modell zur Abbildung des Systemverhaltens aus 4.3.2 hinsichtlich Leistungs-, Zeit- und Kostenparametern erweitert wurde, soll nun im nächsten Schritt die Formel zur Bewertung der Energieflexibilität schrittweise entwickelt werden.

5.3 Bewertung der Energieflexibilität von Produktionsstationen

5.3.1 Grundlegende Gleichung zur Erfüllung der Axiome Nr. 1 und 2

In diesem Abschnitt soll eine Gleichung erläutert werden, welche den beschriebenen Axiomen Nr. 1 und 2 genügt. Diese soll als Grundlage für Weiterentwicklungen dienen, um auch die Anforderungen aus den Axiomen Nr. 3-5 zu berücksichtigen, sodass eine ganzheitliche Bewertung der Energieflexibilität möglich wird. Hierbei wird das in Abbildung 25 dargestellte Modell zur Ableitung dieser grundlegenden Gleichung herangezogen. Es zeigt einen Ausgangszustand AZ_1 sowie die in diesem Zustand zur Verfügung stehenden Maßnahmen $M_{1,n}$ und die mithilfe dieser Maßnahmen erreichbaren Zielzustände $ZZ_{1,n}$. Hierbei kennzeichnet die erste Indizierung die Nummer des Ausgangszustands, der zweite Index bezieht sich auf die Maßnahme. Der Leistungsbedarf des Zielzustands errechnet sich dabei aus dem Leistungsbedarf P_1 des Ausgangszustands, von dem aus die Maßnahme ausgeführt wurde, und der Leistungsänderung $P_{1,n}$, welche aufgrund der Maßnahme $M_{1,n}$ erzielt wurde. Somit ist auch ein geringerer Leistungsbedarf des Zielzustands als der Leistungsbedarf des Ausgangszustands möglich.

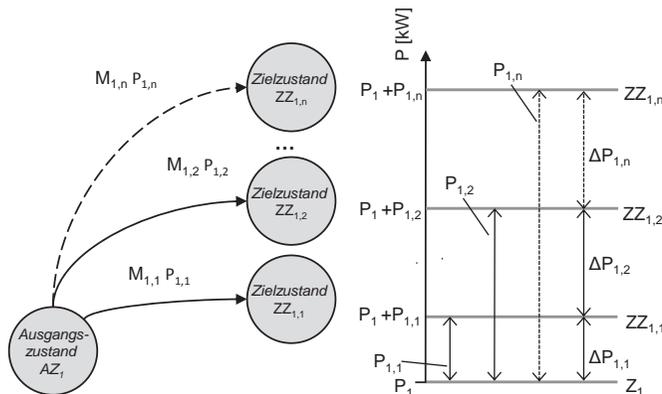


Abbildung 25: Modell zur Identifikation grundlegender Energieflexibilitätsgleichungen

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

Da laut den Axiomen Nr. 1 und 2 die Energieflexibilität bei steigender Anzahl von Zielzuständen sowie bei einer gleichmäßigeren Verteilung der Leistungsbedarfe der Zielzustände steigen soll, wird folgende grundlegende Formel (5.1) für die Bewertung der Energieflexibilität eines Ausgangszustandes herangezogen.

$$E_i = \sum_{m=1}^M \frac{\Delta P_{i,m}(P_{max} - \Delta P_{i,m})}{P_{max}^2} \quad (5.1)$$

mit

$$\Delta P_{i,m} = P_{i,m} - P_{i,m-1}$$

E_i	<i>Energieflexibilität von Ausgangszustand i</i>
i	<i>Index zur Bezeichnung des betrachteten Ausgangszustandes</i>
M	<i>Anzahl Maßnahmen</i>
m	<i>Index zur Bezeichnung der betrachteten Maßnahmen eines Ausgangszustandes</i>
$\Delta P_{i,m}$	<i>Leistungsdifferenz der Zielzustände der Maßnahmen m und $m-1$ von Ausgangszustand i</i>
P_{max}	<i>Maximaler Leistungsbedarf der Produktionsstation</i>

Ausgangspunkt für die Berechnung der Energieflexibilität nach Formel (5.1) ist die Sortierung und Nummerierung der einzelnen M Maßnahmen bzw. Zielzustände, aufsteigend nach der Höhe der Leistungsanpassungen der Maßnahmen bzw. dem Leistungsbedarf des Zielzustands. Anschließend wird die Leistungsdifferenz $\Delta P_{i,m}$ zweier auf dem sich ergebenden Leistungsband benachbarter Zielzustände der Maßnahmen $M_{i,m}$ und $M_{i,m-1}$ mit dem maximalen Leistungsbedarf der Produktionsstation P_{max} zuzüglich der betrachteten Leistungsdifferenz multipliziert. Um die Vergleichbarkeit der Energieflexibilität auch zwischen Produktionsstationen gewährleisten zu können, welche unterschiedliche maximale Leistungsbedarfe aufweisen, wird das Verhältnis der jeweiligen Leistungsdifferenzen zum maximalen Leistungsbedarf berechnet. Die beschriebene Berechnung ist für alle Leistungsdifferenzen zweier benachbarter Zielzustände durchzuführen und daraus die Summe zu bilden.

Das Ergebnis stellt einen einfachen Wert für die Energieflexibilität eines Ausgangszustandes dar. Wie dem Beweis im Anhang zu entnehmen ist, liefert die Formel dimensionslose Werte zwischen 0 und 1, wobei der Wert 1 für maximale Energieflexibilität steht und der Wert 0 nicht vorhandene Energieflexibilität beschreibt. Die Formel setzt dabei voraus, dass der minimale Leistungsbedarf der betrachteten Produktionsstation $P_{min} = 0 \text{ kW}$ ist, d. h. die untersuchte Produkti-

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

onsstation lässt sich abschalten und verbraucht in diesem Zustand auch keine Energie. Ist dies nicht der Fall, muss in Formel (5.1) statt mit P_{max} mit dem Term $P_{max} - P_{min}$ gerechnet werden.

Zur Verdeutlichung der Formel (5.1) sowie den sich ergebenden Energieflexibilitätswerten E_i eines Ausgangszustands AZ_i sind in Abbildung 26 die Zielzustände, ausgehend von drei verschiedenen Ausgangszuständen, dargestellt, die im Folgenden verglichen werden sollen. Die maximale Leistung der Produktionsstation P_{max} beträgt jeweils 12 kW.

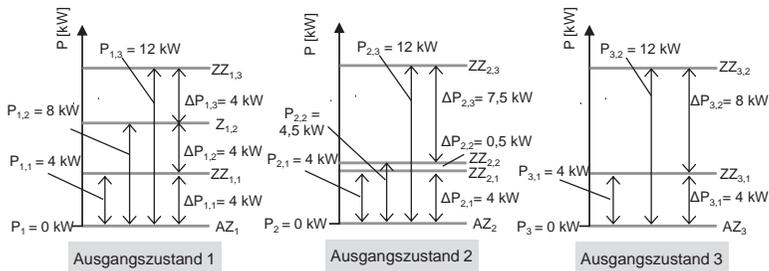


Abbildung 26: Berechnung der Energieflexibilität dreier Ausgangszustände

Die Energieflexibilität der einzelnen Ausgangszustände errechnet sich wie folgt:

$$E_1 = 3 * \frac{4kW * (12kW - 4kW)}{(12kW)^2} = 0,67 \quad (5.2)$$

$$E_2 = \frac{4kW * (12kW - 4kW)}{(12kW)^2} + \frac{0,5kW * (12kW - 0,5kW)}{(12kW)^2} + \frac{7,5kW * (12kW - 7,5kW)}{(12kW)^2} = 0,50 \quad (5.3)$$

$$E_3 = \frac{4kW * (12kW - 4kW)}{(12kW)^2} + \frac{8kW * (12kW - 8kW)}{(12kW)^2} = 0,44 \quad (5.4)$$

Das Beispiel zeigt, wie sich die Energieflexibilität der Ausgangszustände entsprechend der beiden Axiome Nr. 1 und 2 in Abhängigkeit der Anzahl der Zielzustände und ihrer Verteilung ändert. Es zeigt auch, dass sich der Energieflexibilitätswert von Ausgangszustand 2 dem von Ausgangszustand 3 annähert, da die geringe Leistungsdifferenz zwischen den Zielzuständen $ZZ_{2,1}$ und $ZZ_{2,2}$ von Ausgangszustand 2 kaum einen Flexibilitätsgewinn darstellt.

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

Zur Steigerung des weiteren Verständnisses der Formel (5.1) ist in Abbildung 27 der Lösungsraum der grundlegenden Energieflexibilitätsformel dargestellt. Dieser zeigt den Wert der Energieflexibilität eines Ausgangszustandes in Abhängigkeit der Verteilung und der Anzahl der Zielzustände. Als Maß für die Verteilung der Zielzustände dient hierbei folgende einfache Berechnung nach Formel (5.5).

$$V = \sum_{m=1}^M \left(\frac{\Delta P_{i,m}}{P_{max}} - \frac{1}{M} \right)^2 \quad (5.5)$$

- V Verteilung der Zustände eines Systems
 M Anzahl Maßnahmen
 m Index zur Bezeichnung der betrachteten Maßnahmen eines Ausgangszustandes
 $\Delta P_{i,m}$ Leistungsdifferenz der Zielzustände der Maßnahmen m und $m-1$ von Ausgangszustand i
 P_{max} Maximaler Leistungsbedarf der Produktionsstation

Nach Formel (5.5) weisen Systeme mit einer idealen gleichen Verteilung ihrer Zielzustände einen Verteilungswert $V=0$ auf. Je größer der Wert von V demnach wird, desto ungleichmäßiger sind die einzelnen Zielzustände verteilt. Die grafische Darstellung des Lösungsraumes der grundlegenden Energieflexibilitätsformel in Abhängigkeit der Verteilung der Zielzustände zeigt Abbildung 27.

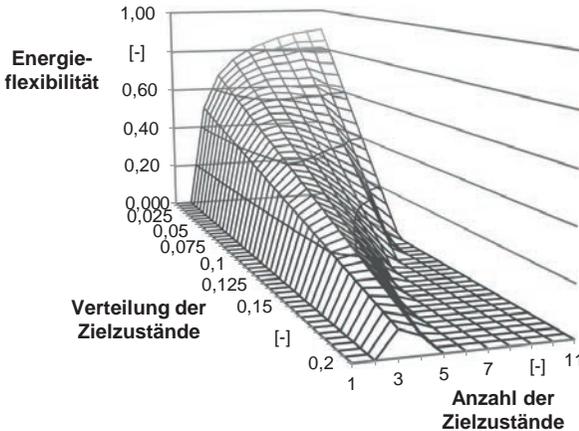


Abbildung 27: Lösungsraum der grundlegenden Energieflexibilitätsformel

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

Der dargestellte Lösungsraum zeigt, dass die Energieflexibilität in Abhängigkeit der Anzahl der Zielzustände bei einem Verteilungswert von $V=0$ einen degressiven Verlauf aufweist. Bereits ab einer Anzahl von 6 Zielzuständen errechnet sich die Energieflexibilität zu $E=0,8$ (bei $V=0$), d. h. die Anzahl der Zielzustände verliert bei einer steigenden Anzahl an Bedeutung. Dies lässt sich damit begründen, dass ab einer Anzahl von etwa 6 Zielzuständen ausreichend viele Wahlmöglichkeiten zur Anpassung des Energiebedarfs zur Verfügung stehen und weitere Zielzustände bzw. Maßnahmen die Variabilität nur geringfügig erhöhen. Der dargestellte Lösungsraum zeigt auch, wie die Energieflexibilität bei sinkender Gleichverteilung der Zielzustände linear gegen 0 fällt. Die in Abbildung 27 bei zunehmender Anzahl an Zielzuständen stärker in Abhängigkeit der Zustandsverteilung fallenden Kurven lassen sich damit erklären, dass bei einer größeren Anzahl an Zielzuständen die Leistungsdifferenzen zwischen den Zielzuständen weniger großen Schwankungen unterliegen können. Somit sind große Verteilungswerte der Zustände von z. B. $V=0,17$ bei einer Anzahl an Zielzuständen von $M>7$ nicht möglich.

Bei Betrachtung des Lösungsraums lässt sich ein weiterer Sachverhalt erkennen. Ausgangszustände, welche nur einen einnehmbaren Zielzustand bzw. nur eine Maßnahme besitzen, weisen nach Formel (5.1) eine Energieflexibilität von $E=0$ auf. Da aber eine Energieflexibilität von $E=0$ bedeutet, dass sich die Produktionsstation in diesem Ausgangszustand nicht auf Änderungen des Energiemarktes anpassen kann, spiegelt das Ergebnis der Formel (5.1) nicht exakt die Energieflexibilität wider. Eine Produktionsstation mit nur zwei Zuständen, d. h. jeweils einen Ausgangs- und einen Zielzustand, wie z. B. den Zuständen „an“ und „aus“, lässt sich in den jeweiligen Ausgangszuständen an- bzw. abschalten und bietet somit die Möglichkeit zur Anpassung ihres Energiebedarfs. Daher soll die Formel (5.1) dahingehend erweitert werden, dass Ausgangszustände mit einem Zielzustand eine gewisse Energieflexibilität aufweisen, der maximal mögliche Wert für die Energieflexibilität aber weiterhin bei 1 liegt. Dabei ist davon auszugehen, dass der Nutzen einer Maßnahme für die Stabilisierung des Stromnetzes umso größer ist, je höher die erzielte Leistungsänderung ist. Für das Unternehmen selbst lassen sich daher auch bei steigenden Leistungsänderungen einer Maßnahme höhere Kosteneinsparungen bzw. Vergütungen erzielen. Eine Produktionsstation, welche sich nur an- bzw. abschalten lässt, kann somit dennoch eine ausreichende Energieflexibilität aufweisen. Aus diesem Grund soll Formel (5.1) dahingehend erweitert werden, dass ein Ausgangszustand, welcher nur einen einnehmbaren Zielzustand bzw. nur eine Maßnahme besitzt, eine Energieflexibilität von 0,5 aufweist, siehe Formel (5.6).

$$E_i = 0,5 \left(\sum_{m=1}^M \frac{\Delta P_{i,m} (P_{max} - \Delta P_{i,m})}{P_{max}^2} + \sum_{m=1}^M \frac{\Delta P_{i,m}}{P_{max}^2} \right) \quad (5.6)$$

mit

$$\Delta P_{i,m} = P_{i,m} - P_{i,m-1}$$

E_i Energieflexibilität von Ausgangszustand i

i Index zur Bezeichnung des betrachteten Ausgangszustandes

M Anzahl Maßnahmen

m Index zur Bezeichnung der betrachteten Maßnahmen eines Ausgangszustandes

$\Delta P_{i,m}$ Leistungsdifferenz der Zielzustände der Maßnahmen m und $m-1$ von Ausgangszustand i

P_{max} Maximaler Leistungsbedarf der Produktionsstation

Der sich ergebende neue Lösungsraum der Formel (5.6) ist in Abbildung 28 dargestellt.

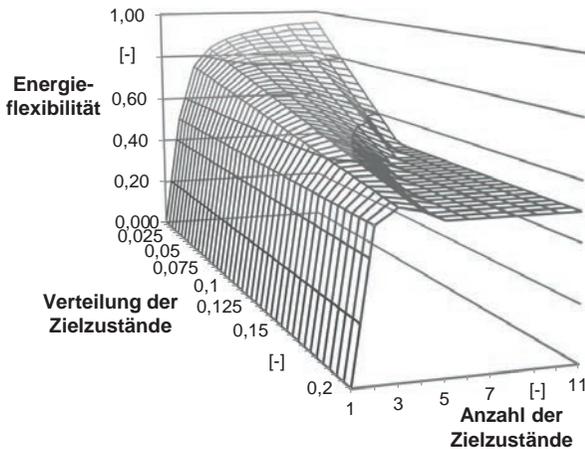


Abbildung 28: Lösungsraum der erweiterten Energieflexibilitätsformel

Da bei der Bewertung der Energieflexibilität Zielzustände bzw. Maßnahmen berücksichtigt werden müssen, welche sowohl eine Leistungserhöhung als auch eine Leistungsminderung ermöglichen, muss die identifizierte Formel (5.6) entsprechend erweitert werden. Dies geschieht mithilfe von Formel (5.7). Hierbei werden ausgehend vom Ausgangszustand die Anzahl der Maßnahmen M^+ be-

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

rücksichtigt, welche eine Erhöhung des Leistungsbedarfs der Produktionsstation bewirken. Ebenso finden die Anzahl der Maßnahmen M^- Berücksichtigung, welche eine Absenkung des Leistungsbedarfs der Produktionsstation nach sich ziehen.

$$E_i = 0,5 \left(\sum_{m^+=1}^{M^+} \frac{(P_{max} - \Delta P_{i,m^+}) \Delta P_{i,m^+}}{P_{max}^2} + \sum_{m^+=1}^{M^+} \frac{\Delta P_{i,m^+}}{P_{max}} + \sum_{m^-=1}^{M^-} \frac{(P_{max} - \Delta P_{i,m^-}) \Delta P_{i,m^-}}{P_{max}^2} + \sum_{m^-=1}^{M^-} \frac{\Delta P_{i,m^-}}{P_{max}} \right) \quad (5.7)$$

mit

$$\Delta P_{i,m} = P_{i,m} - P_{i,m-1}$$

E_i	<i>Energieflexibilität von Ausgangszustand i</i>
i	<i>Index zur Bezeichnung des betrachteten Ausgangszustandes</i>
M^+	<i>Anzahl Maßnahmen mit positiver Leistungsänderung</i>
m^+	<i>Index zur Bezeichnung der betrachteten Maßnahmen eines Ausgangszustandes, welche eine Leistungserhöhung zur Folge haben</i>
P_{max}	<i>Maximaler Leistungsbedarf der Produktionsstation</i>
$\Delta P_{i,m}$	<i>Leistungsdifferenz der Zielzustände der Maßnahmen m und $m-1$ von Ausgangszustand i</i>
M^-	<i>Anzahl Maßnahmen mit negativer Leistungsänderung</i>
m^-	<i>Index zur Bezeichnung der betrachteten Maßnahmen eines Ausgangszustandes, welche eine Leistungsminderung zur Folge haben</i>

5.3.2 Ermittlung von zeitlichen und monetären Gewichtungsfaktoren nach den Axiomen Nr. 3-6

5.3.2.1 Erläuterung der Gewichtungslogik

Aus den Axiomen Nr. 3-6 lässt sich ableiten, dass sich einnehmbara Zielzustände eines Systems u. U. nicht positiv auf dessen Energieflexibilität auswirken, wenn bestimmte zeitliche und monetäre Kennwerte der zur Zustandserreichung nötigen Maßnahmen überschritten werden. Dieser Sachverhalt soll im Rahmen der Bewertung in Form von Faktoren berücksichtigt werden, welche die einzelnen Maßnahmen und damit Zielzustände in Abhängigkeit ihrer Nutzbarkeit für die Energieflexibilität gewichten. Auf diese Weise sollen die Axiome Nr. 3-6 und somit die beiden Flexibilitätsdimensionen Zeit und Kosten Eingang in das Bewertungsvorgehen finden.

Die Gewichtungsfaktoren sind dabei so zu gestalten, dass eine Maßnahme bzw. ein Zielzustand, welcher vollständig flexibilitätssteigernd wirkt, mit einem Faktor der Größe 1 gewichtet wird. Eine Maßnahme bzw. ein Zielzustand, welcher im Rahmen der Energieflexibilität nicht genutzt werden kann, weil z. B. ein Wechsel in diesen Zielzustand nicht wirtschaftlich ist, soll hingegen mit einem Faktor der Größe 0 gewichtet werden. Um eine dedizierte Bewertung der einzelnen Maßnahmen vornehmen zu können, sollen darüber hinaus alle Werte zwischen den Größen 0 und 1 zugelassen sein.

5.3.2.2 Entwicklung des Gewichtungsfaktors für Axiom Nr. 3

Das abgeleitete Energieflexibilitätsaxiom Nr. 3 besagt, dass je schneller bzw. langsamer ein Wechsel zwischen Zuständen eines Systems durchgeführt werden kann, desto flexibler bzw. unflexibler ist es. D. h., kann ein Wechsel von einem Ausgangs- zu einem Zielzustand nicht schnell genug vollzogen werden bzw. die Maßnahme nicht schnell genug aktiviert werden, so steht der Zielzustand im Rahmen der Energieflexibilität nicht zur Verfügung bzw. wirkt sich nicht flexibilitätssteigernd aus. Ziel dieses Abschnittes ist es daher, einen Gewichtungsfaktor zu entwickeln, der diesen Sachverhalt entsprechend berücksichtigt. Dabei ist auch die Deaktivierung der Maßnahme zu berücksichtigen, d. h. der Wechsel vom Zielzustand in den Ausgangszustand zurück.

Die Ausführungen in Abschnitt 2.5.3 haben gezeigt, dass unterschiedliche Strompreismodelle andere Reaktionszeiten erfordern. So beträgt z. B. die maximal zulässige Zustandswechselzeit – d. h. die Aktivierungs- und die Deaktivierungsdauer – bei der Minutenreserve 15 Minuten. Kann ein System einen Zustandswechsel schneller durchführen, so wirkt dies nicht weiter flexibilitätssteigernd, langsamere Zustandswechselzeiten senken dagegen die Energieflexibilität. Dabei ist zwischen Wechselzeiten in einen Zielzustand und Wechselzeiten aus einem Zielzustand heraus zu unterscheiden. Dies entspricht der Zeit für die Aktivierung bzw. Deaktivierung einer Maßnahme (vgl. hierzu Abschnitt 2.3.3 und Abschnitt 5.2).

Nach der Forderung, dass die zu entwickelnden Faktoren zwischen 0 und 1 liegen sollen, bedeutet dies, dass Zustandswechselzeiten in Höhe der geforderten Reaktionszeit einen Faktor der Größe 1 ergeben müssen und der Faktor mit steigenden Zustandswechselzeiten gegen 0 sinken soll. Da aber auch bei vergleichsweise statischen Preismodellen, wie z. B. den TOU-Tarifen, die Strompreise von einer Stunde auf die andere wechseln, sind auch hier schnelle Wechselzeiten

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

gefordert. Daraus lässt sich ableiten, dass die Funktion des Gewichtungsfaktors einen möglichst regressiven Verlauf aufweisen muss (GRASSL & REINHART 2014). Einen Faktor, welcher diesen Forderungen genügt, zeigt Formel (5.8).

$$\alpha_{i,m}^{akt} = \begin{cases} 1, & t_{i,m}^{akt} < t_{grenz}^{akt} \\ \frac{t_{grenz}^{akt}}{t_{i,m}^{akt}}, & t_{i,m}^{akt} \geq t_{grenz}^{akt} \end{cases} \quad (5.8)$$

$\alpha_{i,m}^{akt}$ Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der Aktivierungsdauer der Maßnahme m von Ausgangszustand i
 $t_{i,m}^{akt}$ Aktivierungsdauer der Maßnahme m von Ausgangszustand i
 t_{grenz}^{akt} Geforderte Aktivierungsdauer einer Maßnahme

Die Indizierung des Faktors bezieht sich dabei auf den Ausgangszustand AZ_i der Produktionsstation und die Maßnahme $M_{i,m}$, welche in diesem Zustand zur Verfügung steht. Der Faktor $\alpha_{2,3}^{akt}$ gewichtet somit z. B. die Aktivierungsdauer der Maßnahme 3, welche im Ausgangszustand 2 der Produktionsstation zur Verfügung steht.

Die Ermittlung des Gewichtungsfaktors für die Deaktivierungsdauer $\alpha_{i,m}^{deakt}$ erfolgt dabei ebenfalls nach Formel (5.8), unter Berücksichtigung der Deaktivierungsdauer $t_{i,m}^{deakt}$ statt der Aktivierungsdauer $t_{i,m}^{akt}$ der Maßnahme. Bei $t_{grenz}^{akt} = 15 \text{ min}$ ergibt sich folgende grafische Auswertung von $\alpha_{i,m}^{akt}$ bzw. $\alpha_{i,m}^{deakt}$, siehe Abbildung 29.

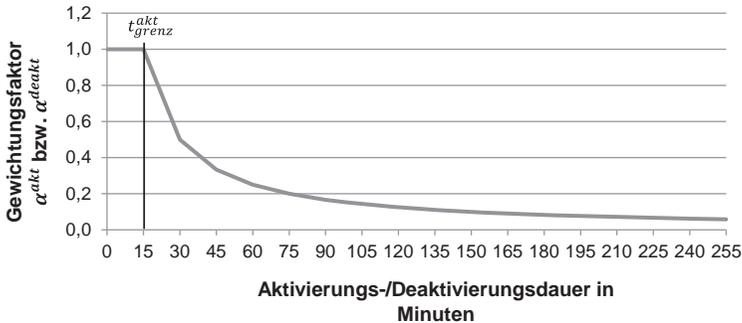


Abbildung 29: Darstellung des Gewichtungsfaktors zur Berücksichtigung der Aktivierungs- bzw. Deaktivierungsdauer der Maßnahme

5.3.2.3 Entwicklung des Gewichtungsfaktor für die Energieflexibilitätsaxiome Nr. 4 und Nr. 5

Die Energieflexibilitätsaxiome Nr. 4 und 5 besagen, dass je kürzer bzw. länger die minimale bzw. maximale Verweildauer der Zustände eines Systems sind, desto flexibler bzw. unflexibler ist es. Die minimale bzw. die maximale Verweildauer haben dabei darauf Einfluss, wie lange ein Zustand eingenommen werden muss bzw. kann, d. h. wie lange von einem günstigen Strompreis profitiert werden kann. Dabei steigt der Nutzen einer besonders kurzen minimalen bzw. besonders langen maximalen Verweildauer für die Energieflexibilität nicht beliebig. So muss z. B. die maximale Verweildauer nur so lange sein, dass von der durchschnittlichen Dauer einzelner Strompreisniveaus profitiert werden kann. Weist ein System längere maximale Verweildauern auf, so dienen sie nicht der Energieflexibilität. Auf der anderen Seite wirken sich zu lange minimale bzw. zu kurze maximale Verweildauern negativ auf die Energieflexibilität aus, da in diesem Falle von zeitweise niedrigen Strompreisen nicht ausreichend lange profitiert werden kann. Auf Basis dieser Überlegungen kann der Faktor zur Gewichtung der minimalen Verweildauer einer Maßnahme $M_{i,m}$ des Ausgangszustandes AZ_i nach folgender Formel (5.9) errechnet werden.

$$\alpha_{i,m}^{min} = \begin{cases} 0, & t_{i,m}^{min} > t_{grenz_o}^{min} \\ \frac{t_{grenz_o}^{min} - t_{i,m}^{min}}{t_{grenz_o}^{min} - t_{grenz_u}^{min}}, & t_{grenz_u}^{min} \leq t_{i,m}^{min} \leq t_{grenz_o}^{min} \\ 1, & t_{i,m}^{min} < t_{grenz_u}^{min} \end{cases} \quad (5.9)$$

$\alpha_{i,m}^{min}$ Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der minimalen Verweildauer der Maßnahme m von Ausgangszustand i

$t_{i,m}^{min}$ Minimale Verweildauer der Maßnahme m von Ausgangszustand i

$t_{grenz_o}^{min}$ Minimal geforderte minimale Verweildauer einer Maßnahme

$t_{grenz_u}^{min}$ Maximal geforderte minimale Verweildauer einer Maßnahme

Hierbei stellt der Faktor $t_{grenz_u}^{min}$ die untere Zeitschranke dar, ab welchen eine weitere Verkürzung der minimalen Verweildauer keine Steigerung der Energieflexibilität nach sich zieht. Der Faktor $t_{grenz_o}^{min}$ kennzeichnet dagegen die obere Zeitschranke, ab welcher von der jeweiligen Maßnahme nicht weiter profitiert werden kann, da sie länger aufrechterhalten werden muss, als sich die Strompreise im Schnitt zeitlich ändern. In folgender Abbildung 30 ist die Funktion der Formel (5.9) grafisch dargestellt. Dabei wurde beispielhaft der Faktor

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

$t_{grenz_u}^{min}$ gleich 15 Minuten und der Faktor $t_{grenz_o}^{min}$ gleich 4 Stunden – wie bei der Minutenreserve gefordert, siehe Abschnitt 2.5.3 – gesetzt.

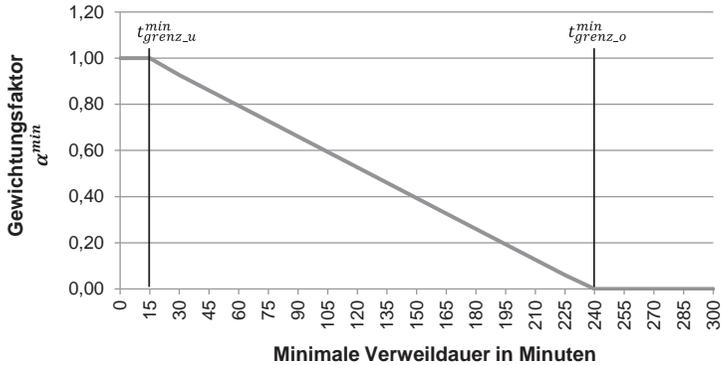


Abbildung 30: Darstellung des Gewichtungsfaktors zur Berücksichtigung der minimalen Verweildauer der Maßnahme

Analog zu den Überlegungen zur minimalen Verweildauer lässt sich der Faktor zur Gewichtung der maximalen Verweildauer $\alpha_{i,m}^{max}$ einer Maßnahme $M_{i,m}$ des Ausgangszustandes AZ_i nach folgender Formel (5.10) errechnen.

$$\alpha_{i,m}^{max} = \begin{cases} 0, & t_{i,m}^{max} < t_{grenz_u}^{max} \\ \frac{t_{i,m}^{max} - t_{grenz_u}^{max}}{t_{grenz_o}^{max} - t_{grenz_u}^{max}}, & t_{grenz_u}^{max} \leq t_{i,m}^{max} \leq t_{grenz_o}^{max} \\ 1, & t_{i,m}^{max} > t_{grenz_o}^{max} \end{cases} \quad (5.10)$$

- $\alpha_{i,m}^{max}$ Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der maximalen Verweildauer der Maßnahme m von Ausgangszustands i
- $t_{i,m}^{max}$ Maximale Verweildauer der Maßnahme m von Ausgangszustand i
- $t_{grenz_u}^{max}$ Minimal geforderte maximale Verweildauer einer Maßnahme
- $t_{grenz_o}^{max}$ Maximal geforderte maximale Verweildauer einer Maßnahme

Hierbei stellen die Faktoren $t_{grenz_u}^{max}$ sowie $t_{grenz_o}^{max}$ ebenfalls die unteren und oberen Zeitschranken dar, ab welcher sich der Einfluss auf die Energieflexibilität nicht mehr ändert. Die grafische Darstellung der Formel (5.10) zeigt Abbildung 31. Der Faktor $t_{grenz_u}^{max}$ wurde dabei wie im Beispiel aus Abbildung 30 gleich 15 Minuten und der Faktor $t_{grenz_o}^{max}$ gleich 4 Stunden gesetzt.

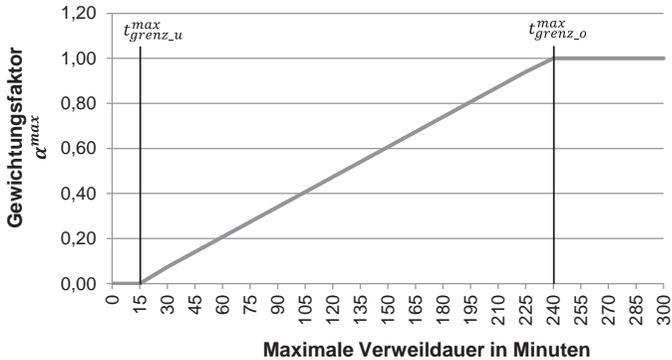


Abbildung 31: Darstellung des Gewichtungsfaktors zur Berücksichtigung der maximalen Verweildauer der Maßnahme

5.3.2.4 Entwicklung des Gewichtungsfaktor für Axiom Nr. 6

In diesem Abschnitt soll der Gewichtungsfaktor entwickelt werden, welcher das Energieflexibilitätsaxiom Nr. 6 berücksichtigt, wonach ein System umso flexibler/unflexibler ist, je günstiger/teurer ein Wechsel zwischen den Zuständen eines Systems ist bzw. die Ausführung einer Maßnahme ist. Dabei ist allerdings festzuhalten, dass die Einsparungen, welche sich aus energieflexiblem Verhalten erzielen lassen, stark vom jeweiligen Strompreismodell abhängen. Je variabler das Strompreismodell ist, desto größer sind i. d. R. auch die Strompreisschwankungen und desto größere Stromkosteneinsparungen lassen sich verwirklichen. Dies bedeutet aber, dass einzelne Maßnahmen, die bei einem vergleichsweise starren Strompreismodell unwirtschaftlich sind, weil die Aufwendungen für die Maßnahme größer als die Einsparungen sind, bei einem anderen Strompreismodell hingegen wirtschaftlich sein können. Eine Berücksichtigung der Kosten im Rahmen der Bewertung der Energieflexibilität kann somit nicht ohne Einbeziehung des Strompreismodells erfolgen (GRASSL & REINHART 2014). Dabei ist zwischen zeitbasierten Tarifen und anreizorientierten Programmen zu unterscheiden (vgl. Abschnitt 2.5.3).

Zeitbasierte Tarife

Für jedes Strompreismodell der zeitbasierten Tarife lässt sich ein mittlerer Strompreis ermitteln. Eine Anpassung des Strombedarfs im Rahmen der Energie-

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

flexibilität wird dann erfolgen, wenn der temporär geltende Strompreis von dem mittleren Strompreis des Preismodells eine gewisse Abweichung aufweist. Die Höhe der Abweichung, ab der das Unternehmen seinen Energiebedarf anpassen wird, hängt dabei von drei Faktoren ab, der Schwankungsbreite und -dauer der Strompreise sowie der Renditeforderung des Unternehmens.

Wie bereits in Abschnitt 2.5.3 erläutert, existieren Strompreismodelle, welche schwankende Strompreise aufweisen, wobei aber die einzelnen Strompreisniveaus festgeschrieben sind (z. B. TOU-Tarife). Die Höhe der Abweichung, ab der das Unternehmen seinen Energiebedarf anpassen wird, muss daher innerhalb der Schwankungsbreite der Strompreise des Preismodells liegen.

Neben der Schwankungsbreite ist aber auch die Dauer der Abweichung vom mittleren Strompreis von Relevanz. Während bei RTP-Tarifen die Strompreise oft stündlich oder noch schneller schwanken, werden bei weniger dynamischen Tarifen, wie z. B. den TOU-Tarifen, einzelne Strompreisniveaus für mehrere Stunden eingenommen. Die durch einen Zustandswechsel möglichen Einsparungen ergeben sich somit über die Dauer eines Strompreisniveaus und der Höhe der Abweichung des Strompreises vom mittleren Strompreis.

Des Weiteren sind die Renditeforderungen des Unternehmens bei der Wahl der Strompreisgrenze, ab der das Unternehmen seinen Energiebedarf anpassen wird, von Relevanz. Ziel energieflexiblen Verhaltens ist es, Energiekosten einzusparen. Hierbei müssen die Einsparungen aus dem energieflexiblen Verhalten die Kosten der Zustandsänderungen übertreffen. Je nach Renditeforderung des Unternehmens können u. U. auch teurere Maßnahmen umgesetzt werden, selbst wenn der erzielte Gewinn nur gering ist. Andere Unternehmen erwarten dagegen höhere Gewinne durch energieflexibles Verhalten.

Die durchschnittlichen Kosteneinsparungen aus einem variablen Strompreismodell je verschobener Leistungseinheit lassen sich somit folgendermaßen nach Formel (5.11) ermitteln.

$$\bar{K}^E = \bar{t}^E \bar{k}^E \delta \quad (5.11)$$

\bar{K}^E	<i>Durchschnittliche Einsparungen je kW/MW unter Berücksichtigung der Renditeforderungen des Unternehmens</i>
\bar{t}^E	<i>Durchschnittliche Zeitdauer eines Strompreisniveaus bzw. eines Events</i>
\bar{k}^E	<i>Mittlerer Strompreis</i>
δ	<i>Preisschranke zur Nutzung der Energieflexibilität</i>

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

Im Folgenden soll die Logik der Formel (5.11) anhand der Spotmarktpreise der EEX aus dem Jahre 2012, dargestellt in Abbildung 32, verdeutlicht werden.

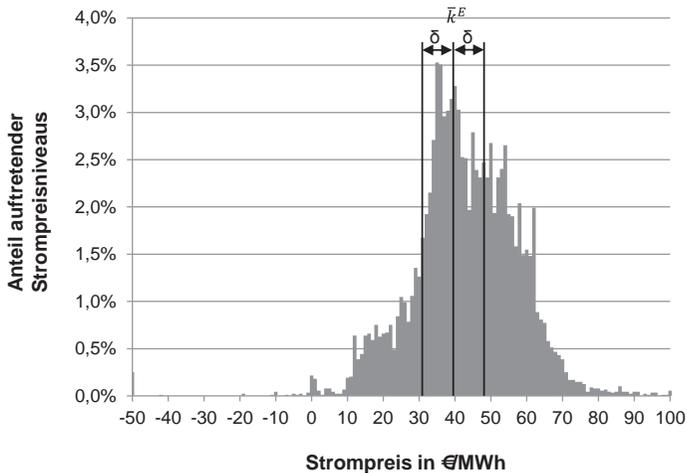


Abbildung 32: Histogramm der Spotmarktpreise 2012 nach EEX (2013)

Das Histogramm der Spotmarktpreise der EEX aus dem Jahr 2012 zeigt, dass die Preise für eine MWh Strom bis auf wenige Ausnahmen zwischen 10 und 80 € schwanken. Der mittlere Strompreis \bar{k}^E errechnet sich dabei zu 40,89 €/MWh, wobei die Dauer eines Strompreisniveaus $\bar{t}^E=60$ min ist. Ein Unternehmen, welches einen Faktor δ von 20 % ansetzt, passt in der Regel seinen Energiebedarf bei einem temporären Strompreis von $<32,71$ €/MWh bzw. $>49,07$ €/MWh an.

Aus diesen Überlegungen heraus lässt sich der Kostenfaktor $\alpha_{i,m}^k$ für zeitbasierte Tarife nach folgender Formel (5.12) ermitteln, indem die erwarteten Einsparungen mit den erwarteten Kosten $K_{i,m}$ einer Maßnahme ins Verhältnis gesetzt werden. Sind die Kosten der Maßnahme größer als die zu erwartenden Kosteneinsparungen, so ist der Faktor $\alpha_{i,m}^k$ gleich 0 zu setzen. Andernfalls ist $\alpha_{i,m}^k$ umso größer, je kleiner die Kosten für die Maßnahme sind bzw. je größer die zu erwartenden Einsparungen sind. Die Renditeforderungen des Unternehmens können dabei durch einen Anpassungsfaktor r berücksichtigt werden.

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

$$\alpha_{i,m}^k = \begin{cases} 0, & K_{i,m} > \bar{t}^E * \bar{k}^E * \delta * P_{i,m} \\ 1 - \left(\frac{K_{i,m}}{\bar{t}^E * \bar{k}^E * \delta * P_{i,m}} \right)^r, & K_{i,m} \leq \bar{t}^E * \bar{k}^E * \delta * P_{i,m} \end{cases} \quad (5.12)$$

- $\alpha_{i,m}^k$ Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der Kosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i
- $K_{i,m}$ Kosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i
- \bar{t}^E Durchschnittliche Zeitdauer eines Strompreisniveaus bzw. eines Events
- \bar{k}^E Mittlerer Strompreis
- δ Preisschranke zur Nutzung der Energieflexibilität
- $P_{i,m}$ Leistungsänderung der Maßnahmen m von Ausgangszustand i
- r Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung der Renditeforderungen des Unternehmens

Anreizorientierte Programme

Im Rahmen der anreizorientierten Programme werden Vergütungen für das Anpassen und Vorhalten von Leistungsänderungen gezahlt. Die Einsparungen, die sich durch energieflexibles Verhalten bei den anreizorientierten Programmen erzielen lassen, richten sich daher nach der Höhe der durchschnittlichen Vergütungen – resultierend aus Arbeits- und Leistungspreis – und nicht nach der Abweichung vom Durchschnittsstrompreisniveau. Der Gewichtungsfaktor $\alpha_{i,m}^k$ muss daher bei den anreizorientierten Programmen nach Formel (5.13) folgendermaßen angepasst werden.

$$\alpha_{i,m}^k = \begin{cases} 0, & K_{i,m} > \bar{t}^E * \bar{k}_W^E * P_{i,m} + \bar{k}_P^E * P_{i,m} \\ 1 - \left(\frac{K_{i,m}}{\bar{t}^E * \bar{k}_W^E * P_{i,m} + \bar{k}_P^E * P_{i,m}} \right)^r, & K_{i,m} \leq \bar{t}^E * \bar{k}_W^E * P_{i,m} + \bar{k}_P^E * P_{i,m} \end{cases} \quad (5.13)$$

- $\alpha_{i,m}^k$ Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der Kosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i
- $K_{i,m}$ Kosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i
- \bar{t}^E Durchschnittliche Zeitdauer eines Strompreisniveaus bzw. eines Events
- \bar{k}_W^E Durchschnittlicher gezahlter Arbeitspreis des anreizbasierten Programms
- $P_{i,m}$ Leistungsänderung der Maßnahmen m von Ausgangszustand i
- \bar{k}_P^E Durchschnittlicher gezahlter Leistungspreis des anreizbasierten Programms
- r Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung der Renditeforderungen des Unternehmens

Die grafische Darstellung des Gewichtungsfaktors $\alpha_{i,m}^k$ in Abhängigkeit des Verhältnisses der Maßnahmenkosten zu den durchschnittlichen Kosteneinsparungen zeigt Abbildung 33. Hierbei wurde $r=2$ gesetzt.

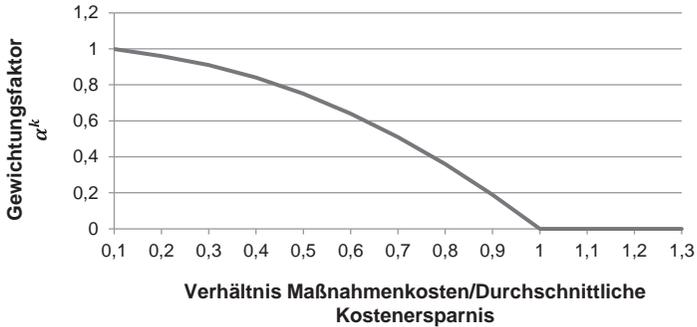


Abbildung 33: Darstellung des Gewichtungsfaktors zur Berücksichtigung der Kosten der Maßnahme

5.3.2.5 Ermittlung eines Gesamtgewichtungsfaktors

Im vorangegangenen Abschnitt wurden Faktoren entwickelt, mithilfe derer die Wirkungsweise einer einzelnen Maßnahme auf die Energieflexibilität berücksichtigt werden kann. Dabei wurde für jedes der beschriebenen Energieflexibilitätsaxiome Nr. 3 bis Nr. 6 jeweils ein Gewichtungsfaktor erarbeitet. Diese einzelnen Faktoren gilt es zu einem Gesamtfaktor zusammenzuführen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei Überschreitung von bestimmten Grenzwerten einzelner Faktoren die Maßnahme zur Anpassung des Energiebedarfs nicht geeignet ist. So ist eine Maßnahme, welche sehr kurze De- bzw. Aktivierungsdauern sowie lange maximale Verweildauern bzw. kurze minimale Verweildauern aufweist, dennoch nicht geeignet zur Nutzung im Rahmen der Energieflexibilität und wirkt somit nicht energieflexibilitätssteigernd, wenn die Kosten für die Maßnahme größer als die durchschnittlichen Einsparungen sind (vgl. Abschnitt 5.3.2.4). Aus diesem Grund sollen die einzelnen Faktoren nach folgender Formel (5.14) zu einem Gesamtgewichtungsfaktor zusammengeführt werden.

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

$$\alpha_{i,m} = \alpha_{i,m}^{deakt} * \alpha_{i,m}^{akt} * \alpha_{i,m}^{min} * \alpha_{i,m}^{max} * \alpha_{i,m}^k \quad (5.14)$$

$\alpha_{i,m}$	<i>Gewichtungsfaktor der Maßnahme m von Ausgangszustands i</i>
$\alpha_{i,m}^{deakt}$	<i>Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der Deaktivierungsdauer der Maßnahme m von Ausgangszustands i</i>
$\alpha_{i,m}^{akt}$	<i>Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der Aktivierungsdauer der Maßnahme m von Ausgangszustands i</i>
$\alpha_{i,m}^{min}$	<i>Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der minimalen Verweildauer der Maßnahme m von Ausgangszustands i</i>
$\alpha_{i,m}^{max}$	<i>Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der maximalen Verweildauer der Maßnahme m von Ausgangszustands i</i>
$\alpha_{i,m}^k$	<i>Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der Kosten der Maßnahme m von Ausgangszustands i</i>

Die Gewichtung einzelner Maßnahmen eines Zustandes nach Formel (5.14) bewirkt dabei eine Berücksichtigung des bereits erläuterten Sachverhalts, sodass eine Maßnahme nur dann energieflexibilitätssteigernd wirkt, wenn alle geforderten Energieflexibilitätsaxiome Nr. 3 bis Nr 6 eingehalten werden, d. h. die zugehörigen Gewichtungsfaktoren jeweils größer als 0 sind.

5.3.3 Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität von Ausgangszuständen nach den Axiomen Nr. 1-6

In diesem Abschnitt soll die im Abschnitt 5.3.1 identifizierte Formel zur Bewertung der Energieflexibilität eines Ausgangszustandes unter Berücksichtigung des im vorangegangenen Abschnitt abgeleiteten Gewichtungsfaktors für Maßnahmen bzw. Zielzustände weiterentwickelt werden. Dabei zeigt Formel (5.15) die einfachste Möglichkeit, die Zielzustände aufbauend auf Formel (5.6) mit den Faktoren $\alpha_{i,m}$ zu gewichten.

$$E_i = 0,5 \left(\sum_{m^+=1}^{M^+} \frac{\alpha_{i,m}(P_{max} - \Delta P_{i,m^+}) \Delta P_{i,m^+}}{P_{max}^2} + \sum_{m^+=1}^{M^+} \frac{\alpha_{i,m} \Delta P_{i,m^+}}{P_{max}} + \sum_{m^-=1}^{M^-} \frac{\alpha_{i,m}(P_{max} - \Delta P_{i,m^-}) \Delta P_{i,m^-}}{P_{max}^2} + \sum_{m^-=1}^{M^-} \frac{\alpha_{i,m} \Delta P_{i,m^-}}{P_{max}} \right) \quad (5.15)$$

mit

$$\Delta P_{i,m} = P_{i,m} - P_{i,m-1}$$

E_i	<i>Energieflexibilität von Ausgangszustand i</i>
i	<i>Index zur Bezeichnung des betrachteten Ausgangszustandes</i>

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

$\alpha_{i,m}$	Gewichtungsfaktor der Maßnahme m von Ausgangszustand i
M^+	Anzahl Maßnahmen mit positiver Leistungsänderung
m^+	Index zur Bezeichnung der betrachteten Maßnahmen eines Ausgangszustandes, welche eine Leistungserhöhung zur Folge haben
P_{max}	Maximaler Leistungsbedarf der Produktionsstation
$\Delta P_{i,m}$	Leistungsdifferenz der Zielzustände der Maßnahmen m und $m-1$ von Ausgangszustand i
M^-	Anzahl Maßnahmen mit negativer Leistungsänderung
m^-	Index zur Bezeichnung der betrachteten Maßnahmen eines Ausgangszustandes, welche eine Leistungsminderung zur Folge haben

Hierbei werden die einzelnen Leistungsdifferenzen der Zielzustände der Maßnahmen mit den Gewichtungsfaktoren $\alpha_{i,m}$ multipliziert. Allerdings führt dieses Vorgehen zu Ergebnissen, welche die Energieflexibilität nicht korrekt wiedergeben. Dieser Sachverhalt soll anhand eines Beispiels, dargestellt in Abbildung 34, erläutert werden.

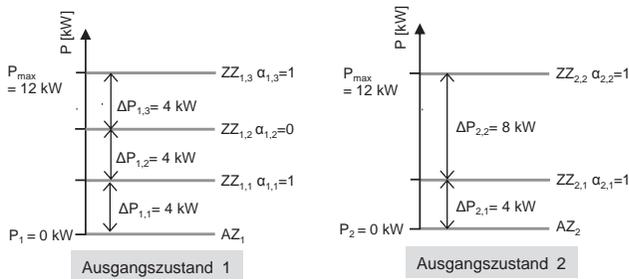


Abbildung 34: Einfaches Beispiel zur ganzheitlichen Berechnung der Energieflexibilität

Die beiden dargestellten Ausgangszustände weisen nahezu identische Zielzustände auf. Sie unterscheiden sich lediglich dahingehend, dass Ausgangszustand 1 eine Maßnahme und damit einen Zielzustand mehr als Ausgangszustand 2 aufweist. Nach den Axiomen Nr. 1 und 3 muss Ausgangszustand 1 daher energieflexibler als Ausgangszustand 2 sein. Allerdings zeigen die Gewichtungsfaktoren der einzelnen Maßnahmen, dass für Ausgangszustand 1 die zusätzliche Maßnahme $M_{1,2}$ aufgrund des Faktors $\alpha_{1,2} = 0$ nicht zur Anpassung des Energiebedarfs herangezogen werden kann, weil z. B. die Kosten der Maßnahme zu hoch sind. Der Zielzustand, welcher durch die Maßnahme $M_{1,2}$ eingenommen werden kann, wirkt somit nicht flexibilitätssteigernd. Ausgangszustand 1 muss daher die selbe Energieflexibilität aufweisen wie Ausgangszustand 2. Eine Be-

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

rechnung der beiden Energieflexibilitätswerte nach Formel (5.15) liefert allerdings folgende Ergebnisse:

$$E_1 = 0,56 \quad (5.16)$$

$$E_2 = 0,72 \quad (5.17)$$

Es zeigt sich, dass nach Formel (5.15) für Ausgangszustand 1 nicht der gleiche, sondern ein niedrigerer Energieflexibilitätswert errechnet wird als für Ausgangszustand 2. Dies lässt sich mithilfe der in Abbildung 35 dargestellten Visualisierung der Berechnungsergebnisse erklären.

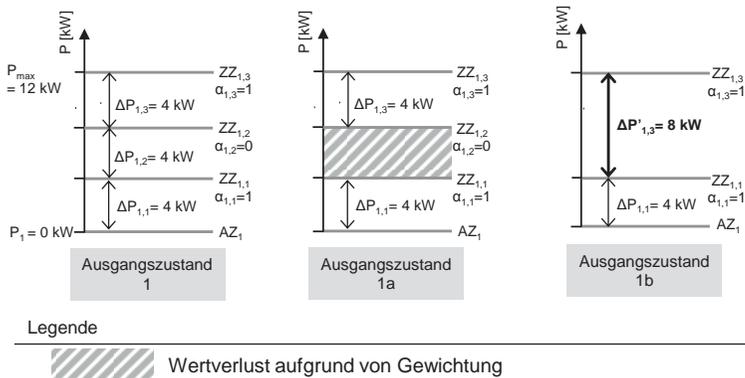


Abbildung 35: Erläuternde Darstellung der Formel (5.15)

Das Multiplizieren der Leistungsdifferenzen der Zielzustände der Maßnahmen $M_{i,m}$ und $M_{i,m-1}$ mit den Gewichtungsfaktoren $\alpha_{i,m}$ führt nach Formel (5.15) dazu, dass im Extremfall, d. h. $\alpha_{i,m} = 0$, der Wert der Leistungsdifferenz $\frac{\alpha_{i,m} \Delta P_{i,m} (P_{\max} - \Delta P_{i,m})}{P_{\max}^2}$ einer Maßnahme bei der Summenberechnung der Energieflexibilität fehlt. In Folge dessen werden zu niedrige Energieflexibilitätswerte errechnet (vgl. Ergebnisse Formel (5.16) und (5.17)). Dieser Sachverhalt wird im Beispiel in Abbildung 35 durch den schraffierten Bereich bei Ausgangszustand 1a verdeutlicht.

Durch das Fehlen des Wertes der Leistungsdifferenz $\Delta P_{i,m}$ bei der Summenberechnung der Energieflexibilität gewinnt die Leistungsdifferenz des folgenden Zielzustands $\Delta P_{i,m+1}$ für die Energieflexibilität an Wert. Der Wertegewinn richtet

sich dabei nach dem Wertverlust der Leistungsdifferenz der vorangegangenen Zielzustände. Die sich somit ergebende gewichtete Leistungsdifferenz zweier Zielzustände lässt sich nach folgender Formel (5.18) errechnen.

$$\Delta P'_{i,m} = \alpha_{i,m} \left(\sum_{j=1}^m \Delta P_{i,j} - \sum_{j=1}^{m-1} \Delta P'_{i,j} \right) \quad (5.18)$$

$\Delta P'_{i,m}$ Gewichtete Leistungsdifferenz der Zielzustände der Maßnahmen m und $m-1$ von Ausgangszustand i

$\alpha_{i,m}$ Gewichtungsfaktor der Maßnahme M_j des Zustandes Z_i

$\Delta P_{i,m}$ Leistungsdifferenz der Zielzustände der Maßnahmen m und $m-1$ von Ausgangszustand i

Für das dargestellte Beispiel in Abbildung 35 – siehe Ausgangszustand 1b – errechnen sich die gewichteten Leistungsdifferenzen aller Zielzustände nach Formel (5.18) folgendermaßen.

$$\Delta P'_{1,1} = \alpha_{1,1} \Delta P_{1,1} = 1 * 4 \text{ kW} = 4 \text{ kW} \quad (5.19)$$

$$\Delta P'_{1,2} = \alpha_{1,2} \left(\sum_{j=1}^2 \Delta P_{1,j} - \sum_{j=1}^1 \Delta P'_{1,j} \right) = 0 * ((4 \text{ kW} + 4 \text{ kW}) - (4 \text{ kW})) = 0 \text{ kW} \quad (5.20)$$

$$\Delta P'_{1,3} = \alpha_{1,3} \left(\sum_{j=1}^3 \Delta P_{1,j} - \sum_{j=1}^2 \Delta P'_{1,j} \right) = 1 * ((4 \text{ kW} + 4 \text{ kW} + 4 \text{ kW}) - (4 \text{ kW} + 0 \text{ kW})) = 1 * (12 \text{ kW} - 4 \text{ kW}) = 8 \text{ kW} \quad (5.21)$$

Die Gewichtung der Leistungsdifferenzen ist dabei ausgehend vom Ausgangszustand sowohl für alle Zielzustände vorzunehmen, welche ein höheres, aber auch ein niedrigeres Leistungsniveau aufweisen. Anschließend kann die Energieflexibilität des betrachteten Ausgangszustands nach folgender Formel (5.22) korrekt berechnet werden.

$$E_i = 0,5 \left(\sum_{m^+=1}^{M^+} \frac{(P_{max} - \Delta P'_{i,m^+}) \Delta P'_{i,m^+}}{P_{max}^2} + \sum_{m^+=1}^{M^+} \frac{\Delta P'_{i,m^+}}{P_{max}} + \sum_{m^-=1}^{M^-} \frac{(P_{max} - \Delta P'_{i,m^-}) \Delta P'_{i,m^-}}{P_{max}^2} + \sum_{m^-=1}^{M^-} \frac{\Delta P'_{i,m^-}}{P_{max}} \right) \quad (5.22)$$

mit

$$\Delta P'_{i,m} = \alpha_{i,m} \left(\sum_{j=1}^m \Delta P_{i,j} - \sum_{j=1}^{m-1} \Delta P'_{i,j} \right)$$

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

E_i	Energieflexibilität von Ausgangszustand i
i	Index zur Bezeichnung des betrachteten Ausgangszustandes
M^+	Anzahl Maßnahmen mit positiver Leistungsänderung
m^+	Index zur Bezeichnung der betrachteten Maßnahmen eines Ausgangszustandes, welche eine Leistungserhöhung zur Folge haben
$\Delta P'_{i,m}$	Gewichtete Leistungsdifferenz der Zielzustände der Maßnahmen m und $m-1$ von Ausgangszustand i
P_{\max}	Maximaler Leistungsbedarf der Produktionsstation
M^-	Anzahl Maßnahmen mit negativer Leistungsänderung
m^-	Index zur Bezeichnung der betrachteten Maßnahmen eines Ausgangszustandes, welche eine Leistungsminderung zur Folge haben
$\Delta P_{i,m}$	Leistungsdifferenz der Zielzustände der Maßnahmen m und $m-1$ von Ausgangszustand i
$\alpha_{i,m}$	Gewichtungsfaktor der Maßnahme m von Ausgangszustands i

Den Lösungsraum, welcher sich aus der ganzheitlichen Formel (5.22) zur Bewertung der Energieflexibilität von Ausgangszuständen ergibt, zeigt Abbildung 36. Dieser ist im Gegensatz zu der Darstellung in Abbildung 28 gefüllt abgebildet. Dadurch soll verdeutlicht werden, dass durch die Gewichtung der Maßnahmen beliebige Energieflexibilitätswerte zwischen $E=0$ und dem maximalen Wert, resultierend aus Verteilung und Anzahl der Zielzustände, siehe Abbildung 28, möglich sind.

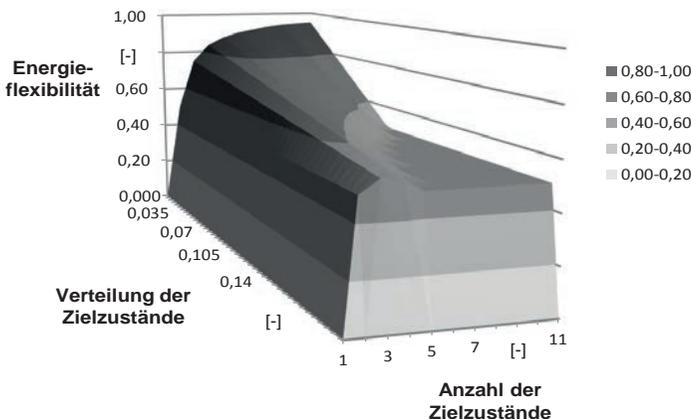


Abbildung 36: Lösungsraum der ganzheitlichen Energieflexibilitätsformel von Zuständen

5.3.4 Ganzheitliche Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität von Produktionsstationen

Im vorangegangenen Abschnitt ist eine Kennzahl entwickelt worden, welche die Bewertung der Energieflexibilität eines Ausgangszustandes unter Einbeziehung der Axiome Nr. 1 bis Nr. 6 zulässt. Hierbei richtet sich die Energieflexibilität des Ausgangszustandes nach den zur Verfügung stehenden Maßnahmen – und somit den möglichen Zielzuständen. Somit weist jeder Ausgangszustand einer Produktionsstation eine andere Energieflexibilität auf, da in jedem Ausgangszustand andere Maßnahmen zur Verfügung stehen, die jeweils die Energieflexibilität unterschiedlich stark beeinflussen. Um daher die Energieflexibilität der gesamten Produktionsstation bewerten zu können, muss die Energieflexibilität der einzelnen Ausgangszustände zu einer Gesamtenergieflexibilität der Produktionsstation zusammengefasst werden. Dies erfolgt durch die zeitlichen Anteile β_i der Ausgangszustände der Produktionsstation. Dabei muss die Summe der zeitlichen Anteile der einzelnen Zustände 1 ergeben, wie in Formel (5.23) dargestellt.

$$1 = \sum_{i=1}^I \beta_i \quad (5.23)$$

I *Anzahl Ausgangszustände einer Produktionsstation*
 β_i *Zeitlicher Anteil des Ausgangszustands i*

Die Bewertung der Energieflexibilität einer Produktionsstation kann dann unter Zuhilfenahme der Gewichtungsfaktoren aus Formel (5.14) und der Bewertungsformeln (5.18) und (5.22) nach folgender Formel (5.24) berechnet werden. Dabei werden die einzelnen Energieflexibilitäten der Ausgangszustände einer Produktionsstation mit ihren zeitlichen Anteilen gewichtet und die Summe daraus gebildet.

$$E_{Station} = \sum_{i=1}^I \beta_i E_i \quad (5.24)$$

$E_{Station}$ *Energieflexibilität einer Produktionsstation*
 I *Anzahl Ausgangszustände einer Produktionsstation*
 β_i *Zeitlicher Anteil des Ausgangszustands i*

5.4 Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Produktionsstationen

5.4.1 Allgemeines

Technische Restriktionen einer Station können die maximale Verweildauer einer Maßnahme festlegen. So lässt sich z. B. der Zustand „Hochfahren“ einer Station nur so lange einnehmen, bis der Zielzustand „Stand-by“ erreicht ist und die Station hochgefahren ist. Neben diesen technischen Restriktionen beeinflussen allerdings noch weitere Faktoren die maximale Verweildauer einer Maßnahme. Diese resultieren aus den sequenziellen Wechselwirkungen, welche eine Station mit den anderen Stationen eines Produktionssystems aufgrund des Durchlaufs der Aufträge durch das System aufweisen. Sequenzielle Wechselwirkungen werden im Rahmen dieser Arbeit folgendermaßen definiert:

Sequenzielle Wechselwirkungen sind Einschränkungen der Energieflexibilität einer Produktionsstation aufgrund von im Produktionsprozess vor- oder nachgelagerten Stationen.

Diese Wechselwirkungen zweier Produktionsstationen sind dabei umso ausgeprägter, je geringer die zeitliche Entkopplung dieser Stationen aufgrund von Pufferbeständen ist. So hat z. B. die Unterbrechung eines Auftrags in einer im One-Piece-Flow produzierenden Fertigung sofort Auswirkungen auf vor- und nachgelagerte Stationen. Sind dagegen zwei Stationen durch einen entsprechenden Puffer entkoppelt, wie z. B. in Werkstattfertigungen üblich, so wirken sich einzelne Maßnahmen einer Produktionsstation nicht sofort auf andere Stationen aus. Als Größe zur Erfassung der sequenziellen Wechselwirkungen sollen somit die Pufferbestände zwischen Stationen herangezogen werden.

5.4.2 Auswirkungen von Puffergrößen

Zur weiteren Untersuchung der Auswirkungen von Puffergrößen auf die maximale Verweildauer von Maßnahmen soll folgendes einfaches Modell eines Produktionsprozesses herangezogen werden, siehe Abbildung 37. Hierbei wird eine Produktionsstation n betrachtet, welche eine vor- und eine nachgelagerte Station $n-1$ bzw. $n+1$ besitzt, welche jeweils durch Pufferbestände mit der betrachteten Station n entkoppelt sind.

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

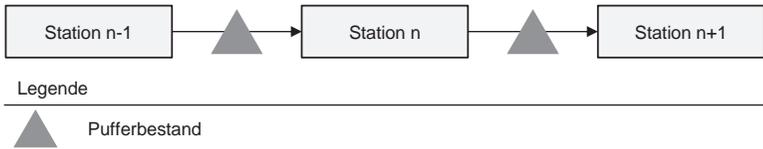


Abbildung 37: Modell zur Untersuchung von Auswirkungen auf Pufferbestände

Es wird davon ausgegangen, dass sich das System in einem stationären Zustand befindet, d. h. die Pufferbestände befinden sich auf einem konstanten Niveau, da die Produktionsleistungen aller Stationen gleich und konstant sind. Bei Ausführung einer Maßnahme im Rahmen der Energieflexibilität an Station n ändert sich deren Produktionsleistung. In Bezug auf die Auswirkungen von Maßnahmen auf die vor- und nachgelagerten Prozesse können dabei zwei grundsätzliche Fälle unterschieden werden.

1. Unterbrechen oder Verlangsamen der Produktion
2. Vorziehen oder Beschleunigen der Produktion

Wird dabei die Produktion einer Station unterbrochen oder verlangsamt, so füllt sich der vorgelagerte Puffer, da diese mit unveränderter Produktionsleistung produziert. Der Puffer der nachgelagerten Produktion leert sich dagegen.

Im zweiten Fall, d. h. beim Vorziehen oder Beschleunigen der Produktion an Station n, tritt der umgekehrte Effekt wie im ersten Fall auf. Der vorgelagerte Puffer leert sich und der nachgelagerte Puffer füllt sich. Die beschriebenen grundsätzlichen Auswirkungen von Maßnahmen auf die vor- und nachgelagerten Pufferbestände sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Auswirkungen von Maßnahmen auf Pufferbestände

	Vorgelagerter Puffer	Nachgelagerter Puffer
Fall 1: Unterbrechen oder Verlangsamen der Produktion	Puffer füllt sich	Puffer leert sich
Fall 2: Vorziehen oder Beschleunigen der Produktion	Puffer leert sich	Puffer füllt sich

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

Je länger eine Maßnahme an Station n ausgeführt wird, desto weiter leeren bzw. füllen sich die vor- bzw. nachgelagerten Puffer. Dies führt soweit, dass die Puffer leer- bzw. volllaufen. Im Falle leergelaufener Puffer reißt der Materialfluss ab (LÖDDING 2008, S. 95) und die Maßnahme kann nicht weiter ausgeführt werden. Im Falle eines vollgelaufenen Puffers blockiert die vorgelagerte betroffene Station (LÖDDING 2008, S. 95) und die Maßnahme kann ebenso nicht weiter ausgeführt werden.

Die maximale Verweildauer einer Maßnahme spiegelt somit die Wechselwirkungen der Station mit dem Produktionssystem wider. Dabei determiniert der begrenzende Faktor die tatsächliche maximale Verweildauer. Sie lässt sich somit nach Formel (5.25) ermitteln.

$$t_{i,m}^{max} = \min(t_{Puffer_{vor}}^{max}, t_{Puffer_{nach}}^{max}, t_{Tech}^{max}) \quad (5.25)$$

$t_{i,m}^{max}$	<i>Maximale Verweildauer der Maßnahme m von Ausgangszustand i</i>
$t_{Puffer_{vor}}^{max}$	<i>Maximale Verweildauer aufgrund des vorgelagerten Puffers</i>
$t_{Puffer_{nach}}^{max}$	<i>Maximale Verweildauer aufgrund des nachgelagerten Puffers</i>
t_{Tech}^{max}	<i>Maximale Verweildauer aufgrund technischer Restriktionen</i>

Zur Ermittlung der maximalen Verweildauern aufgrund der vor- und nachgelagerten Puffer müssen jeweils die in Tabelle 7 beschriebenen beiden Fälle betrachtet werden. Dabei ergibt sich die maximale Verweildauer durch die Produktionsleistung der pufferfüllenden bzw. -leerenden Produktionsstation und den zur Verfügung stehenden Pufferkapazitäten.

5.5 Kostenermittlung

5.5.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt sollen die zusätzlichen Kosten ermittelt werden, welche durch die Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen (vgl. Abschnitt 4.3.3) entstehen. Auf diese Weise soll eine ganzheitliche Bewertung der Energieflexibilität unter Berücksichtigung der drei Flexibilitätsdimensionen ermöglicht werden. Es ist nicht das Ziel dieses Abschnittes, eine vollständige Liste aller möglichen auftretenden Kostenarten aufzuführen. Vielmehr soll eine Fokussierung auf die

relevanten Kostenarten vorgenommen werden, welche durch Energieflexibilitätsmaßnahmen i. d. R. betroffen sind. Hierzu werden in Abschnitt 5.5.2 zunächst die für Energieflexibilität relevanten Kostenarten identifiziert. Anschließend werden in Abschnitt 5.5.3 Formeln erarbeitet, die eine Quantifizierung der Kosten ermöglichen, welche bei der Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen zusätzlich entstehen. Anschließend erfolgt die Zuordnung der relevanten Kostenarten zu den Energieflexibilitätsmaßnahmen.

5.5.2 Identifikation von relevanten Kostenarten

Zur Darstellung des Wirtschaftsgeschehens eines Unternehmens dient die Kosten- und Leistungsrechnung (STURM 2006, S. 279; WÖHE & DÖRING 2013, S. 867 ff.). Als Teil der Kostenrechnung kommt dabei der Kostenartenrechnung die Aufgabe zu, möglichst alle im Betrieb anfallenden bzw. erwarteten Kosten zu erfassen (DEIMEL ET AL. 2006, S. 35; GÖTZE 2010, S. 20; SCHWEITZER & KÜPPER 2011, S. 52;). Aus diesem Grund soll die Identifikation der für die Energieflexibilität relevanten Kostenarten mithilfe der Kostenartenrechnung erfolgen.

Dabei gibt es im Rahmen der Kostenartenrechnung verschiedene Gesichtspunkte, nach welchen sich die verschiedenen Kostenarten gliedern lassen, wie z. B. nach der Art der Erfassung oder der Verrechnung der Kosten (PLINKE & RESE 2006, S. 63 f.; STEGER 2010, S. 174 f.; WÖHE & DÖRING 2013, S. 885). Im Zuge dieser Betrachtung soll aber auf die Gliederung der Kosten nach der Art der verbrauchten Einsatzfaktoren aufgebaut werden, da sich die durch die Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen entstehenden Kosten durch diese Kostenartengliederung am genauesten abbilden lassen. Nach GÖTZE (2010, S. 27) können acht Kostenarten aufgrund ihrer zugrunde liegenden verbrauchten Einsatzfaktoren unterschieden werden.⁶ Diese acht Kostenarten sind in Tabelle 8 aufgeführt.

⁶ Nach HANS (2002, S. 72) lassen sich keine allgemeingültigen Regeln für die Kostenarteneinteilung aufstellen, da sie in hohem Maße von den betriebs- und branchenspezifischen Besonderheiten abhängen. Für weitere Kostenartengliederungen vgl. z. B. HANS (2002, S. 71), MACHA (2010, S. 44), STEGER (2010, S. 175), WEBER & ROGLER (2006, S. 48).

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

Tabelle 8: *Kostenarten nach verbrauchten Einsatzfaktoren nach Götze (2010, S. 27)*

Kostenarten	Materialkosten
	Personalkosten
	Kosten für Fremddienste
	Kosten für Rechtsgüter
	Abschreibungen
	Wagniskosten
	Abgaben
	Zinsen

Materialkosten sind die Kosten, die beim Verbrauch an materiellen Verbrauchsgütern anfallen, d. h. insbesondere Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe (STEGER 2010, S 180; MACHA 2010, S. 45; WALTER & WÜNSCHE 2013, S. 100 ff.). Personalkosten sind allgemein die Kosten, welche durch den Einsatz von menschlicher Arbeit verursacht werden (FRIEDL 2010, S. 495; EISELE & KNOBLOCH 2011, S. 807;). Dabei sind aber die Kosten für Fremddienste zu unterscheiden, die bei der Inanspruchnahme von Leistungen entstehen, die nicht vom Unternehmen selbst erbracht werden (STEGER 2010, S 209; GÖTZE 2010, S. 62). Kosten für Rechtsgüter resultieren vor allem aus Zahlungen für Lizenzen und Patente (SCHWEITZER & KÜPPER 2011, S. 111). Durch Abschreibungen werden Wertminderungen im Anlagevermögen, bei materiellen Gebrauchsgütern oder immateriellen Gütern, erfasst (FRIEDL 2010, S. 481; MACHA 2010, S. 64 f.). Wagniskosten sind alle Kosten und Mehraufwendungen, welche durch ein zusätzliches Risiko entstehen, die ein Unternehmen ggf. eingeht (HANS 2002, S. 18). So besteht z. B. ein Fertigungswagnis, das der Möglichkeit des Ausschusses oder der Nacharbeit von Produkten Rechnung trägt (ZIMMERMANN ET AL. 2003, S. 167). Darüber hinaus haben Unternehmen aufgrund von Verordnungen und gesetzlichen Regelungen Abgaben, wie z. B. Beiträge, Gebühren und Steuern, an öffentlich-rechtliche Institutionen zu entrichten (STEGER 2010, S 211; EISELE & KNOBLOCH 2011, S. 810). Zinsen sind dagegen die Kosten, die durch die Bereitstellung oder Bindung von Kapital entstehen (HANS 2002, S. 113; SCHWEITZER & KÜPPER 2011, S. 112 f.). So steht das gebundene Kapital nicht mehr für andere Nutzungsmöglichkeiten zur Verfügung. Diese entgangenen Erträge (Opportunitätskosten) sind als Zinskosten zu erfassen (FRIEDL 2010, S. 117).

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

Grundsätzlich können bei der Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen Kosten aller aufgeführten Kostenarten auftreten. Allerdings hängt das Auftreten einiger Kostenarten von individuellen Rahmenbedingungen der betrachteten Produktion ab, wie z. B. die Branche des Unternehmens, die eingesetzten Produktionsstationen oder dem Standort der Fabrik usw.. Aus diesem Grund soll im Folgenden eine Einschränkung auf die Kostenarten vorgenommen werden, welche Energieflexibilitätsmaßnahmen i. d. R. verursachen.

Betriebsstoffe werden als Teil der Materialkosten angesehen. Somit sind die Kosten, welche durch den Verbrauch von Energie anfallen, den Materialkosten zuzuordnen. Da alle Energieflexibilitätsmaßnahmen auf eine zeitliche Veränderung des Energiebedarfs abzielen, ist damit zu rechnen, dass zusätzlicher Energiebedarf z. B. durch längere Stand-by-Zeiten von Produktionsstationen auftreten. Materialkosten müssen somit unbedingt betrachtet werden.

Einige identifizierte Energieflexibilitätsmaßnahmen zielen auf die Anpassung der Einsatzzeiten von Personal, wie z. B. die Anpassung von Schichtzeiten. Aus diesem Grund sind Personalkosten zwingend zu berücksichtigen.

Kosten für Fremddienste können z. B. bei der direkten Laststeuerung für die Nutzung der Dienste des Programmverantwortlichen oder für zusätzlichen externen Logistikaufwand bei der Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen entstehen. Da die Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen aber i. d. R. innerhalb eines Unternehmens bzw. der Produktion ohne Zuhilfenahme von externen Diensten abläuft, sollen diese Kosten im Folgenden nicht weiter betrachtet werden.

Rechtsgüter sind Zahlungen für Lizenzen und Patente, welche durch Energieflexibilitätsmaßnahmen i. d. R. nicht berührt werden. Diese Kosten sind daher im Rahmen dieser Betrachtung nicht relevant.

Durch Abschreibungen wird der Wertverzehr im Anlagevermögen erfasst. Energieflexibilitätsmaßnahmen können dabei einen zusätzlichen Werteverzehr zur Folge haben. So nutzen sich Produktionsstation ggf. durch vermehrtes An- und Abschalten oder durch veränderte Prozessparameter stärker ab. Im Rahmen dieser Betrachtung wird aber davon ausgegangen, dass die Nutzungszeit von Produktionsstationen dadurch nicht verkürzt wird und es somit nicht zu erhöhten Abschreibungskosten durch kürzere Abschreibungszeiträume kommt. Der auftretende zusätzliche Werteverzehr ist aber durch zusätzliche Instandhaltungskosten

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

(IH-Kosten) – welche unter Personal- bzw. Materialkosten fallen – zu berücksichtigen.

Wagniskosten können bei der Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen auftreten, wenn z. B. durch die Anpassung von Prozessparametern mit einem erhöhten Ausschuss zu rechnen ist oder durch das Verschieben von Prozessstarts Kundentermine nicht eingehalten werden können. Allerdings sind Unternehmen derzeit noch nicht bereit, diese Wagnisse einzugehen, um ggf. Einsparungen durch Energieflexibilität zu erzielen. Aus diesem Grund werden diese Kosten nicht weiter betrachtet.

Abgaben sind ggf. von der Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen betroffen. So werden z. B. die einzelnen Betriebsphasen von Anlagen zur thermischen Nachverbrennung mit unterschiedlichen Sätzen besteuert. Ein Verschieben von Prozesszeiten kann somit zu einer Veränderung der zu entrichtenden Abgaben führen. Da diese Kosten aber von einer Vielzahl von individuellen betriebspezifischen Randbedingungen, wie z. B. dem Standort der Produktion und den eingesetzten Produktionsstationen, abhängen, werden sie im Weiteren nicht betrachtet und müssen bei Bedarf für den spezifischen Anwendungsfall ermittelt werden.

Das Verschieben von Auftragsstarts kann zur Folge haben, dass Produkte für zusätzliche Zeit auf Lager gelegt werden müssen. Die hierbei entstehenden Kosten sind in Form von Zinskosten zu berücksichtigen.

Im Folgenden soll daher der Fokus auf die auftretenden zusätzlichen Material-, Personal- sowie Zinskosten gelegt werden.

5.5.3 Quantifizierung der relevanten Kostenarten

5.5.3.1 Allgemeines

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt die relevanten Kostenarten identifiziert wurden – Material-, Personal- und Zinskosten – gilt es in diesem Abschnitt, Formeln zur Quantifizierung dieser Kosten zu ermitteln. Die aufgeführten Berechnungsschritte sind dabei an das Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen des VDMA angelehnt (VDMA 2006). In diesem Einheitsblatt wird eine Berechnungshilfe für die Prognose von Lebenszykluskosten beschrieben. Neben den Kosten für Entstehung und Entsorgung einer Produk-

tionsstation werden insbesondere auch die Kosten einer Produktionsstation in der Betriebsphase erläutert. Das Einheitsblatt unterstellt dabei die Adaptierbarkeit des beschriebenen Kostenmodells auf verschiedene Maschinen und spezifische Einsatzbedingungen. Aus diesem Grund soll auf diesem Berechnungsmodell aufgebaut werden.

Ziel der Quantifizierung der relevanten Kostenarten ist es, die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme zu bewerten. Da diese Bewertung aber von einer Vielzahl von dynamischen Faktoren abhängt, wie z. B. den momentanen Strompreisen, muss die Wirtschaftlichkeitsberechnung im Einzelfall immer wieder neu bewertet werden. Im Rahmen dieser Arbeit soll aber eine grundsätzliche Aussage über die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme im Rahmen der Ermittlung des Kostengewichtungsfaktors $\alpha_{i,m}^k$ getroffen werden. Aus diesem Grund wird dabei auf durchschnittlich entstehenden Kosten der Maßnahme zurückgegriffen.

5.5.3.2 Materialkosten

Materialkosten gliedern sich u. a. in Energie-, Betriebsstoff- und Werkzeugkosten auf (HANS 2002, S. 71). Diese sollen im folgenden Abschnitt untersucht werden.

Energie- und Betriebsstoffkosten

Zusätzliche Energie- und Betriebsstoffkosten treten auf, wenn die Produktionsstation aufgrund einer Energieflexibilitätsmaßnahme nicht energie- bzw. ressourceneffizient betrieben wird. Dadurch benötigt die Produktionsstation aufgrund der Energieflexibilitätsmaßnahme mehr Energie oder mehr sonstige Betriebsstoffe als sie ohne die Maßnahme benötigen würden, z. B. weil sie länger im Standby-Zustand verweilt oder aufgrund von Anpassungen der Prozessparameter nicht im optimalen Betriebspunkt arbeitet (REINHART ET AL. 2011B, S. 256). Durch die Umsetzung der Energieflexibilitätsmaßnahme kommt es somit zu einer Verringerung der Energie- bzw. Ressourceneffizienz. Die zusätzlichen Energie- und Betriebsstoffkosten lassen sich dabei unter Berücksichtigung der zusätzlich benötigten durchschnittlichen Energie- bzw. Betriebsstoffmengen und der durchschnittlichen Kosten für den Bezug einer Einheit des jeweiligen Stoffes berechnen, siehe Formel (5.26) und (5.27). Dabei sind alle Arten an Energie (Strom, Gas, Druckluft usw.) und Betriebsstoffen zu betrachten.

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

$$MK_{C,i,m} = \sum_{c=1}^C \bar{W}_{c,i,m} \bar{k}_c^E \quad (5.26)$$

$MK_{C,i,m}$ Zusätzliche Energiekosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i
 C Anzahl Energieträger
 $\bar{W}_{c,i,m}$ Zusätzlicher durchschnittlicher Energiebedarf von Energieträger c der Maßnahmen m von Ausgangszustand i
 \bar{k}_c^E Durchschnittliche Kosten je Menge von Energieträger c

$$MK_{B,i,m} = \sum_{b=1}^B \bar{B}_{b,i,m} \bar{k}_b^B \quad (5.27)$$

$MK_{B,i,m}$ Zusätzliche Betriebsstoffkosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i
 B Anzahl Betriebsstoffe
 $\bar{B}_{b,i,m}$ Zusätzlicher durchschnittlicher Bedarf von Betriebsstoff b der Maßnahmen m von Ausgangszustand i
 \bar{k}_b^B Durchschnittliche Kosten je Menge von Betriebsstoff b

Werkzeugkosten

Aufgrund von Energieflexibilitätsmaßnahmen kann ein zusätzlicher Werkzeugverschleiß auftreten, z. B. durch eine Anpassung der Prozessparameter. Dieser Verschleiß führt zu einem erhöhten Werkzeugbedarf. Diese zusätzlichen Kosten lassen sich durch die Kosten des jeweiligen Werkzeuges und einem Verschleißfaktor v^W ermitteln, siehe Formel (5.28). Der Verschleißfaktor gibt an, wie oft eine Maßnahme durchgeführt werden kann, bis ein Werkzeug verschlissen ist und ein neues nötig ist.

$$MK_{W,i,m} = v^W K^W \quad (5.28)$$

$MK_{W,i,m}$ Zusätzliche Werkzeugkosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i
 v^W Zusätzlicher Werkzeugverschleiß
 K^W Werkzeugkosten

5.5.3.3 Personalkosten

Bei der Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen können verschiedenste Personalkosten anfallen. Hierbei sind insbesondere Planungs-, Rüst-, Instandhaltungs- und zusätzliche Schichtkosten zu berücksichtigen.

Planungskosten

Manche Energieflexibilitätsmaßnahmen, wie z. B. die Anpassung von Auftragsreihenfolgen oder die Anpassung von Maschinenbelegungen, erfordern zuvor einen Planungsaufwand, um die Maßnahme umsetzen zu können. Die Planungskosten lassen sich dabei unter Berücksichtigung der jeweiligen durchschnittlichen Planungsdauer sowie des Stundensatzes des Planenden berechnen, siehe Formel (5.29).

$$PK_{p,i,m} = \bar{t}^P k^P \quad (5.29)$$

$PK_{p,i,m}$ *Zusätzliche Planungskosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i*

\bar{t}^P *Durchschnittliche Planungsdauer*

k^P *Stundensatz des Ausführenden*

Rüstkosten

Bei Anpassungen der Auftragsreihenfolge können ggf. zusätzliche Rüstvorgänge von Nöten sein. Die hierbei auftretenden Kosten betreffen hauptsächlich die Kosten für das Personal, welches den Rüstvorgang vornimmt. Somit lassen sich die zusätzlichen Rüstkosten analog der Planungskosten nach Formel (5.29) unter Berücksichtigung der jeweiligen Rüstdauer sowie des Stundensatzes des ausführenden Werkers ermitteln.

$$PK_{R,i,m} = \bar{t}^R k^R \quad (5.30)$$

$PK_{R,i,m}$ *Zusätzliche Rüstkosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i*

\bar{t}^R *Durchschnittliche Rüstdauer*

k^R *Stundensatz des Ausführenden*

IH-Kosten

Wie bereits erwähnt, kann durch Energieflexibilitätsmaßnahmen, z. B. durch vermehrtes An- und Abschalten, ein zusätzlicher Werteverzehr der Produktionsstation auftreten. Dieser Werteverzehr wird durch zusätzliche Instandhaltungskosten berücksichtigt. Instandhaltungskosten setzen sich nach VDMA (2006) u. a. aus den Kosten für das Instandhaltungsmaterial sowie den Kosten für das Personal zusammen, welche die Instandhaltung durchführt. Da i. d. R. die Perso-

Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

nalkosten überwiegen, werden Instandhaltungskosten hier zu den Personalkosten gezählt. Sie lassen sich nach Formel (5.31) ermitteln.

$$PK_{IH,i,m} = v^{IH}(\bar{t}^{IH}k^P + K^{IH}) \quad (5.31)$$

$PK_{IH,i,m}$ *Zusätzliche Instandhaltungskosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i*

v^{IH} *Zusätzlicher Instandhaltungsbedarf*

\bar{t}^{IH} *Durchschnittliche Instandhaltungsdauer*

k^P *Stundensatz des Ausführenden*

K^{IH} *Kosten Instandhaltungsmaterial*

Wie bei der Berechnung der Planungs- und Rüstkosten werden die Personalkosten unter Berücksichtigung der Instandhaltungsdauer und des Stundensatzes des ausführenden Werkers ermittelt. Die Materialkosten für die Instandhaltung werden durch den Faktor K^{IH} miteinbezogen. Da der zusätzliche Instandhaltungsbedarf erst nach einer Vielzahl an umgesetzten Energieflexibilitätsmaßnahmen auftritt, müssen die Instandhaltungskosten auf die Maßnahme umgelegt werden. Dies erfolgt durch den Faktor v^{IH} . Er gibt an, wie oft eine Maßnahme durchgeführt werden kann, bis eine zusätzliche Instandhaltung ausgeführt werden muss.

Schicht- und sonstige Personalzuschläge

Ggf. treten durch Anpassungen der Einsatzzeiten von Personal zusätzliche Kosten in Form von Schicht- oder sonstigen Personalzuschlägen auf. Diese lassen sich durch die Dauer der Anpassung, die Anzahl von der Anpassung der Einsatzzeiten betroffenen Mitarbeiter sowie den jeweiligen Zuschlagsfaktoren ermitteln, siehe Formel (5.32).

$$PK_{S,i,m} = \bar{t}^S k^P z^P S \quad (5.32)$$

$PK_{S,i,m}$ *Zusätzliche Personalkosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i*

\bar{t}^S *Durchschnittliche Anpassungsdauer*

k^P *Stundensatz des Ausführenden*

z^P *Personalkostenzuschlag*

S *Anzahl betroffener Mitarbeiter*

5.5.3.4 Zinskosten

Das Verschieben von Auftragsstarts kann zusätzliche Lagerkosten zur Folge haben. Diese Kosten sind den Zinskosten zuzuordnen, da das gebundene Kapital nicht für andere Investitionen zur Verfügung steht. Die Kosten hängen dabei vom Wert der eingelagerten Produkte, von der Anzahl der eingelagerten Produkte, von der Einlagerungsdauer sowie vom Lagerkostensatz ab. Somit lassen sich die Zinskosten ZK_L , welche aufgrund einer zusätzlichen Einlagerung von Produkten entstehen, nach folgender Formel (5.33) berechnen.

$$ZK_{L,i,m} = \bar{t}^L \frac{\bar{t}^E}{t_e} k^L K^M \quad (5.33)$$

$ZK_{L,i,m}$	<i>Zusätzliche Lagerkosten der Maßnahme m von Ausgangszustand i</i>
\bar{t}^L	<i>Durchschnittliche zusätzliche Verweildauer im Lager</i>
\bar{t}^E	<i>Durchschnittliche Zeitdauer eines Strompreisniveaus bzw. eines Events</i>
t_e	<i>Bearbeitungsdauer</i>
k^L	<i>Lagerkostensatz</i>
K^M	<i>Produktwert</i>

Zur Berechnung der durchschnittlichen Menge der eingelagerten Produkte wird davon ausgegangen, dass die durchschnittliche Umsetzungsdauer der Maßnahme gleich der durchschnittlichen Zeitdauer eines Strompreisniveaus ist. Die Anzahl der eingelagerten Produkte errechnet sich aus der Bearbeitungsdauer t_e und der Zeitdauer eines Strompreisniveaus \bar{t}^E .

6 Vorgehensweise zur Bewertung der Energieflexibilität

6.1 Übersicht über die Vorgehensweise

Die Vorgehensweise zur Bewertung der Energieflexibilität besteht aus insgesamt sechs aufeinander aufbauenden Schritten, wobei einzelne Schritte iterativ durchgeführt werden (REINHART ET AL. 2014). Eine Übersicht der Einzelschritte der Vorgehensweise ist in Abbildung 38 dargestellt.

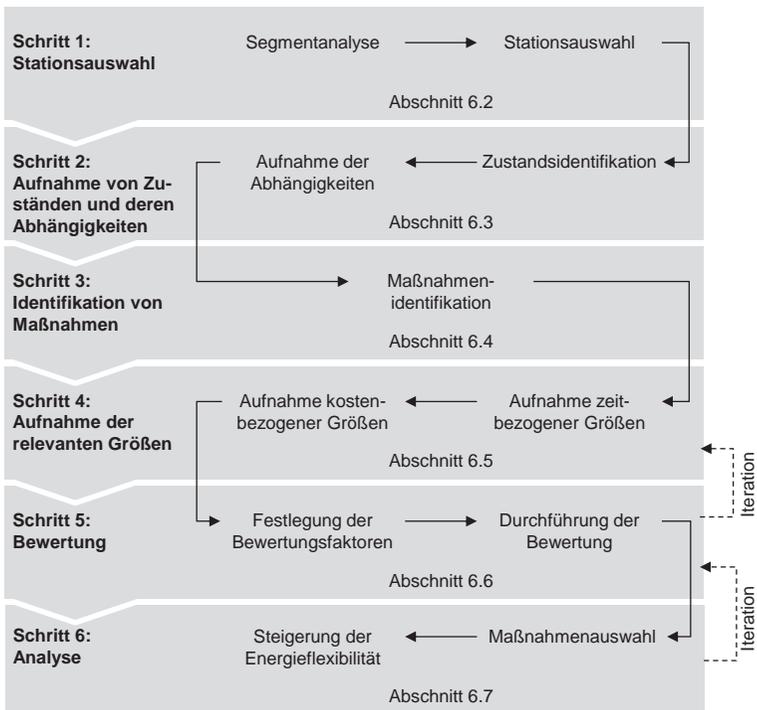


Abbildung 38: Übersicht über die Vorgehensweise zur Bewertung der Energieflexibilität

Zu Beginn der Vorgehensweise gilt es, die zu bewertende Produktionsstation auszuwählen. Hierfür wird ein Top-down-Ansatz herangezogen, d. h., ausgehend

Vorgehensweise zur Bewertung der Energieflexibilität

von einer Betrachtung des Energie- und Leistungsbedarfs einer Fabrik oder von Segmenten, erfolgt die Festlegung der zu bewertenden Produktionsstationen.

Ziel des zweiten Schrittes ist es, ein Verständnis über die zu bewertenden Produktionsstation zu gewinnen. Hierbei werden zunächst die Ausgangszustände aufgenommen, welche die Produktionsstation einnehmen kann. Anschließend werden die Wechselwirkungen zwischen den Ausgangszuständen der Produktionsstation identifiziert und in Form eines gerichteten Graphens visualisiert.

Da sich die Energieflexibilität einer Produktionsstation aus den Maßnahmen ergibt, die zur Beeinflussung des Energiebedarfs der Produktionsstation zur Verfügung stehen, erfolgt im dritten Schritt der Vorgehensweise die Identifikation möglicher Anpassungsmaßnahmen. Die Basis dieses Schrittes stellen hierbei die im Abschnitt 4.3.3 ermittelten grundsätzlichen Energieflexibilitätsmaßnahmen dar.

Im nächsten Schritt der Vorgehensweise sind die für die Bewertung der Energieflexibilität relevanten Größen aufzunehmen. Da sich die Ermittlung der Kosten von Anpassungsmaßnahmen als zeitintensiv darstellen kann, erfolgt die Durchführung des vierten Schrittes der Vorgehensweise in zwei Einzelschritten. Zunächst werden die zeitbezogenen Größen der Bewertung aufgenommen, wie z. B. die Aktivierungs- oder Deaktivierungsdauern von Maßnahmen, und die sich daraus ergebenden Gewichtungsfaktoren der Maßnahme in Schritt fünf der Vorgehensweise berechnet. Ist die Maßnahme grundsätzlich energieflexibilitätssteigernd, so erfolgt im zweiten Schritt die Ermittlung der Kosten der Anpassungsmaßnahmen.

Nachdem im vorangegangenen Schritt alle relevanten Größen ermittelt wurden, erfolgt im fünften Schritt die Bewertung der Energieflexibilität. Da die geforderte Energieflexibilität vom gewählten Energiepreismodell abhängt, werden zunächst die geforderten Reaktionszeiten, Verweildauern sowie kostenbezogene Größen zur Berechnung der Gewichtungsfaktoren festgelegt (vgl. Abschnitt 5.3.2). Anschließend erfolgt die Energieflexibilitätsbewertung der im ersten Schritt ausgewählten Produktionsstationen.

Im letzten Schritt wird die Analyse der Bewertungsergebnisse durchgeführt. Hierbei stehen zwei Untersuchungsgegenstände im Fokus. Zum einen gilt es, die bei Strompreisänderungen zur Energiebedarfsanpassung heranzuziehenden Maßnahmen zu identifizieren, d. h., es sind eine entsprechend energieflexible Produktionsstation sowie geeignete Anpassungsmaßnahmen der Produktionsstation aus-

zuwählen. Zum anderen können technische sowie organisatorische Optimierungen an der Produktionsstation durchgeführt werden, um die Energieflexibilität eines Produktionssystems weiter zu steigern. Die Analyse des Bewertungsergebnisses kann hierbei eine entsprechende Hilfestellung liefern.

6.2 Auswahl der Produktionsstation

Im ersten Schritt der Vorgehensweise gilt es, die zu bewertenden Produktionsstationen auszuwählen. Da eine Fabrik bzw. ein Produktionssystem aus einer Vielzahl an Produktionsstationen besteht und die Anpassung des Energiebedarfs i. d. R. anhand einzelner Stationen erfolgt, ist es nicht zielführend, die Energieflexibilität aller Produktionsstationen zu untersuchen bzw. zu bewerten. Vielmehr ist eine Fokussierung auf einzelne relevante Produktionsstationen vorzunehmen. Die Relevanz ergibt sich dabei aus zwei Faktoren, dem Energie- sowie dem Leistungsbedarf einer Produktionsstation. Da das Ziel der Energieflexibilität die Einsparung von Energiekosten ist und diese Kosten sich auf Basis der benötigten Energiemenge errechnen, sind Lastverschiebungen bei energieintensiven Produktionsstationen anzustreben. Allerdings ist eine reine Betrachtung des Energiebedarfs nicht ausreichend, da Produktionsstationen, welche einen hohen Leistungsbedarf, aber eine geringe Auslastung aufweisen, über einen längeren Zeitraum hinweg einen verhältnismäßig geringen Energiebedarf, bezogen auf den gesamten Strombedarf des Produktionssystems, aufweisen. Bei Betrachtung kürzerer Zeiträume, in welchen diese Produktionsstationen eingesetzt werden, steigt hingegen der Anteil des Energiebedarfs, bezogen auf den gesamten Strombedarf des Produktionssystems. Aus diesem Grund bietet sich als Hilfsmittel zur Auswahl der zu bewertenden Produktionsstationen die in Abbildung 39 dargestellte Matrix an. Hierbei werden die Produktionsstationen des Betrachtungsbereichs, d. h. einer Fabrik oder eines Produktionssystems, bezüglich ihres Energiebedarfs für eine bestimmte Periode, z. B. einem Monat, sowie ihres maximalen Leistungsbedarfs eingeordnet. Auf Basis dessen erfolgt die Auswahl der zu bewertenden Produktionsstationen.

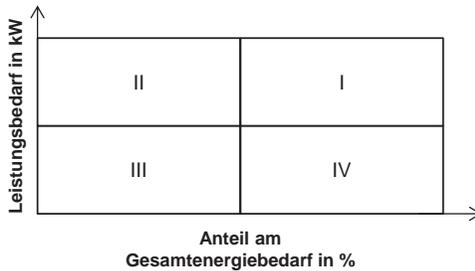


Abbildung 39: Einordnungsmatrix zur Stationsauswahl

Wie bereits erwähnt, spannt sich die dargestellte Matrix zum einem aus dem Leistungs- und zum anderen aus dem Energiebedarf der einzelnen Produktionsstationen auf. Da diese beiden Größen über die Zeit direkt voneinander abhängig sind, ist nicht damit zu rechnen, dass sich Produktionsstationen identifizieren lassen, welche im IV. Quadranten der Matrix einzuordnen sind. Die Produktionsstationen, welche im III. Quadranten verordnet werden, weisen dagegen eine zu geringe Relevanz auf, als dass sie im Rahmen der Anpassung des Energiebedarfs in Betracht gezogen werden sollten. Produktionsstationen, welche einen hohen Anteil am Gesamtenergiebedarf aufweisen, besitzen i. d. R. einen großen Leistungsbedarf und verursachen aufgrund ihres großen Energiebedarfs auch hohe Energiekosten. Sie sind somit bei der Bewertung der Energieflexibilität vor den Produktionsstationen im zweiten Quadranten zu betrachten.

6.3 Aufnahme der Ausgangszustände und deren Abhängigkeiten

In diesem Schritt gilt es, die Ausgangszustände der ausgewählten Produktionsstationen zu identifizieren sowie die Abhängigkeiten der Zustände aufzunehmen, um hieraus das Bewertungsmodell zu generieren. Zur Identifikation der Leistungsbedarfe der Zustände stehen nach REINHARDT (2013, S. 88) grundsätzlich vier verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, siehe Abbildung 40.

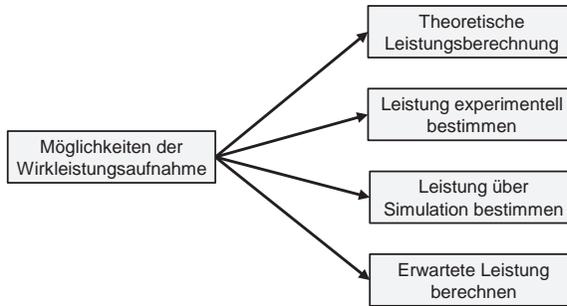


Abbildung 40: Möglichkeiten zur Wirkleistungsaufnahme zur Zustandsidentifikation nach REINHARDT (2013, S. 88)

Die erste Möglichkeit nach REINHARDT (2013, S. 88) zur Ermittlung der Leistungsaufnahmen der verschiedenen Zustände ist die Berechnung über analytische oder empirische Modelle. Hierfür müssen aber entsprechende Modelle für die betrachtete Technologie zur Verfügung stehen, wie z. B. das Zerspankraftmodell nach KIENZLE & VICTOR (1952). Eine weitere Möglichkeit stellt die experimentelle Bestimmung der Leistungsaufnahmen dar. Hierbei werden durch Messungen die tatsächlichen Leistungsaufnahmen ermittelt. Die dritte Möglichkeit ist die Aufnahme der Leistungsaufnahmen durch geeignete Simulationen. Diese Möglichkeit eignet sich allerdings nur für Technologien, für welche entsprechende Berechnungsmodelle zur Verfügung stehen, auf welchen die Simulationen aufbauen können. Die vierte Möglichkeit ist die Abschätzung der Leistungsbedarfe durch Experten unter Zuhilfenahme von weiteren Informationen, wie z. B. die Nennleistung der Produktionsstationen. Allerdings ist diese Art der Datenaufnahme mit einer großen Unsicherheit behaftet. Aus diesem Grund ist von dieser Art der Zustandsidentifikation, wenn möglich, abzusehen.

Da bei vielen variablen Strompreismodellen, wie z. B. Modelle des Regelleistungsmarkts, ein Nachweis über die angepasste Leistung nach Aktivierung einer Energieflexibilitätsmaßnahme erbracht werden muss, ist die Installation von Messtechnik an der Produktionsstation erforderlich. Aus diesem Grund stellt die experimentelle Aufnahme der Leistungen, d. h. Wirkleistungsmessungen, die bevorzugte Aufnahmemethode dar.

6.4 Identifikation von Maßnahmen

Nachdem im vorangegangenen Schritt die Zustände der Produktionsstation aufgenommen wurden, gilt es im dritten Schritt der Vorgehensweise, Maßnahmen zu identifizieren, mit denen ein bewusster Wechsel zwischen den Zuständen und somit eine Anpassung des Energiebedarfs vollzogen werden kann. Zur Identifikation der möglichen Maßnahmen der ausgewählten Produktionsstation dient dabei ein Fragenkatalog, welcher sich direkt aus den in Abschnitt 4.3.3 ermittelten Maßnahmen ableitet. Dabei stellt sich der Bewertende im Rahmen der Vorgehensweise für alle Zustände der Produktionsstation folgende Fragen:

- Lassen sich Prozessstarts kurzfristig oder mittelfristig anpassen?
- Lässt sich die Auftragsreihenfolge anpassen?
- Lassen sich Pausenzeiten anpassen?
- Lassen sich Schichtzeiten anpassen?
- Lassen sich Prozesse unterbrechen?
- Lassen sich Prozessparameter anpassen?
- Ist ein Wechsel der Energiequelle möglich?

Die Maßnahmen *Speicherung von Energie* und *Anpassung der Maschinenbelegung* werden hier nicht mit berücksichtigt, da sie erst auf Produktionssystemebene umgesetzt werden können. Als Ergebnis dieses Schrittes sind alle Maßnahmen bekannt, die in den jeweiligen Zuständen der Produktionsstation zur Verfügung stehen. Da hierbei eine sehr große Anzahl an Maßnahmen auftreten kann, werden die Maßnahmen mit einer Nummerierungslogik versehen, dargestellt in Abbildung 41.

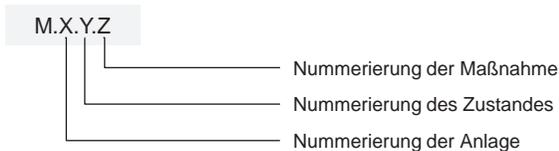


Abbildung 41: Nummerierungslogik einer Maßnahme

Im Rahmen der Nummerierungslogik werden alle betrachteten Produktionsstationen nummeriert, anschließend erhält jeder Zustand einer Produktionsstation und auch die Maßnahmen eines Zustandes eine eigene Nummer. Somit lässt sich durch die Kombination von Maßnahmen-, Zustands- und Stationsnummer jede Maßnahme eindeutig identifizieren und zuordnen.

6.5 Aufnahme der bewertungsrelevanten Größen

Bevor die Bewertung der Energieflexibilität durchgeführt werden kann, müssen alle bewertungsrelevanten Größen aufgenommen werden. Dies sind zum einen die zeitbezogenen und zum anderen die kostenbezogenen Daten. Hierbei nimmt vor allem die maximale Verweildauer einer Maßnahme eine besondere Stellung ein. Sie beschreibt, wie lange ein bestimmter Zustand eingenommen werden kann bzw. muss und ist entweder technisch oder organisatorisch determiniert. Zur Ermittlung der maximalen Verweildauer sind auch die vor- und nachgelagerten Bestände der Produktionsstation zu erfassen. Hieraus errechnen sich dann die maximalen Verweildauern.

6.6 Bewertung

Im fünften Schritt der Vorgehensweise wird die eigentliche Bewertung der Energieflexibilität nach dem im Kapitel 5 erläuterten Vorgehen, d. h. die Berechnung der Gewichtungsfaktoren sowie der Energieflexibilitätswerte, durchgeführt. Da die Bewertung auf Basis eines gewählten Strompreismodells erfolgt, sind zunächst die bewertungsrelevanten Faktoren festzulegen. Diese lassen sich weitestgehend aus dem Strompreismodell ableiten, wie die geforderten Reaktionszeiten, die geforderten minimalen und maximalen Verweildauern, die durchschnittliche Dauer eines Strompreisniveaus sowie die durchschnittlichen Strompreiskosten bzw. Zahlungen bei anreizbasierten Programmen.

Im Rahmen der Bewertung müssen zwei Faktoren unternehmensspezifisch festgelegt werden. Dies ist zum einen die Preisschranke δ zur Nutzung der Energieflexibilität. Sie gibt an, ab welcher Preisabweichung ein Unternehmen Anpassungen an den geänderten Strompreis durchführen möchte. Je größer dieser Faktor gewählt wird, desto träger ist das Unternehmen. Zum anderen muss der Renditefaktor r unternehmensspezifisch festgelegt werden. Dieser gibt die Gewinnerwartung des Unternehmens an eine Anpassung an einen geänderten Strompreis wieder. Eine Hilfestellung, wie die beiden Faktoren in Abhängigkeit der Erwartungen des Unternehmens festgelegt werden können, ist in Tabelle 9 gegeben.

Tabelle 9: Festlegung unternehmensspezifischer Bewertungsfaktoren

Gewinnerwartung des Unternehmens	Faktor r	Faktor δ
hoch	$0 < r < 1$	$0,25 < \delta < 1$
neutral	$r = 1$	$0,05 < \delta < 0,25$
niedrig	$r > 1$	$0 < \delta < 0,05$

6.7 Analyse

6.7.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt wird die Analyse der im vorangegangenen Schritt durchgeführten Bewertung der Energieflexibilität erläutert. Sie stellt den Nutzen der Vorgehensweise dar. Das Bewertungsergebnis dient dabei im Wesentlichen zwei Zielen, zum einen der Stations- und Maßnahmenauswahl und zum anderen der Steigerung der Energieflexibilität. Ziel der Stations- und Maßnahmenauswahl ist es, die für die Umsetzung der Energieflexibilität geeignetsten Produktionsstationen und Maßnahmen zu identifizieren, d. h. die Produktionsstationen, welche aufgrund ihres Energie- und Leistungsbedarfs eine große Relevanz aufweisen sowie eine ausreichend hohe Energieflexibilität haben. Eine hohe Energieflexibilität bedeutet dabei die Existenz von Maßnahmen, welche ein großes Einsparpotential aufweisen sowie alle Zeitanforderungen des gewählten Strompreismodells erfüllen. Ziel bei der Steigerung der Energieflexibilität ist es, das Potential zur Erhöhung der Energieflexibilität der bewerteten Produktionsstationen aufzuzeigen.

6.7.2 Stations- und Maßnahmenauswahl

6.7.2.1 Stationsauswahl

Ziel dieses Schrittes ist die Auswahl der für die Umsetzung der Energieflexibilität geeignetsten Stationen und Maßnahmen. Zur Stationsauswahl kann dabei das um die Energieflexibilität erweiterte Diagramm aus Abbildung 39 herangezogen werden. Auf diese Weise lässt sich die Energieflexibilität einer Produktionsstation zusammen mit dessen Energie- und Leistungsbedarf analysieren und mit

anderen Stationen vergleichen. Eine mögliche Darstellung des Diagramms zeigt die erweiterte Einordnungsmatrix zur Stationsauswahl in Abbildung 42. Diese Darstellung ist um den Bereich von Produktionsstationen mit geringem Leistungs- und hohem Energiebedarf bereinigt, da sich hierfür keine Produktionsstationen identifizieren lassen.

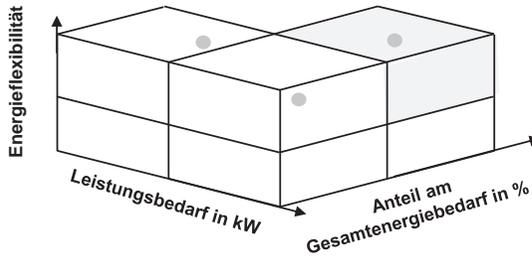


Abbildung 42: Erweiterte Einordnungsmatrix zur Stationsauswahl

Nachdem in die erweiterte Einordnungsmatrix alle bewerteten Produktionsstationen eingeordnet wurden, kann die Auswahl der Stationen zur Umsetzung der Energieflexibilität erfolgen. Hierzu sind die einzelnen Sektoren der erweiterten Einordnungsmatrix mit römischen Ziffern versehen. Je niedriger die Zahl des Sektors ist, in dem sich die Produktionsstation befindet, desto eher ist sie zur Umsetzung der Energieflexibilität geeignet. Idealerweise weisen Produktionsstationen daher einen hohen Energie- und Leistungsbedarf sowie eine große Energieflexibilität auf und liegen somit im Sektor I. Ist dies nicht der Fall, so sind in jedem Fall Produktionsstationen mit einer größeren Energieflexibilität den Produktionsstationen mit geringerer Energieflexibilität vorzuziehen.

6.7.2.2 Maßnahmenauswahl

Nach der Auswahl der Produktionsstationen zur Umsetzung der Energieflexibilität sind die Maßnahmen zu identifizieren, welche zur Anpassung des Energiebedarfs genutzt werden sollen. Die Wertigkeit einer Maßnahme ergibt sich dabei aus der Leistungsänderung der Maßnahme $P_{i,m}$ (und somit der Menge der Energieanpassung) und der generellen Erfüllung der Anforderungen aus dem gewählten Strompreismodell, ausgedrückt durch den Gewichtungsfaktor $\alpha_{i,m}$. Durch die Multiplikation dieser beiden Größen ergibt sich ein Zahlenwert, mithilfe dessen eine Rangfolge der geeignetsten Maßnahmen gebildet werden kann. Zur Maß-

nahmenauswahl eignet sich somit eine Tabelle, welche alle relevanten Informationen sowie die Rangfolge der Maßnahmen enthält, beispielhaft in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Tabelle zur Maßnahmenauswahl

Rang	Nr.	Bezeichnung	$P_{i,m}$ [kW]	$\alpha_{i,m}$	$P_{i,m}\alpha_{i,m}$
1	M _{1,1}	Auftragsstart verschieben	300	0,9	270
2	M _{2,3}	Maschinenbelegung anpassen	125	0,92	115
3	M _{1,4}	Auftragsstart verschieben	100	1	100
4	M _{1,2}	Auftragsreihenfolge anpassen	230	0,4	92
5	M _{2,1}	Energie speichern	260	0,32	83,2
6	M _{2,2}	Prozessparameter anpassen	20	0,81	16,2
7	M _{1,3}	Prozessparameter anpassen	10	0,77	7,7
...					

Tabelle 10 zeigt die Rangfolge der Maßnahmen einer Produktionsstation. Je höher der Rang einer Maßnahme ist, desto größere Kosteneinsparungen lassen sich durch sie erzielen. Jede Maßnahme kann dabei eindeutig durch ihre Maßnahmenummer (siehe Schritt 3 der Vorgehensweise) sowie der Bezeichnung der Maßnahme identifiziert werden. Die Tabelle wird dabei für jede Produktionsstation erstellt. Sie lässt sich auch in eine Liste aller Maßnahmen einer Fabrik oder eines Produktionssystems aggregieren.

6.7.3 Steigerung der Energieflexibilität

Neben der Auswahl der Produktionsstation und Maßnahmen, welche zur Umsetzung der Energieflexibilität genutzt werden sollen, dient die Bewertung der Energieflexibilität auch zur Analyse, wie die Energieflexibilität von einzelnen Produktionsstationen gesteigert werden kann. Die Analyse erfolgt dabei zweistufig. Zunächst werden die Energieflexibilität der Produktionsstation und die Energieflexibilität der einzelnen Ausgangszustände untersucht. Im zweiten Schritt erfolgt die Analyse der einzelnen Maßnahmen, die in den jeweiligen Ausgangszuständen zur Verfügung stehen.

Zur Analyse der Energieflexibilität sowie der zeitlichen Anteile der Ausgangszustände und der daraus resultierenden Energieflexibilität einer Produktionsstation dient das in Abbildung 43 dargestellte Diagramm.

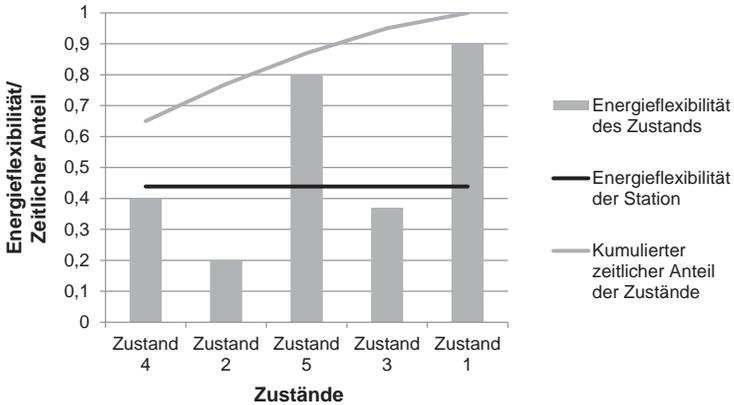


Abbildung 43: Analyse der Energieflexibilität von Produktionsstationen

In dem Diagramm werden die einzelnen Zustände mit ihren zugehörigen Energieflexibilitätswerten absteigend geordnet nach den jeweiligen zeitlichen Anteilen eingetragen. Die Zustände verlieren im Diagramm somit von links nach rechts an Bedeutung. Zur Analyse wird zusätzlich die Energieflexibilität der Produktionsstation eingetragen. Somit kann leicht abgeleitet werden, welche Zustände bzgl. der Energieflexibilität der Produktionsstation flexibilitätssteigernd oder -mindernd wirken.

In dem in Abbildung 43 dargestellten Beispiel einer Produktionsstation mit fünf Ausgangszuständen wirken nur die Zustände 5 und 1 flexibilitätssteigernd. Allerdings haben beide Ausgangszustände nur einen geringen zeitlichen Anteil, wodurch die niedrige Energieflexibilität von Zustand 2 stärker ins Gewicht fällt. Es empfiehlt sich daher, entweder die zeitlichen Anteile der Zustände 1 und 5 zu steigern oder die Energieflexibilität der Zustände 4 und 2 zu erhöhen.

Die Energieflexibilität eines Ausgangszustandes lässt sich dagegen auf zwei Arten steigern, der Identifikation von weiteren Maßnahmen (vgl. Abschnitt 6.4) oder der Steigerung der Wirksamkeit der bestehenden Maßnahmen. Die Wirksamkeit einer Maßnahme wird durch den Gewichtungsfaktor der Maßnahme $\alpha_{i,m}$ ausgedrückt. Dieser wiederum setzt sich aus dem Produkt der einzelnen zeitlichen und dem kostenbezogenen Gewichtungsfaktor zusammen. Somit lässt sich die Wirksamkeit einer Maßnahme analysieren, indem die einzelnen Gewichtungsfaktoren in einem Netz-Diagramm aufgetragen werden, wie in Abbildung 44 dargestellt.

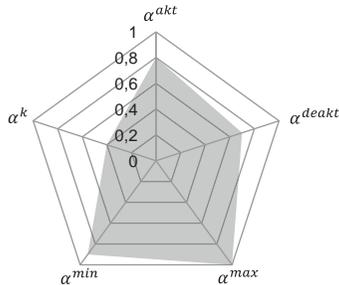


Abbildung 44: Analyse der Wirksamkeit von Maßnahmen

Abbildung 44 zeigt das Netz-Diagramm zur Analyse der Wirksamkeit einer Maßnahme. Dazu sind die fünf Gewichtungsfaktoren auf je einer Achse aufgetragen. Der sich errechnende Gesamt-Gewichtungsfaktor ist durch die gefüllte Fläche dargestellt. Je vollständiger das Netz dabei gefüllt ist, desto wirksamer ist somit die Maßnahme. Bei dem in Abbildung 44 dargestellten Beispiel zeigt sich vor allem, dass die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme ungenügend ist. In diesem Fall müssen somit Optimierungen vorgenommen werden, z. B. Senkung der Rüstkosten, um die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme weiter zu steigern.

6.8 Anwendungsfälle der Bewertung

In diesem Abschnitt sollen die Anwendungsfälle erläutert werden, welche im Rahmen der Vorgehensweise zur Bewertung der Energieflexibilität auftreten können, d. h. es wird aufgezeigt, welche Schritte der Vorgehensweise wann zu durchlaufen sind. Da die Vorgehensweise der Ermittlung von Energieflexibilität dient, muss der gesamte Prozess einmalig durchlaufen werden, wenn ein Unternehmen die Einführung eines last- und zeitvariablen Strompreismodells plant. Kennt ein Unternehmen dagegen seine Energieflexibilität, weil eine Bewertung bereits durchgeführt wurde, sind insbesondere neu beschaffte Produktionsstationen initial zu bewerten.

Auf Basis dieser Initialbewertung müssen dann einzelne Schritte der Vorgehensweise regelmäßig durchlaufen werden. Dabei sind verschiedene sich ändernde Rahmenbedingungen zu unterscheiden, nach welchen sich die wiederholt durchzuführenden Schritte richten. Eine Übersicht über die drei auftretenden Anwendungsfälle gibt dabei Abbildung 45.

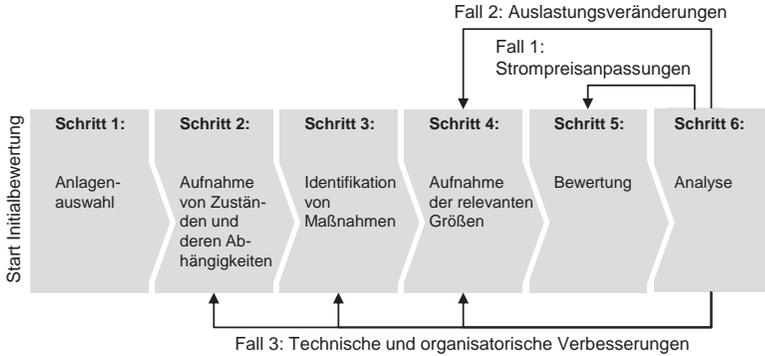


Abbildung 45: Anwendungsfälle der Bewertung

Fall 1: Strompreisanpassungen

In der Regel richten sich die Vergütungen bzw. die einzelnen Strompreiseniveaus bei zeit- und lastvariablen Strompreismodellen nach den an den verschiedenen Börsen erzielten Preisen. Da aber die Bewertung der Energieflexibilität von den durchschnittlichen Strompreisen bzw. der durchschnittlichen Vergütung bei Laständerungen abhängt (vgl. Abschnitt 5.3.2), sind die Schritte 5 und 6 der Vorgehensweise durchzuführen, sobald es zu größeren Änderungen bzgl. der erzielten Preisen an der Strombörse bzw. zu Anpassungen im Stromtarif kommt.

Fall 2: Auslastungsänderung

Einzelne Maßnahmen zur Beeinflussung des Energiebedarfs stehen nur in einzelnen Ausgangszuständen zur Verfügung. Die Verfügbarkeit dieser Ausgangszustände und somit auch der Maßnahmen hängt wiederum von der Auslastung der betrachteten Produktionsstation ab. Verändert sich die produzierte Stückzahl eines Produktionssystems bzw. einer Produktionsstation, ist daher auch eine Anpassung der zeitlichen Anteile im Rahmen der Bewertung von Nöten. Es sind daher die Schritte 4-6 der Vorgehensweise zu durchlaufen, um die Auswirkungen der Auslastungsänderung auf die Energieflexibilität der Produktionsstation untersuchen zu können.

Fall 3: Technische und organisatorische Verbesserungen

Die Vorgehensweise zur Bewertung der Energieflexibilität dient auch der Identifikation von Verbesserungsmöglichkeiten. Werden dabei technische oder organi-

Vorgehensweise zur Bewertung der Energieflexibilität

satorische Maßnahmen zur Verbesserung der Energieflexibilität durchgeführt, so ist in Folge dessen die gesteigerte Energieflexibilität zu bewerten. Je nach Art und Umfang der Verbesserungen müssen einzelne Schritte der Vorgehensweise wiederholt durchlaufen werden. Kommt es z. B. zu grundlegenden technischen Änderungen an der Produktionsstation, ist nahezu die gesamte Vorgehensweise wiederholt durchzuführen.

7 Anwendung der Energieflexibilitätsbewertung

7.1 Allgemeines

In diesem Kapitel soll die Anwendung der in den beiden vorangegangenen Kapiteln entwickelten Energieflexibilitätsbewertung erläutert werden. Hierfür wird zunächst in Abschnitt 7.2 ein Softwaretool vorgestellt, welches zur Unterstützung des Bewertenden entwickelt wurde. Anschließend erfolgt in Abschnitt 7.3 die eigentliche Durchführung der Bewertung am Beispiel einer Fabrik zur Herstellung verschiedenster Graphit-Produkte. Dabei werden die Schritte der Vorgehensweise zur Bewertung durchlaufen und erläutert. Schließlich erfolgt in Abschnitt 7.4 eine kritische Würdigung der entwickelten Kennzahl und Vorgehensweise. Hierfür wird zunächst eine Einordnung der Bewertung nach dem Schema zur Klassifizierung von Flexibilitätsbewertungsverfahren nach TONI & TONCHIA (1998, S. 1605) vorgenommen. Anschließend wird untersucht, wie die entwickelte Kennzahl und Vorgehensweise die in Abschnitt 4.2 gestellten Anforderungen erfüllt. Schließlich werden der Aufwand für die Datenbeschaffung und die Bewertung erläutert und dem auftretenden Nutzen gegenübergestellt.

7.2 Softwaremodell

Im Rahmen der Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion ist eine Vielzahl an Daten aufzunehmen, deren Menge mit der Anzahl der zu bewertenden Produktionsstationen, Zustände und den Maßnahmen je Ausgangszustand stark zunimmt. Die im Zuge der Bewertung durchzuführenden Berechnungen weisen dabei eine Komplexität auf, welche mit einfachen Tabellenkalkulationsprogrammen, wie z. B. Microsoft® Office Excel®, schwer zu bewältigen ist. Um somit insbesondere die Anforderung der *Praxistauglichkeit* (vgl. Abschnitt 4.2) erfüllen zu können, wurde ein Softwaretool entwickelt, in welchem die Berechnung der Kennzahl implementiert wurde und den Bewertenden bei der Datenverwaltung, Bewertung und Analyse unterstützt.

Das Softwaretool ist dabei in der Programmiersprache C# mithilfe des Programms Microsoft® Visual Studio® umgesetzt worden. Das Tool kann somit den Anwendern als einfache ausführbare EXE-Datei zur Verfügung gestellt werden, welche daher auf jedem Rechner mit dem Betriebssystem Microsoft®

Anwendung der Energieflexibilitätsbewertung

Windows® ausgeführt werden kann. Weitere unterstützende Programme sind dabei nicht von Nöten.

Die Dateneingabe erfolgt über verschiedene Programm-Fenster, welche den Anwender anleiten. Die für die Bewertung benötigten Daten werden dabei durch entsprechende Eingabefelder abgefragt. Abbildung 46 zeigt z. B. das Fenster zum Anlegen und Beschreiben der einzelnen Maßnahmen eines Ausgangszustandes.

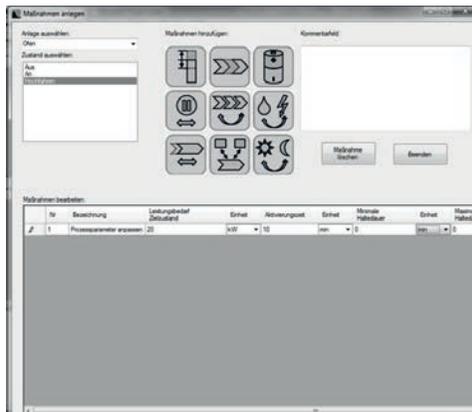


Abbildung 46: Screenshot des Softwaretools

Hierbei können im linken oberen Bereich des Fensters die Produktionsstation sowie der Ausgangszustand der Produktionsstation ausgewählt werden, in welchem die jeweiligen Maßnahmen zur Verfügung stehen. Die Beschreibung der Maßnahmen erfolgt dann im unteren Bereich des Fensters.

Die eingegebenen Daten können dann in einer XML-Datei gespeichert werden. Dies ermöglicht den Austausch von Daten sowie Anpassungen der Bewertung zu einem späteren Zeitpunkt. Die Speicherung der Daten im XML-Dateiformat bietet sich an, da dieses Dateiformat v. a. für den plattform- und implementationsunabhängigen Austausch von Daten eingesetzt wird (SEBESTYEN 2010, S. 34; VONHOEGEN 2013, S. 33). Die Rohdaten lassen sich somit auch unabhängig von dem Softwaretool analysieren und können zur Datenverarbeitung weiterer Anwendungen herangezogen werden. Außerdem lässt sich durch die hierarchisch strukturierte Form der Datenspeicherung dieses Dateiformats die hierarchische Logik der Bewertung ideal abbilden.

Nachdem alle zur Bewertung benötigten Daten hinterlegt wurden, werden die Berechnungen von dem Tool eigenständig ausgeführt und die entsprechenden Abbildungen zur graphischen Auswertung des Bewertungsergebnisses generiert.

Im Folgenden soll nun die Bewertung der Energieflexibilität am Beispiel einer Fabrik zur Herstellung verschiedenster Graphit-Produkte erläutert werden.

7.3 Projektbeispiel

7.3.1 Stationsauswahl

Der erste Schritt der entwickelten Vorgehensweise stellt die Auswahl der zu bewertenden Produktionsstationen mithilfe der in Abbildung 39 dargestellten Auswahlmatrix dar. Da die Einsparpotentiale der Energieflexibilität von den zu verschiebenden Energiemengen abhängen, wurden hierfür die maximalen Leistungs- sowie die Jahresenergiebedarfe der Hauptverbraucher des betrachteten Werkes herangezogen. Das Ergebnis der Untersuchung ist in Abbildung 47 dargestellt.

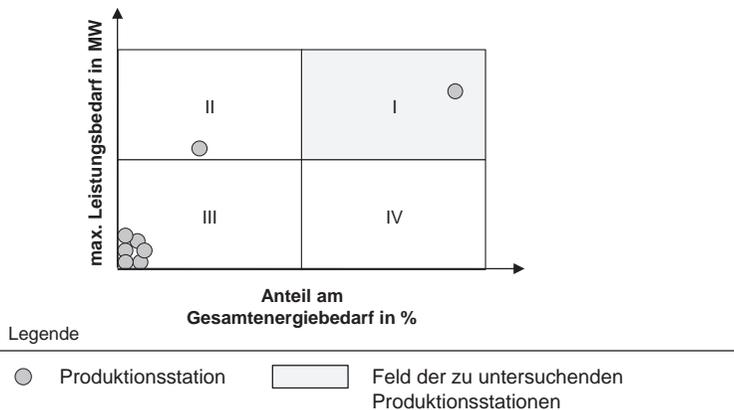


Abbildung 47: Stationsauswahl des Projektbeispiels

Mithilfe der Matrix ist ersichtlich, dass eine Produktionsstation maßgeblich den Leistungs- und Energiebedarf der Fabrik beeinflusst. Diese soll im Folgenden weiter betrachtet und bewertet werden.

Es handelt sich hierbei um eine Produktionsstation zur Produktion von Spezialgraphitbauteilen. Die Produktionsstation arbeitet dabei nach dem sog. Castner-Prinzip, bei welchem der ungeordnete Kohlenstoff in Graphit umgewandelt wird, indem die zu graphitierenden Kohlenstoffkörper zwischen den Elektroden aneinander gereiht werden und direkt längs vom elektrischen Strom durchfließen werden (HOLLEMAN & WIBERG 1995, S. 834). Die Kohlenstoffkörper sind dabei von Isoliermaterial umgeben, siehe Abbildung 48.

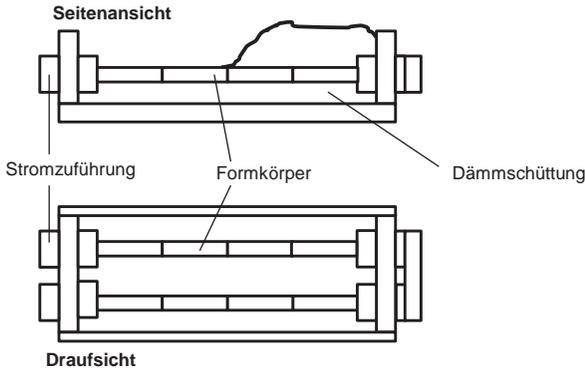


Abbildung 48: Darstellung der betrachteten Produktionsstation nach VDI 3467

7.3.2 Aufnahme der Ausgangszustände und deren Abhängigkeiten

Im nächsten Schritt gilt es, die Zustände der zu bewertenden Produktionsstation sowie deren Abhängigkeiten aufzunehmen. Hierfür sind entsprechende Lastgänge zu analysieren. Abbildung 49 zeigt den schematischen Verlauf des Leistungsbedarfs, welchen die Produktionsstation im Rahmen der Produktion eines Loses aufweist.

Nachdem die Produktionsstation vollständig mit den zu graphitierenden Materialien sowie Isoliermaterialien vorbereitet wurde – dabei ist die Station ausgeschaltet – kann mit dem Produktionsprozess gestartet werden. Der Leistungsbedarf der Produktionsstation steigt dann sprunghaft an und bleibt auf dem eingenommenen Niveau für eine längere Zeit konstant, bis die Materialien in der Station eine gleichmäßige Temperaturverteilung aufweisen. Anschließend erfolgt die langsame Steigerung des Leistungsbedarfs der Produktionsstation auf den maximalen Wert. Das Leistungsniveau bleibt dann wieder über eine längere Zeit auf einem konstanten Niveau. Hierbei erfolgt die eigentliche Graphitierung des Materials.

Im Anschluss des Graphitierprozesses kann die Produktionsstation ausgeschaltet werden.

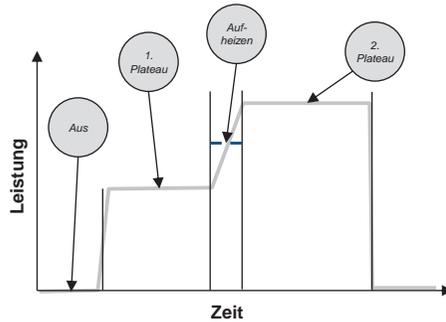


Abbildung 49: Lastgang und Zustandsdefinition der betrachteten Produktionsstation

Für die erläuterte Lastkurve können somit insgesamt vier Ausgangszustände ermittelt werden: „Aus“, das „1. Plateau“, „Aufheizen“ auf die maximale Leistung und das „2. Plateau“.

Im nächsten Schritt sind die Ausgangszustände sowie deren Abhängigkeiten in einem gerichteten Graphen darzustellen. Wie bereits erläutert, folgen nach dem Zustand „Aus“ die Zustände „1. Plateau“, „Aufheizen“ und „2. Plateau“, bis sich die Produktionsstation wieder im Zustand „Aus“ befindet. Darüber hinaus lässt sich die Produktionsstation vom „1. Plateau“ und „2. Plateau“ aus kurzfristig ab- und wieder anschalten. Weitere Zustandswechsel sind nicht möglich. Das sich somit ergebende Modell ist in Abbildung 50 dargestellt.

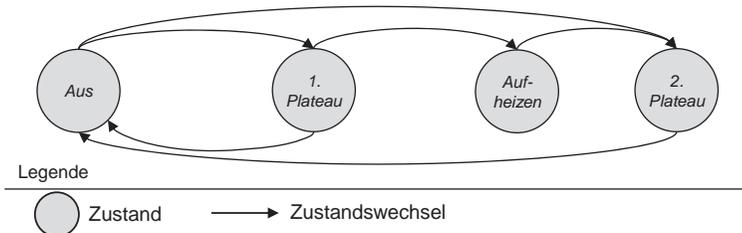


Abbildung 50: Zustandsmodell der betrachteten Produktionsstation

7.3.3 Identifikation von Maßnahmen

In diesem Schritt gilt es, die Maßnahmen zu identifizieren, welche in den jeweiligen Ausgangszuständen zur Verfügung stehen. Dabei kann das in Abbildung 50 aufgestellte Modell herangezogen werden, um mögliche Zustandswechsel und somit Maßnahmen zu ermitteln.

Ausgangszustand „Aus“

Der Ausgangszustand „Aus“ ermöglicht bei einer Auslastung kleiner 100 % grundsätzlich zwei Maßnahmen, die kurzfristige sowie mittelfristige Anpassung von Prozessstarts. Auch bei dem betrachteten Projektbeispiel stehen diese beiden Maßnahmen im Ausgangszustand „Aus“ zur Verfügung.

Ausgangszustand „1. Plateau“

Befindet sich die Produktionsstation im Ausgangszustand „1. Plateau“, lassen sich Änderungen des Energiebedarfs durch Unterbrechung des Prozesses sowie durch Anpassung der Prozessparameter erreichen. In diesem Prozessabschnitt wird das eingebaute Material auf eine gleichmäßige Temperaturverteilung gebracht. Da dieser Prozessschritt keine Auswirkungen auf die Bauteilqualität hat, können entsprechenden Anpassungen durchgeführt werden.

Ausgangszustand „Aufheizen“

Der Prozess des Aufheizens ist entscheidend für die Bauteilqualität. Da die Bauteilqualität von der Wahl der Prozessparameter abhängt, dürfen in diesem Ausgangszustand auch keine Anpassungen des Leistungsbedarfes durchgeführt werden. In diesem Ausgangszustand stehen somit keine Maßnahmen im Rahmen der Energieflexibilität zur Verfügung.

Ausgangszustand „2. Plateau“

Im Ausgangszustand „2. Plateau“ lässt sich ebenso wie im Ausgangszustand „1. Plateau“ der Produktionsprozess unterbrechen. Außerdem sind Anpassungen der Prozessparameter möglich.

7.3.4 Aufnahme der bewertungsrelevanten Größen

In diesem Abschnitt erfolgt die Aufnahme der bewertungsrelevanten Größen. Hierzu sind zunächst die Leistungsniveaus nach Formel (4.1) sowie die zeitlichen Anteile der einzelnen Ausgangszustände zu ermitteln. Für die betrachtete Produktionsstation ergibt sich somit folgende Verteilung der Leistungsniveaus der Ausgangszustände, siehe Tabelle 11. Demnach weist das „2. Plateau“ den höchsten Leistungsbedarf auf, die Leistungsbedarfe der anderen Ausgangszustände sind dazu ins Verhältnis gesetzt. Die zeitlichen Anteile der Ausgangszustände ergeben sich aus einer Auslastung von 80 %. Demnach nimmt der Ausgangszustand „Aus“ einen zeitlichen Anteil von 20 % ein, die Anteile der anderen Ausgangszustände lassen sich somit anhand von Lastkurven der Produktionsstation errechnen.

Tabelle 11: Kenngrößen der Ausgangszustände

Nummer	Bezeichnung	Leistungsbedarf	Zeitlicher Anteil
AZ ₁	Aus	0	20,0 %
AZ ₂	1. Plateau	0,44*P _{max}	18,5 %
AZ ₃	Aufheizen	0,78*P _{max}	30,8 %
AZ ₄	2. Plateau	P _{max}	30,7 %

Im nächsten Schritt sind neben den Zeit- und Kostenparameter auch die Leistungsänderungen aufzunehmen, welche sich durch die einzelnen Maßnahmen erzielen lassen. Auf Basis dessen ist eine entsprechende Nummerierung der Maßnahmen durchzuführen, siehe Tabelle 12.

Tabelle 12: Maßnahmensammlung der Produktionsstation

Nummer	Bezeichnung	Leistungsänderung
M _{1,1}	Auftrag kurzfristig vorziehen	0,78*P _{max}
M _{1,2}	Auftrag mittelfristig vorziehen	0,78*P _{max}
M _{2,1}	Prozessparameter anpassen	0,11*P _{max}
M _{2,2}	Prozessparameter anpassen	0,22*P _{max}
M _{2,3}	Prozessparameter anpassen	0,33*P _{max}
M _{2,4}	Prozess unterbrechen	0,44*P _{max}
M _{4,1}	Prozessparameter anpassen	0,11*P _{max}
M _{4,2}	Prozessparameter anpassen	0,22*P _{max}
M _{4,3}	Prozessparameter anpassen	0,33*P _{max}
M _{4,4}	Prozessparameter anpassen	0,44*P _{max}
M _{4,5}	Prozessparameter anpassen	0,55*P _{max}
M _{4,6}	Prozessparameter anpassen	0,66*P _{max}
M _{4,7}	Prozessparameter anpassen	0,77*P _{max}
M _{4,8}	Prozessparameter anpassen	0,88*P _{max}
M _{4,9}	Prozess unterbrechen	P _{max}

7.3.5 Bewertung und Analyse

7.3.5.1 Festlegung der Bewertungsfaktoren

Nachdem alle Ausgangszustände, Maßnahmen und ihre beschreibenden Größen aufgenommen wurden, müssen im nächsten Schritt die Bewertungsfaktoren festgelegt werden. Dies sind zum einen die spezifischen Zeitgrenzen und Kosten des betrachteten Strompreismodells, zum anderen sind dies die unternehmensspezifischen Faktoren der Bewertung, die Renditeforderung des Unternehmens sowie die Preisschranke zur Nutzung der Energieflexibilität.

Im Rahmen des Projektbeispiels werden die Strompreise und zeitliche Grenzen eines RTP-Tarifs betrachtet. Der Tarif ändert stündlich seine Preisniveaus, wobei zeitlich aufeinanderfolgende Preise ähnliche Niveaus aufweisen. Aus diesem Grund beträgt die durchschnittliche Zeitdauer eines Strompreisniveaus 120 Minuten. Aufgrund der stündlich schwankenden Preise sind dabei kurze Aktivierungs- sowie Deaktivierungsdauern von jeweils 15 Minuten erforderlich. Um zudem ausreichend lange von einem günstigen Strompreisniveau profitieren zu

können, müssen mögliche Maßnahmen mindestens 15 Minuten aufrecht gehalten werden. Es wird davon ausgegangen, dass längere Haltedauern als 240 Minuten keinen weiteren Nutzen für das Unternehmen nach sich ziehen. Der mittlere Strompreis beträgt im Rahmen dieses Projektbeispiels 120 €/MWh, was dem derzeitigen Durchschnitt in der Industrie entspricht. Eine Übersicht der festgelegten Bewertungsfaktoren des zugrunde gelegten Strompreismodells ist in Tabelle 13 dargestellt

Tabelle 13: Bewertungsfaktoren des Strompreismodells

Faktor	Bezeichnung	Wert
$t_{\text{grenz}}^{\text{akt}}$	Geforderte Aktivierungsdauer einer Maßnahme	15 Min.
$t_{\text{grenz}}^{\text{deakt}}$	Geforderte Deaktivierungsdauer einer Maßnahme	15 Min.
\bar{t}^E	Durchschnittliche Zeitdauer eines Strompreinsniveaus	120 Min.
$t_{\text{grenz}_o}^{\text{max}}$	Maximal geforderte maximale Verweildauer einer Maßnahme	240 Min.
$t_{\text{grenz}_u}^{\text{max}}$	Minimal geforderte maximale Verweildauer einer Maßnahme	15 Min.
$t_{\text{grenz}_o}^{\text{min}}$	Minimal geforderte minimale Verweildauer einer Maßnahme	240 Min.
$t_{\text{grenz}_u}^{\text{min}}$	Maximal geforderte minimale Verweildauer einer Maßnahme	15 Min.
\bar{k}^E	Mittlerer Strompreis	120 €/MWh

Neben den Bewertungsfaktoren des Strompreismodells sind außerdem die unternehmensspezifischen Faktoren der Bewertung festzulegen. Im Rahmen dieser Bewertung wird davon ausgegangen, dass das Unternehmen, welches die betrachtete Produktionsstation betreibt, sich neutral bis risikofreudig in Bezug auf die Anpassung ihres Energiebedarfs verhält. Dies bedeutet, dass das Unternehmen mittlere Renditeforderungen an eine Anpassung des Energiebedarfs stellt sowie regelmäßige Anpassungen des Produktionsprozesses und somit des Energiebedarfs der betrachteten Produktionsstation aufgrund von Änderungen des Strompreises vorzunehmen bereit ist. Die festzulegenden Parameter im Rahmen dieser Bewertung lassen sich somit folgendermaßen quantifizieren, siehe Tabelle 14.

Tabelle 14: Unternehmensspezifische Bewertungsfaktoren

Faktor	Bezeichnung	Wert
δ	Preisschranke zur Nutzung der Energieflexibilität	75 %
r	Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung der Renditeforderungen des Unternehmens	2

7.3.5.2 Bewertung und Analyse des Bewertungsergebnisses

Auf Basis der im vorangegangenen Schritt festgelegten Bewertungsfaktoren lassen sich nun die Gewichtungsfaktoren der einzelnen Maßnahmen berechnen. Das Ergebnis dieses Vorgangs zeigt Tabelle 15.

Tabelle 15: Unternehmensspezifische Bewertungsfaktoren

Nummer	Bezeichnung	α	α^{akt}	α^{deakt}	α^{min}	α^{max}	α^{k}
M _{1,1}	Auftrag kurzfristig vorziehen	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
M _{1,2}	Auftrag mittelfristig vorziehen	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
M _{2,1}	Prozessparameter anpassen	0,37	1,00	1,00	1,00	1,00	0,37
M _{2,2}	Prozessparameter anpassen	0,57	1,00	1,00	1,00	1,00	0,57
M _{2,3}	Prozessparameter anpassen	0,63	1,00	1,00	1,00	1,00	0,63
M _{2,4}	Prozess unterbrechen	0,66	1,00	1,00	1,00	1,00	0,66
M _{4,1}	Prozessparameter anpassen	0,29	1,00	1,00	1,00	1,00	0,29
M _{4,2}	Prozessparameter anpassen	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50
M _{4,3}	Prozessparameter anpassen	0,57	1,00	1,00	1,00	1,00	0,57
M _{4,4}	Prozessparameter anpassen	0,60	1,00	1,00	1,00	1,00	0,60
M _{4,5}	Prozessparameter anpassen	0,62	1,00	1,00	1,00	1,00	0,62
M _{4,6}	Prozessparameter anpassen	0,63	1,00	1,00	1,00	1,00	0,63
M _{4,7}	Prozessparameter anpassen	0,64	1,00	1,00	1,00	1,00	0,64
M _{4,8}	Prozessparameter anpassen	0,64	1,00	1,00	1,00	1,00	0,64
M _{4,9}	Prozess unterbrechen	0,65	1,00	1,00	1,00	1,00	0,65

Es ist ersichtlich, dass alle identifizierten Maßnahmen der Produktionsstation die zeitlichen Anforderungen des Strompreismodells erfüllen, d. h. auch die Wechselwirkungen mit vor- und nachgelagerten Produktionsstationen die Energieflexibilität nicht mindern. Allerdings führen die Kosten der Maßnahmen dazu, dass einzelne Maßnahmen nicht vollständig flexibilitätssteigernd wirken. So übersteigen z. B. die Kosten der Maßnahme M_{1,2} den Nutzen eines niedrigen Stromprei-

ses, wodurch sich der Faktor $\alpha_{1,2}^k$ und somit auch der Faktor $\alpha_{1,2}$ zu null errechnen. Insbesondere die Zinskosten, welche aufgrund der zusätzlichen Lagerung der Produkte entstehen, übersteigen hierbei die Kosteneinsparungen. Bei der Umsetzung der Maßnahmen, welche in den Ausgangszuständen AZ_2 und AZ_3 zur Verfügung stehen, treten insbesondere Energiekosten auf, welche aufgrund erneuter Aufheizprozesse der Produktionsstation entstehen.

Auf Basis der gewichteten Leistungsdifferenzen der Maßnahmen lassen sich nun die Energieflexibilitäten der einzelnen Ausgangszustände sowie die gesamte Energieflexibilität der Produktionsstation errechnen, siehe Abbildung 51.

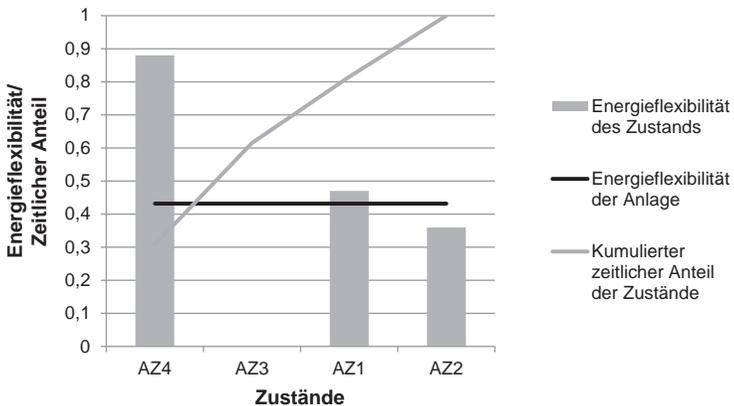


Abbildung 51: Energieflexibilität der betrachteten Produktionsstation

Die Bewertung der Energieflexibilität der Produktionsstation zeigt, dass die Station eine Energieflexibilität von 44 % aufweist. Dies bedeutet, dass die Produktionsstation zur Anpassung des Energiebedarfs der Fabrik an den betrachteten RTP-Tarif grundsätzlich geeignet ist, die Energieflexibilität aber noch weiter gesteigert werden kann.

Bei Betrachtung der Energieflexibilität der einzelnen Ausgangszustände ist ersichtlich, dass insbesondere Ausgangszustand AZ_4 stark flexibilitätssteigernd wirkt. Dies ist damit zu erklären, dass in diesem Ausgangszustand die größten Leistungsänderung erzielt werden können, des Weiteren stehen in diesem Ausgangszustand eine Vielzahl an Maßnahmen zur Verfügung. Demgegenüber weist der Ausgangszustand AZ_3 keine Energieflexibilität auf, da in diesem Ausgangszustand keine Maßnahmen zur Verfügung stehen.

Anwendung der Energieflexibilitätsbewertung

Neben der Analyse der Energieflexibilität der Produktionsstation sowie der einzelnen Ausgangszustände lässt sich mithilfe der Bewertung auch eine Rangfolge der zur Verfügung stehenden Maßnahmen ableiten. Diese ist in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 16: Maßnahmenauswahl

Rang	Nummer	Bezeichnung	α	P	αP
1	M _{1,1}	Auftrag kurzfristig vorziehen	1	$0,78 \cdot P_{\max}$	$0,78 \cdot P_{\max}$
2	M _{4,9}	Prozess unterbrechen	0,65	P_{\max}	$0,65 \cdot P_{\max}$
3	M _{4,8}	Prozessparameter anpassen	0,64	$0,88 \cdot P_{\max}$	$0,56 \cdot P_{\max}$
4	M _{4,7}	Prozessparameter anpassen	0,64	$0,77 \cdot P_{\max}$	$0,49 \cdot P_{\max}$
5	M _{4,6}	Prozessparameter anpassen	0,63	$0,66 \cdot P_{\max}$	$0,42 \cdot P_{\max}$
6	M _{4,5}	Prozessparameter anpassen	0,62	$0,55 \cdot P_{\max}$	$0,34 \cdot P_{\max}$
7	M _{2,4}	Prozess unterbrechen	0,66	$0,44 \cdot P_{\max}$	$0,29 \cdot P_{\max}$
8	M _{4,4}	Prozessparameter anpassen	0,60	$0,44 \cdot P_{\max}$	$0,26 \cdot P_{\max}$
9	M _{2,3}	Prozessparameter anpassen	0,63	$0,33 \cdot P_{\max}$	$0,21 \cdot P_{\max}$
10	M _{4,3}	Prozessparameter anpassen	0,57	$0,33 \cdot P_{\max}$	$0,19 \cdot P_{\max}$
11	M _{2,2}	Prozessparameter anpassen	0,57	$0,22 \cdot P_{\max}$	$0,13 \cdot P_{\max}$
12	M _{4,2}	Prozessparameter anpassen	0,50	$0,22 \cdot P_{\max}$	$0,11 \cdot P_{\max}$
13	M _{2,1}	Prozessparameter anpassen	0,37	$0,11 \cdot P_{\max}$	$0,04 \cdot P_{\max}$
14	M _{4,1}	Prozessparameter anpassen	0,29	$0,11 \cdot P_{\max}$	$0,03 \cdot P_{\max}$
15	M _{1,2}	Auftrag mittelfristig vorziehen	0,00	$0,78 \cdot P_{\max}$	0

Die Tabelle zeigt, dass insbesondere das kurzfristige Vorziehen von Aufträgen im Rahmen der Energieflexibilität sinnvoll ist. Dadurch kann der Leistungsbedarf gesteigert werden, ohne dass hierbei ein großer Umplanungsaufwand nötig ist bzw. sonstige zusätzliche Kosten entstehen. Die Verfügbarkeit dieser Maßnahme sinkt jedoch mit einer steigenden Auslastung der Produktionsstation. Ebenso ist das Abschalten der Produktionsstation bzw. die starke Absenkung der Leistungsnachfrage ausgehend von Ausgangszustand AZ_4 nützlich. Hierbei können die größten Kosteneinsparungen erzielt werden, da, ausgehend vom Ausgangszustand AZ_4 , die größten Leistungsänderungen vollzogen werden können.

7.4 Bewertung der entwickelten Kennzahl und Vorgehensweise

7.4.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt soll eine kritische Würdigung der entwickelten Kennzahl und Vorgehensweise vorgenommen werden. Dafür wird zunächst in Abschnitt 7.4.2 eine Einordnung der Bewertung in das in Abbildung 13 dargestellte Klassifizierungsschema für Vorgehen zur Bewertung von Flexibilität nach TONI & TONCHIA (1998) durchgeführt. Im nächsten Schritt erfolgt die Überprüfung der Erfüllung der einzelnen in Abschnitt 4.2 definierten Anforderungen hinsichtlich der Bewertung der Energieflexibilität. Abschließend werden die bei der Energieflexibilitätsbewertung auftretenden Aufwände mit dem entstehenden Nutzen gegenübergestellt und so eine wirtschaftliche Bewertung der Vorgehensweise vorgenommen.

7.4.2 Einordnung der entwickelten Bewertung

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Bewertung der Energieflexibilität stellt nach dem Klassifizierungsschema nach TONI & TONCHIA (1998) (vgl. Abschnitt 2.4.2) einen synthetischen Ansatz dar, da er sowohl direkte als auch indirekte Verfahren zur Bewertung der Energieflexibilität nutzt und diese zur Generierung einer aggregierten Kennzahl $E_{Station}$ zusammenführt. Den Kern der Bewertung stellt dabei die direkte und objektive Erfassung der Anpassungsoptionen, d. h. der einnehmbaren Zielzustände bzw. die dafür zur Verfügung stehenden Maßnahmen, dar. Diese werden genutzt, um die Bewertung der Energieflexibilität vorzunehmen. Allerdings wurde gezeigt, dass eine reine Betrachtung der Anzahl der möglichen Zielzustände die Energieflexibilität nicht richtig wiedergibt, da die zur Erreichung der Zielzustände zur Verfügung stehenden Maßnahmen darüber hinaus die Anforderungen des jeweiligen genutzten Strompreismodells erfüllen müssen, um im Rahmen der Energieflexibilität einen Nutzen zu erzielen. Daher wird durch die Berechnung des Gewichtungsfaktors der Maßnahmen $\alpha_{i,m}$ eine indirekte hilfsgößenbasierte Bewertung vorgenommen. Hierbei werden ökonomische Größen, d. h. die einzelnen in Abschnitt 5.5 identifizierten Kostenarten, sowie nicht-ökonomische Größen, d. h. die unterschiedlichen Zeitparameter und Leistungsänderungen, die sich durch die Maßnahmen vollziehen lassen, erfasst. Die Einordnung der eingesetzten Verfahren zeigt Abbildung 52.

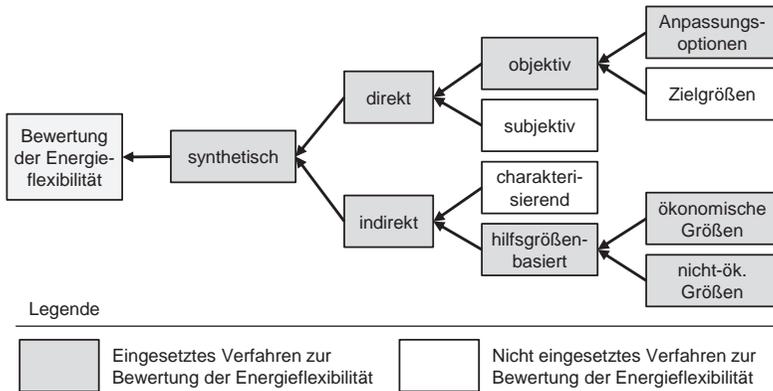


Abbildung 52: Einordnung der Bewertung der Energieflexibilität

7.4.3 Erfüllung der Anforderungen

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion. Hierbei galt es, spezielle sowie allgemeine Anforderungen zu berücksichtigen, welche sich zum einen aus der Bewertungsaufgabe ergeben und zum anderen eine einfache Durchführung der Bewertung ermöglichen sollen. Die in Abschnitt 4.2 definierten Anforderungen wurden dabei folgendermaßen erfüllt:

- *Quantitative Bewertung:* Das Ergebnis der Bewertung stellt eine Kennzahl dar, welche die Energieflexibilität einer Produktionsstation quantifiziert. Die Kennzahl befindet sich dabei im Wertebereich von 0 bis 1 bzw. von 0 bis 100 %, wobei der Wert 1 für maximale Energieflexibilität steht und der Wert 0 nicht vorhandene Energieflexibilität beschreibt.
- *Berücksichtigung der Flexibilitätsdimensionen:* Flexibilität lässt sich unter Berücksichtigung der drei Dimensionen, die Zustands-, die Zeit- sowie die Kostendimension, bewerten. Durch die Gewichtung der Maßnahmen mithilfe unterschiedlicher Zeit- und Kostenparameter finden die Zeit- und Kostendimension Berücksichtigung. Darüber hinaus werden die zur Verfügung stehenden Zielzustände als Maß für die Energieflexibilität einer Produktionsstation herangezogen. Somit werden alle drei Flexibilitätsdimensionen im Rahmen der in dieser Arbeit entwickelten Bewertung berücksichtigt.

- *Betrachtung von Maßnahmen:* Im Rahmen dieser Arbeit wurden zehn unterschiedliche Maßnahmen zur Beeinflussung des Energiebedarfs identifiziert. Diese können genutzt werden, um die möglichen Zielzustände einzunehmen. Die Aufnahme der Maßnahmen stellt den dritten Schritt der Vorgehensweise dar, somit findet die Betrachtung der Maßnahmen im Rahmen der Bewertung statt.
- *Berücksichtigung von Anforderungen des Strompreismodells:* Unterschiedliche Strompreismodelle stellen verschiedene Anforderungen an die Energieflexibilität in der Produktion. Durch die Festlegung von Zeit- und Kostengrenzen bei der Berechnung der Gewichtungsfaktoren von Maßnahmen werden die spezifischen Anforderungen des betrachteten Strompreismodells bei der Bewertung berücksichtigt.
- *Praxistauglichkeit:* Der Anforderung nach der Praxistauglichkeit der Bewertung ist durch unterschiedliche Aspekte berücksichtigt worden. Hierbei ermöglicht insbesondere die Umsetzung der Kennzahlenberechnung in einem Softwaretool die Anwendung in der Praxis, da der Nutzer des Softwaretools lediglich die benötigten Inputparameter der Bewertung eingeben muss und die eigentliche Bewertung bzw. Berechnung der Energieflexibilitätskennzahl durch das Softwaretool vollzogen wird. Des Weiteren steigert die Form der entwickelten Kennzahlen die Praxistauglichkeit. Sie ermöglicht eine einfache Interpretation des Bewertungsergebnisses und zeigt so dem Bewertenden deutlich den Optimierungsbedarf auf bzw. ermöglicht die einfache Identifizierung der Maßnahmen, welche zur Anpassung des Energiebedarfs genutzt werden sollen.
- *Übertragbarkeit:* Die Bewertung der Energieflexibilität erfolgt anhand der zur Verfügung stehenden Maßnahmen und den dadurch einnehmbaren Zielzustände einer Produktionsstation. Da die Energieflexibilitätsmaßnahmen allgemeingültig definiert wurden und die Definition von Zuständen unabhängig der Technologie der betrachteten Produktionsstation vorgenommen werden kann, ist davon auszugehen, dass die Übertragbarkeit der Bewertung auf unterschiedliche Branchen und Produktionsstationen bzw. Maschinen gegeben ist.

7.4.4 Aufwand und Nutzen der Bewertung

In diesem Abschnitt werden die bei der Durchführung der entwickelten Bewertung auftretenden Aufwände mit dem entstehenden Nutzen gegenübergestellt und so eine wirtschaftliche Bewertung vorgenommen.

Aufwände der Bewertung

Die Aufwände, welche bei der Durchführung der Bewertung entstehen, lassen sich in drei Gruppen einteilen, die *initialen Aufwände*, die *Aufwände je Bewertungsfall* und die *regelmäßigen Aufwände*.

Im Rahmen der *initialen Aufwände* gilt es, eine Liste aller Produktionsstationen des betrachteten Bereichs aufzustellen. Um anschließend eine Auswahl der zu bewertenden Produktionsstationen vornehmen zu können (vgl. Abschnitt 6.2), sind darüber hinaus der maximale Leistungsbedarf sowie der Energiebedarf der Produktionsstationen zu erfassen. Im Rahmen dieser Datenaufnahme sind somit u. U. Leistungsmessungen durchzuführen. Da aber Unternehmen, welche sich energieflexibel Verhalten und ihr Potential, Lasten zu verschieben, vermarkten wollen, eine ausreichend große Transparenz bzgl. der Leistungsbedarfe und Energieverbräuche der einzelnen Produktionsstationen benötigen⁷, ist davon auszugehen, dass die geforderten Informationen i. d. R. vorliegen und im Rahmen der Durchführung der Bewertung hier keine Aufwände entstehen.

Darüber hinaus sind weitere Informationen initial zu erfassen, welche für die Energieflexibilitätsbewertung einzelner Produktionsstationen vorliegen müssen. Dies sind zum einen die spezifischen Parameter des betrachteten Strompreismodells und zum anderen die unternehmensspezifischen Parameter der Bewertung. Unterschiedliche Strompreismodelle stellen verschiedene Anforderungen an die Energieflexibilität einer Produktion, d. h. an die geforderten Reaktionszeiten und die Dauern von Leistungsanpassungen. Aus diesem Grund werden diese Anforderungen bei der Berechnung der Gewichtungsfaktoren der Maßnahmen berücksichtigt und müssen initial ermittelt werden. Dies kann unter Einbeziehung der relevanten Unternehmensbereiche geschehen, z. B. dem Energieeinkauf, welcher detaillierte Kenntnisse über die jeweiligen Stromverträge hat. Ggf. ist hierbei auch der Energieversorger, mit welchem der Vertrag geschlossen wurde bzw. werden soll, beratend hinzuziehen. Idealerweise erarbeitet das Unternehmen

⁷ Insbesondere im Rahmen von anreizbasierten Programmen ist die Installation von Leistungsmessgeräten vorgeschrieben, damit der Nachweis erbracht werden kann, dass eine Leistungsänderung im Bedarfsfall vollzogen worden ist.

dabei eine Datenbank, in welcher die geforderten Parameter unterschiedlicher Strompreismodelle hinterlegt sind. Auf diese Weise können verschiedenste Anwendungsfälle der Energieflexibilität berechnet werden.

Im Rahmen der Bewertung werden darüber hinaus unternehmensspezifische Parameter berücksichtigt, die Renditeforderungen im Unternehmen sowie die Preisgrenze, ab welcher der Energiebedarf der Produktion angepasst werden soll. Diese Parameter sind ebenfalls zusammen mit allen betroffenen Unternehmensbereichen festzulegen. Hierbei sind insbesondere die Arbeitsplanung, das Controlling, der Energieeinkauf sowie die verantwortlichen Führungskräfte hinzu zuziehen. Insgesamt können die *initialen Aufwände* in Summe mit ca. 20 Personentage grob abgeschätzt werden.

Die *Aufwände je Bewertungsfall* treten bei der Bewertung je Produktionsstation auf. Dabei müssen zunächst die Zustände der betrachteten Produktionsstation aufgenommen werden. Hierfür sind zeitlich hoch aufgelöste Messungen von Nöten, d. h. Lastverläufe mit einem oder mehreren Leistungswerten pro Sekunde. Diese Daten liegen i. d. R. nicht vor und müssen mithilfe von Leistungsmessungen erfasst werden. Nach Identifikation der Zustände einer Produktionsstation sind die Maßnahmen und ihre beschreibenden Parameter aufzunehmen. Erfahrungsgemäß kann ein versierter Werkstattmeister oder Anlagenführer hier entsprechend Auskunft geben. Benötigte Informationen wie Bestandsmengen oder Sätze zur Kostenberechnung können aus ERP-Systemen entnommen werden. Insgesamt steigt jedoch der Aufwand der Erfassung mit der Anzahl der Ausgangszustände und der Anzahl der zur Verfügung stehenden Maßnahmen kontinuierlich an. Der *Aufwand je Bewertungsfall* wird mit ca. 3-7 Personentagen grob abgeschätzt.

Regelmäßige Aufwände treten z. B. einmal im Jahr auf, wenn die Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion neu vollzogen werden muss. Dies ist der Fall, wenn sich die Niveaus der Strompreise oder die Auslastung der Produktion bzw. einzelner Produktionsstationen grundlegend geändert haben (vgl. Abschnitt 6.8). Der Aufwand kann hierbei mit ca. 1 Personentag je Produktionsstation abgeschätzt werden.

Nutzen der Bewertung

Übergeordnetes Ziel und Nutzen der Bewertung der Energieflexibilität ist die Identifikation von Flexibilität, um (Energie-)Kostensparnisse erzielen zu können. Dabei ist aber das Potential der Kostensparnis unabhängig von der entwi-

ckelten Vorgehensweise zur Bewertung. Es hängt vielmehr vom genutzten Strompreismodell und den spezifischen Strompreisschwankungen bzw. Vergütungen des Preismodells ab. Auch ist entscheidend, wie häufig Leistungsanpassungen aufgrund des Strompreismodells vollzogen werden, wie groß die verschobenen Lasten sind und welche Kosten im Zuge dessen entstehen. Die Quantifizierung des Nutzens ist dabei individuell für jedes Unternehmen durchzuführen. Nach ALCÁZAR-ORTEGA ET AL. (2012B, S. 379) und MITRA ET AL. (2012, S. 178) lassen sich bei Nutzung variabler Strompreismodelle und unter Berücksichtigung von Anpassungskosten Energiekosteneinsparungen in Höhe von 5 % erzielen. Ein Unternehmen mit einem Jahresenergiebedarf von 15 GWh und einem durchschnittlichen Strompreis von 10 c/kWh hat somit Energiekosten von 1,5 Mio. € im Jahr. Eine Einsparung von 5 % entspricht dabei 75.000 €

Voraussetzung, dieses Potential nutzen zu können, ist, dass das Unternehmen seine Energieflexibilität kennt. Dieses Wissen liefert die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Bewertung. Weist ein Unternehmen dabei eine zu geringe Energieflexibilität auf, um von variablen Stromtarifen profitieren zu können, so kann das Bewertungsergebnis herangezogen werden, um die Energieflexibilität zu analysieren. Auf diese Weise kann die Energieflexibilität bewusst gesteigert werden, um somit in Zukunft von variablen Strompreisen profitieren zu können.

Gegenüberstellung von Aufwand und Nutzen

Die initialen Aufwände und die Aufwände je Bewertungsfall lassen sich bei Betrachtung von zwei Produktionsstationen bei einem Personentagesatz von 1.000 € auf ca. 30.000 € abschätzen. Die regelmäßigen Aufwände betragen bei zwei Produktionsstationen ca. 2.000 € im Jahr. Stellt man diese Aufwände dem möglichen Nutzen des berechneten Beispiels von 75.000 € pro Jahr gegenüber, so zeigt sich, dass die Wirtschaftlichkeit der Vorgehensweise zur Bewertung der Energieflexibilität grundsätzlich gegeben ist. Wie bereits erwähnt, ist dies aber von Fall zu Fall unterschiedlich. Im Rahmen des Ausbaus erneuerbarer Energien ist aber davon auszugehen, dass Strompreisschwankungen zunehmen und sich in Folge dessen höhere Stromkostensparnisse durch Energieflexibilität erzielen lassen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Zum Schutze der natürlichen Ressourcen und damit zum Erhalt der Lebensgrundlage der Menschen sind der Verbrauch von nicht erneuerbaren Ressourcen zu reduzieren und im Rahmen von Kreislaufwirtschaften diese wieder- und weiterzuverwenden. Somit sind auch zur Energieerzeugung unerschöpfliche Quellen, wie Windkraft oder Solarenergie, zu nutzen. Allerdings nehmen durch die Volatilität dieser Energieträger die Schwankungen im Stromnetz erzeugungsseitig zu. Um die zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit notwendige Stabilität des Stromnetzes aufrecht halten zu können, sind Verbraucher von elektrischem Strom als aktive Teilnehmer in den Strommarkt zu integrieren. Auf diese Weise lässt sich für das ganze Energiesystem eine Vielzahl an Vorteilen erzielen. Insbesondere Fabriken, welche ihren Energiebedarf mit der -erzeugung synchronisieren, können dadurch wirtschaftliche Vorteile erzielen. Voraussetzung hierfür ist aber, dass Unternehmen ihr Potential zur bewussten Lastverschiebung und die damit verbundenen Kosten kennen und bewerten können.

Da schwankende Strompreise bzw. eine sinkende Versorgungssicherheit von elektrischem Strom neue Herausforderungen für Fabriken darstellen, ist im Rahmen dieser Arbeit zunächst das turbulente Umfeld dargestellt worden, in welchem sich Fabriken befinden. Anschließend wurde das Konzept der Flexibilität als Lösungsansatz in Abgrenzung zur Wandlungsfähigkeit erläutert, um in diesem Umfeld agieren zu können. Unter Flexibilität wird dabei vor allem die aufwandsarme und schnelle Anpassung mithilfe von bekannten Maßnahmen innerhalb bestimmter Korridore verstanden. Aufbauend auf dieser Erkenntnis wurden verschiedene Flexibilitätsarten, wie z. B. die Mengenflexibilität, sowie die Dimensionen der Flexibilität erläutert, welche bei der Bewertung von Flexibilität zu berücksichtigen sind. Aufgrund der Mehrdimensionalität der Flexibilität existiert kein einheitliches Vorgehen zur Bewertung von Flexibilität. Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher die prinzipiellen Möglichkeiten, Flexibilität zu bewerten, erläutert. Anschließend sind mögliche Strompreismodelle vorgestellt worden, welche es energieflexiblen Fabriken ermöglichen, Kostenersparnisse zu erzielen. Im nächsten Schritt wurde eine Charakterisierung von Energieflexibilität vorgenommen, da in der wissenschaftlichen Literatur bisher kein einheitliches Verständnis bzgl. des Begriffes der Energieflexibilität herrscht. Hierbei zeigte sich,

dass Energieflexibilität als eine eigene Flexibilitätsart angesehen werden kann. Dies bedeutet, dass für die Bewertung von Energieflexibilität die drei allgemeinen Flexibilitätsdimensionen – die Zustands-, die Zeit- sowie die Kostendimension – zu berücksichtigen sind.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden die bestehenden Ansätze zur Nutzung und Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion im Bereich der Energietechnik, der Verfahrenstechnik sowie der Produktionstechnik untersucht. Dabei zeigte sich, dass es derzeit keine für die Produktionstechnik geeigneten Ansätze gibt, welche eine Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion ermöglichen. Insbesondere fehlt es an einer ganzheitlichen Betrachtung möglicher Anpassungsmaßnahmen sowie an der Berücksichtigung wichtiger Bewertungsgrößen der Flexibilität, wie Anpassungszeiten und -kosten.

Aufgrund dieser Defizite bestehender Ansätze wurde im nächsten Schritt die Konzeptionierung des Vorgehens zur Bewertung der Energieflexibilität vorgenommen. Hierbei sind zunächst Anforderungen identifiziert worden, welche an eine Bewertung der Energieflexibilität gestellt werden können. Aufbauend darauf wurde eine Modellierung von Produktionsstationen erläutert, mithilfe dieser sich das Verhalten bzw. die Energieflexibilität von Produktionsstationen durch Zustände und Maßnahmen beschreiben lassen. Ergänzend wurden zehn allgemeine Maßnahmen zur Beeinflussung des Energiebedarfs identifiziert. Als wichtigster Schritt im Rahmen der Konzeptionierung des Vorgehens zur Bewertung der Energieflexibilität wurden dann allgemeine Energieflexibilitätsaxiome abgeleitet. Sie beschreiben in qualitativer Form, wie sich die Energieflexibilität in Abhängigkeit einzelner Faktoren verändert.

Die abgeleiteten Energieflexibilitätsaxiome wurden im nächsten Schritt herangezogen, um eine Kennzahl zur Quantifizierung der Energieflexibilität einer Produktionsstation zu entwickeln. Hierbei finden die Zeit- und Kostenparameter in Form von Gewichtungsfaktoren der Maßnahmen Einfluss in die Bewertung, die Anzahl und Verteilung der Zustände dienen dabei als Maß für die Energieflexibilität.

Die entwickelte Bewertung der Energieflexibilität einer Produktionsstation ist zusätzlich in eine Vorgehensweise in sechs Schritten integriert worden. Dabei sind ausgehend von der Auswahl der zu bewertenden Produktionsstation schrittweise alle bewertungsrelevanten Daten aufzunehmen. Anschließend unterstützt das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Softwaretool den Bewertenden bei der Durchführung der eigentlichen Bewertung und Berechnung der Kennzahl. Die

Bewertung wurde dann am Beispiel einer Fabrik zur Herstellung verschiedenster Graphit-Produkte durchgeführt. Abschließend ist eine Gegenüberstellung des Nutzens sowie des im Rahmen der Bewertung entstehenden Aufwands vorgenommen worden.

8.2 Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Bewertung der Energieflexibilität kann als Basis für eine Vielzahl an weiteren wissenschaftlichen Arbeiten auf dem Gebiet der Energieflexibilität herangezogen werden. So gilt es, die entwickelte Bewertung insbesondere um den Aspekt der Wechselwirkungen zwischen einzelnen Produktionsstationen weiter zu entwickeln. Jede Station eines Produktionssystems unterliegt paralleler sowie sequenzieller Wechselwirkungen mit weiteren Stationen, z. B. aufgrund starrer Verkettung durch ein Fördersystem. Diese Abhängigkeiten können dabei u. U. energieflexibilitätsmindernd wirken. Ggf. lassen sich diese Nachteile aber mithilfe geeigneter Steuerungsstrategien ausgleichen, indem z. B. Maßnahmencluster mehrerer Produktionsstationen gebildet werden. Aus diesem Grund ist die in dieser Arbeit präsentierte Bewertung entsprechend weiterzuentwickeln, um eine genaue Bewertung der Energieflexibilität von ganzen Fabriken und Produktionssystemen vornehmen zu können.

Die Bewertung der Energieflexibilität von Fabriken eröffnet darüber hinaus die Möglichkeit weiterer wissenschaftlicher Untersuchungen. Je kurzfristiger und je stärker die Preise eines Strompreismodells schwanken, desto größer ist auch das Risiko des Strompreismodells. Ein Unternehmen, welches sich für ein sehr variables Preismodell entscheidet, kann nur von den im Vergleich zu weniger risikobehafteten Modellen i. d. R. durchschnittlich niedrigeren Strompreisen profitieren, wenn es auch die dafür nötige Energieflexibilität besitzt. Ziel weiterer wissenschaftlicher Arbeiten muss es daher sein, das Risiko eines Strompreismodells quantifizieren zu können und mit der dem Risiko gegenüberstehenden Energieflexibilität eines Unternehmens zu vergleichen. Auf diese Weise können Unternehmen bei der Auswahl passender Strompreismodelle unterstützt werden.

Das Risiko schwankender Strompreise hat auch zur Folge, dass eine Vielzahl an Unternehmen z. Z. Eigenzeugungsanlagen installieren. Auf diese Weise sollen das Risiko schwankender Strompreise für das Unternehmen reduziert und Energieversorgungssicherheit gewährleistet werden. Eigenzeugungskapazitäten aber auch Speicherkapazitäten können dabei energieflexibilitätssteigernd wirken.

Daher müssen diese Kapazitäten in die Energieflexibilitätsbewertung mit aufgenommen werden. Dies eröffnet die Möglichkeit, unterschiedliche Energieversorgungskonzepte von Fabriken hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Energieflexibilität bzw. Reduzierung des Strompreisesrisikos zu untersuchen und zu bewerten.

Ein weiterer Wesenszug energieflexibler Fabriken besteht darin, dass sie Energie zu Zeiten beziehen, in denen Energie vor allem aus erneuerbaren Energien gewonnen wird. Da die Erzeugung auf diese Art und Weise nahezu CO₂-neutral erfolgt, senkt energieflexibles Verhalten den CO₂-Bedarf der Fabrik. Dies ist als weiterer Vorteil der Energieflexibilität in zukünftigen Bewertungen zu berücksichtigen.

9 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

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

ABELE ET AL. 2006

Abele, E.; Liebeck, T.; Wörn, A.: Measuring Flexibility in Investment Decisions for Manufacturing Systems. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 55 (2006) Nr. 1, S. 433-436.

ABELE ET AL. 2008

Abele, E.; Kuhn, S.; Hueske, B.: Overall Equipment Flexibility: Entwicklung einer Methode zur Bewertung der Gesamtanlagenflexibilität für die spanende Fertigung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 103 (2008) Nr. 5, S. 322-327.

ABELE ET AL. 2012

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

ACATECH 2012

Appelrath, H.-J.; Kagermann, H.; Mayer, C. (Hrsg.): Future Energy Grid: Migrationspfade ins Internet der Energie. München: Springer 2012.

AGEB 2012

AG Energiebilanzen e. V.: Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2011. Berlin: Februar 2012.

ALBADI & SAADANY 2008

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

ALCÁZAR-ORTEGA ET AL. 2012A

Alcázar-Ortega, M.; Álvarez-Bel, C.; Escrivá- Escrivá, G.; Domijan, A.: Evaluation and assessment of demand response potential applied to the meat industry. In: Applied Energy 92 (2012) 84-91.

ALCÁZAR-ORTEGA ET AL. 2012B

Alcázar-Ortega, M.; Álvarez-Bel, C.; Domijan, A.; Escrivá- Escrivá, G.: Economic and environmental evaluation of customers' flexibility participating in operation markets: Application to the meat industry. In: Energy 41 (2012), S. 368-379.

AURICH ET AL. 2003

Aurich, J.; Barbian, P.; Wagenknecht, C.: Prozessmodule zur Gestaltung flexibilitätsge rechter Produktionssysteme. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 98 (2003) 5, S. 214-218.

BALOGUN & MATIVENGA 2012

Balogun, V. A.; Mativenga, P. T.: Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes. In: Journal of Cleaner Production 41 (2013), S. 179-186.

BARAD & SIPPER 1988

Barad, M.; Sipper, D.: Flexibility in manufacturing systems: Definitions and Petri net modeling. In: International Journal of Production Research 26 (1988), S. 237-248.

BAYER 2009

Bayer, W.: Energie auf einen Blick. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt 2009.

BEACH ET AL. 2000

Beach, R.; Muhlemann, A. P.; Price, D. H.; Paterson, A.; Sharp, J. A.: A review of manufacturing flexibility. European Journal of Operational Research 122 (2000), S. 41-57.

BMW I & BMU 2010

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

BNETZA 2010

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: Markt und Wettbewerb Energie: Kennzahlen 2010. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen November 2010.

BONNESCHKY 2002

Bonneschky, A.: Energiekennzahlen in PPS-Systemen: Integration energie-wirtschaftlicher Aspekte in Systeme der Produktionsplanung und -steuerung. Berlin: dissertationen.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. The FMS Magazine (1984), S. 114-117.

BURGER ET AL. 2012

Burger, A.; Lünenbürger, B.; Osiek, D.: Nachhaltige Stromversorgung der Zukunft: Kosten und Nutzen einer Transformation hin zu 100 % erneuerbaren Energien. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt August 2012.

CHOU ET AL. 2010

Chou, M.; Chua, G.; Teo, C.-T.: On range and response: Dimensions of process flexibility. In: European Journal of Operational Research 207 (2010), S. 711-724.

CISEK ET AL. 2002

Cisek, R.; Habicht, C.; Neise, P.: Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 97 (2002), S. 441-445.

COX 1989

Cox, T.: Toward the measurement of manufacturing flexibility. Production and Inventory Management Journal 30 (1989) 1, S. 68-72.

CRASTAN 2012

Crastan, V.: Elektrische Energieversorgung 2: Energiewirtschaft und Klimaschutz, Elektrizitätswirtschaft, Liberalisierung, Kraftwerktechnik und alternative Stromversorgung, chemische Energiespeicher. 3. Aufl. Heidelberg: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-19855-7.

DARYANIAN ET AL. 1987

Daryanian, B.; Bohn, R. E.; Tabors, R. D.: Optimal Demand-side response to electricity spot prices for storage-type customers. In: IEEE Transactions on Power Systems 4 (1989), S. 897-902.

DAS 1996

Das, S. K.: The Measurement of Flexibility in Manufacturing Systems. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems 8 (1996) 1, S. 67-93.

DEIMEL ET AL. 2006

Deimel, K.; Isemann, R.; Müller, S.: Kosten- und Erlösrechnung: Grundlagen, Managementaspekte und Integrationsmöglichkeiten der IFRS. München: Pearson 2006. ISBN-13: 978-3-8273-7226-0.

DENA 2005

Jansen, A.; Molly, J. P.; Neddermann, B.; Bachmann, U.; Gerch, H.-P.; Grebe, E.; Gröninger, S.; König, M.; Könnemann, A.; Lösing, M.; Saßnick, Y.; Seifert, G.; Siebels, C.; Winter, W.; Bartels, M.; Gatzen, C.; Peek, M.; Schulz, W.; Wissen, R.: Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020: Konzept für eine stufenweise Entwicklung des Stromnetzes in Deutschland zur Anbindung und Integration von Windkraftanlagen Onshore- und Offshore unter Berücksichtigung der Erzeugungs- und Kraftwerkseentwicklungen sowie der erforderlichen Regelungen. Köln: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) Februar 2005.

DENA 2012

Höflich, B.; Noster, R.; Peinl, H.; Philipp, R.; Völker, J.; Echternacht, D.; Grote, F.; Schäfer, A.; Schuster, H.: Integration der erneuerbaren Energien in den deutschen/europäischen Strommarkt. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) Juli 2012.

DIETMAIR ET AL. 2008

Dietmaier, A.; Verl, A.; Wosnik, M.: Zustandsbasierte Energieverbrauchsprofile: Eine Methode zur effizienten Erfassung des Energieverbrauchs von Produktionsmaschinen. In: wt Werkstattstechnik online 98 (2008), S. 640-645.

DIETMAIR & VERL 2010

Dietmaier, A.; Verl, A.: Energieeffizienter Betrieb von Produktionsanlagen. Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik. 1. Internationales Kolloquium des Spitzentechnologieclusters eniPROD 2010. S. 185-206. ISBN: 978-3-942267-00-7.

DOE 2006

Department of Energy: 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.

EEX 2011

< WWW.TRANSPARENCY.EXX.COM > - 18.08.2011.

EISELE & KNOBLOCH 2011

Eisele, W.; Knobloch, A.-P.: Technik des betrieblichen Rechnungswesens: Buchführung und Bilanzierung, Kosten- und Leistungsrechnung, Sonderbilanzen. 8. Aufl. München: Franz Vahlen 2011. ISBN: 978-3-8006-3784-3.

EMEC ET AL. 2013

Emec, S.; Kuschke, M.; Huber, F. W.; Stephan, R.; Strunz, K.; Seliger, G.: Stochastic Optimization Method to Schedule Production Steps According to Volatile Energy Price. In: Seliger, G. (Hrsg.): Innovative Solutions: Proceedings of 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing. Berlin, 23.-25. September 2013. Berlin: Universitätsverlag 2013, S. 691-696. ISBN: 978-3-7983-2609-5.

ENWG 2013

Bundesministerium der Justiz: Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung. Stand vom 31.5.2013.

EUROPÄISCHE KOMMISSION 2005

Europäische Kommission: Entwicklung einer thematischen Strategie für die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen: KOM(2005) 670. Brüssel: Kommission der Europäischen Gemeinschaften 2005.

FARUQUI ET AL. 2011

Faruqui, A.; Sergici, S.: Arcturus: International Evidence on Dynamic Pricing. In: The Electricity Journal 2013.

FARUQUI & SERGICI 2013

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

FINN ET AL. 2013

Finn, P.; O'Connell, M.; Fitzpatrick, C.: Demand side management of a domestic dishwasher: Wind energy gains, financial savings and peak-time load reduction. In: Applied Energy 101 (2013), S. 678-685.

FRIEDL 2010

Friedl, B.: Kostenrechnung: Grundlagen, Teilrechnungen und Systeme der Kostenrechnung. 2. Aufl. München: Oldenbourg 2010. ISBN: 978-3-486-59126-2.

FRIEGE & KAMPWIRTH 2012

Friege, C.; Kampwirth, R.: Vergessen Sie Grundlast! In: Servatius, H.-G.; Schneidewind, U.; Rohlfing, D. (Hrsg.): Smart Energy. Heidelberg: Springer 2012, S. 159-172. ISBN: 978-3-642-21819-4.

GÖTZE 2010

Götze, U.: Kostenrechnung und Kostenmanagement. 5. Aufl. Heidelberg: Springer 2010. ISBN 978-3-642-11823-4.

GÖTZE ET AL. 2010

Götze, U.; Koriath, H.-J.; Kolesnikov, A.; Lindner, R.; Paetzold, J.; Scheffler, C.: Energetische Bilanzierung und Bewertung von Werkzeugmaschinen. Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik. 1. Internationales Kolloquium des Spitzentechnologieclusters eniPROD 2010. S.157-184. ISBN: 978-3-942267-00-7.

GOTTSCHALK 2007

Gottschalk, L. L.: Flexibilitätsprofile. Diss. ETH-Zürich (2005). Zürich: vdf Hochschulverlag 2007. ISBN: 978-3-7281-3135-5.

GRASSL ET AL. 2013

Graßl, M.; Vikdahl, E.; Reinhart, G.: A Petri-net based approach for evaluating energy flexibility of production machines. In: Proceeding of the 5th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production, München, 6.-9. Oktober 2013, Seite 303-308.

GRASSL & REINHART 2014

Graßl, M.; Reinhart, G.: Evaluating measures for adapting the energy demand of a production system to volatile energy prices. In: Proceeding of the 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Trondheim, 18.-20. Juni 2014, Seite 129-134.

GREENPEACE 2012

Greenpeace: Global wind energy outlook 2012. Amsterdam: 2012.

GRISMAJER & SELIGER 2012

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

GUPTA & BUZACOTT 1996

Gupta, D.; Buzacott, J. A.: A „Goodness Test“ for Operational Measures of Manufacturing Flexibility. In: The International Journal of Flexible Manufacturing Systems 8 (1996), S.233-245.

GUPTA & GOYAL 1989

Gupta, Y. P.; Goyal, S.: Flexibility of manufacturing systems. European Journal of Operational Research 43 (1989) 2, S. 119-135.

HA ET AL. 2012

Ha, D. L.; Joumaa, H.; Ploix, S.; Jacomino, M.: An optimal approach for electrical management problem in dwellings. In: Energy and Buildings 45 (2012), S. 1-14.

HALLER 1999

Haller, M.: Bewertung der Flexibilität automatisierter Materialflusssysteme der variantenreichen Großserienproduktion. München: Utz 1999. ISBN 3-89675-672-9.

HANS 2002

Hans, L.: Grundlagen der Kostenrechnung. München: Oldenbourg 2002. ISBN: 3-486-24794-8.

HEINEN ET AL. 2008

Heinen, T.; Rimpau, C.; Wörn, A.: Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung. In: Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E.: Wandlungsfähige Produktionssysteme – Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbesen: PZH 2008. ISBN: 978-3-939026-96-9.

HERNÁNDEZ 2002

Hernández, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. In: Fortschritt-Berichte VDI 16 (2002) Nr. 149.

HESSELBACH ET AL. 2008

Hesselbach, J.; Herrmann, C.; Detzer, R.; Martin, L.; Thiede, S.; Lüdemann, B.: Energy Efficiency through optimized coordination of production and technical building services. In: Conference Proceedings LCE2008 – 15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Sydney, 17.-19. März 2008. Sydney: 2008, S. 624-628. ISBN: 1-877040-67-3.

HOLLEMAN & WIBERG 1995

Holleman, A.; Wiberg, N.: Lehrbuch der anorganischen Chemie. 101. Aufl. Berlin: Walter de Gruyter 1995. ISBN: 978-3110126419.

HU ET AL. 2012

Hu, S.; Liu, F.; He, Y.; Hu, T.: An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools. In: Journal of Cleaner Production 27 (2012), S. 133-140.

JESKE ET AL. 2011

Jeske, T.; von Garrel, J.; Sarke, J.: Erfolgsfaktor Flexibilität: Ergebnisse einer deutschlandweiten Unternehmensbefragung. In: Industrial Engineering 1 (2011), S. 20-23.

JUNGE 2007

Junge, M.: Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Kassel: Kassel Univ. Press. 2007.

KALUZA 2007

Kaluza, B.: Flexibilität in Produktionssystemen und Produktionsnetzwerken. In: Hausladen, I. et al. (Hrsg.): Management am Puls der Zeit. München: TCW Transfer-Centrum-Verlag 2007, S. 873-882. ISBN: 978-3-937236-62-7.

KAMPER 2010

Kamper, A.: Dezentrales Lastmanagement zum Ausgleich kurzfristiger Abweichungen im Stromnetz. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010. ISBN 978-3-86644-546-8.

KAMPKER ET AL. 2013

Kampker, A.; Burggräf, P.; Wesch-Potente, C.; Petersohn, G.; Krunke, M.: Life cycle oriented evaluation of flexibility in investment decisions for automated assembly systems. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology (2013).

KANNGIESSER ET AL. 2011

Kanngiesser, A.; Wolf, D.; Schinz, S.; Frey, H.: Optimierte Netz- und Marktintegration von Windenergie und Photovoltaik durch Einsatz von Energiespeichern. In: TU Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe: Energieversorgung 2011: Märkte um des Marktes Willen: 7. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 16.-18. Februar 2011. Wien: 2011.

KARL 2012

Karl, J.: Dezentrale Energiesysteme: Neue Technologien im liberalisierten Energiemarkt. 3. Aufl. München: Oldenbourg 2012. ISBN: 978-3-486-70885-1.

KARWAN & KEBLIS 2005

Karwan, M.; KEBLIS, M.: Operations planning with real time pricing of a primary input. In: Computer & Operations Research 34 (2007), S. 848-867.

KIENZLE & VICTOR 1952

Kienzle, O.; Victor, H.: Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spannenden Werkzeugmaschinen. VDI-Z 94 (1952) 11–12, S. 155–171.

KLEMKE ET AL. 2012

Klemke, T.; Mersmann, T.; Nyhuis, P.: Wandlungsfähige Produktionssysteme: Methodik zur Bewertung und Gestaltung der Wandlungsfähigkeit. In: Werkstattstechnik online 102 (2012) Nr. 4, S. 222-227.

KLOBASA 2009

Klobasa, M.: Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2009.

KONSTANTIN 2009

Konstantin, P.: Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt. 2. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-78591-0.

KOSTE & MALHOTRA 1999

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

KRÜGER 2004

Krüger, A.: Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme. München: Utz 2004. ISBN 3-8316-0371-5.

KULUS ET AL. 2011

Kulus, D.; Wolff, D.; Ungerland, S.; Dreher, S.: Energieverbrauchssimulation als Werkzeug der Digitalen Fabrik: Bewertung von Energieeffizienzpotenzialen am Beispiel der Zylinderkopffertigung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 106 (2011), S. 585-589.

KWANG & KIM 2012

Kwang, H.-G.; Kim, J.: Optimal combined scheduling of generation and demand response with demand resource constrains. In: Applied Energy 96 (2012), S. 161-170.

LANZA ET AL. 2009

Lanza, G.; Rühl, J.; Peters, S.: Monetäre Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen: Stochastische Simulation von Leistungskennzahlen und monetäre Größen zur Flexibilitätsquantifizierung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 104 (2009) Nr. 11, S. 1039-1044.

LANZA ET AL. 2010

Lanza, G.; Rühl, J.; Peters, S.: Bewertung von Stückzahl- und Variantenflexibilität. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 100 (2010) Nr. 6, S. 530-534.

LANZA ET AL. 2012

Lanza, G.; Moser, R.; Ruhmann, S.: Wandlungstreiber global agierender Produktionsunternehmen. In: wt Werkstattstechnik online 102 (2012), S. 200-205.

LÖDDING 2008

Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung – Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 2. Aufl. Berlin: Springer 2008. ISBN 978-3-540-76859-3.

LORENZ ET AL. 2012

Lorenz, S.; Putz, M.; Schlegel, A.: Energieeffizienz 2.0 – Neue Geschäftsmodelle auch für die Industrie. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 107 (2012), S. 599-602.

MACHA 2010

Macha, R.: Grundlagen der Kosten- und Leistungsrechnung. 5. Aufl. München: Franz Vahlen 2010. ISBN: 978-3-8006-3682-2.

MITRA ET AL. 2012

Mitra, S.; Grossmann, I.; Pinto, J. M.; Arora, N.: Optimal production planning under time-sensitive electricity prices for continuous power-intensive processes. In: Computers and Chemical Engineering 38 (2012), S. 171-184.

MOGHADDAM ET AL. 2011

Moghaddam, M.; Abdollahi, A.; Rashidinejad, M.: Flexible demand response programs modeling in competitive electricity markets. In: Applied Energy 88 (2011), S. 3257-3269.

MÖLLER 2008

Möller, N.; Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme. München: Herbert Utz 2008. ISBN 978-3-8316-0778-5.

MOURA & DE ALMEIDA 2012

Moura, P. S.; De Almeida, A. T.: The role of demand-side management in the grid integration of wind power. In: Applied Energy 87 (2010), S. 2581-2588.

MÜLLER ET AL. 2009

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

NABE ET AL. 2009

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

NACHTWEY ET AL. 2009

Nachtwey, A.; Schwarz, S.; Riedel, R.; Schopp, R.: Entwicklung einer Methode zur Ableitung von Flexibilitätsklassen in der Produktion. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 104 (2009), S. 224-228.

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. Dornfeld, A.; Linke, B. (Hrsg.): Leveraging Technology for a Sustainable World: Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering. Berkeley, 23.-25. Mai 2012. Heidelberg: Springer 2012, S. 399-404. ISBN: 978-3-642-29068-8.

NEWMAN ET AL. 1993

Newman, W. R.; Hanna, M.; Maffei, M. J.: Dealing with the Uncertainties of Manufacturing: Flexibility, Buffers and Integration. In: International Journal of Operations & Production Management 13 (1993) Nr. 1, S. 19-34-

NYHUIS ET AL. 2005

Nyhuis, P.; Kolakowski, M.; Heger, C. L.: Evaluation of Factory Transformability. CIRP 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing Systems. Ann Arbor (MI) / USA, 10.-12. Mai 2005.

NYHUIS ET AL. 2008

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) Nr. 1/2, S. 85-91.

PAHLE ET AL. 2012

Pahle, M.; Knopf, B.; Titjen, O.; Schmid, E.: Kosten des Ausbaus erneuerbarer Energien: Eine Metaanalyse von Szenarien. Dessau-Roßlau: September 2012. ISSN: 1862-4359.

PECHMANN & SCHÖLER 2011

Pechmann, A.; Schöler, I.: Optimizing Energy Costs by Intelligent Production Scheduling. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): Clocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing: Proceedings of 18th CIRP International Conference of Life Cycle Engineering. Braunschweig, 2.-4. Mai 2011. Berlin: Springer 2011, S. 293-298. ISBN: 978-3-642-19692-8.

PLINKE & RESE 2006

Plinke, W.; Rese, M.: Industrielle Kostenrechnung: Eine Einführung. 7. Aufl. Berlin: Springer 2006. ISBN-10: 3-540-23705-4.

PROGNOS 2005

Prognos: Energiereport IV: Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030: Energiewirtschaftliche Referenzprognose (Kurzfassung). Köln: April 2005.

QUASCHNING 2013

Quaschnig, V.: Regenerative Energiesysteme. 8. Aufl. München: Hanser 2013. ISBN: 978-3-446-43526-1.

RAGER 2008

Rager, M.: Energieorientierte Produktionsplanung: Analyse, Konzeption, Umsetzung. Wiesbaden: Gabler 2008. ISBN: 978-3-8350-0987-5.

REGELLEISTUNG 2013

50Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; TransnetBW GmbH; TenneT TSO GmbH: Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung <<http://www.regelleistung.net>> - 10.08.2013.

REINHARDT 2013

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

REINHART ET AL. 2007

Reinhardt, G.; Krebs, P.; Rimpau, C.; Czechowski, D.: Flexibilitätsbewertung in der Praxis: Einsatz einer Methode zur lebenszyklusorientierten Bewertung von Flexibilität in der Produktion. In: wt Werkstattstechnik online 97 (2007) Nr. 4, S. 2011-2017.

REINHART ET AL. 2011A

Reinhardt, G.; Reinhardt, S.; Föckerer, T.; Zäh, M.: Comparison of the Resource Efficiency of Alternative Process Chains for Surface Hardening. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): Localized Solutions for Sustainability in Manufacturing: Proceedings of 18th CIRP International Conference of Life Cycle Engineering. Braunschweig, 2.-4. Mai 2011. Berlin: Springer 2011, S. 311-316. ISBN: 978-3-642-19692-8.

REINHART ET AL. 2011B

Reinhardt, G.; Karl, F.; Krebs, P.; Maier, T.; Niehues, K.; Niehues, M.; Reinhardt, S.: Energiewertstromdesign: Ein wichtiger Bestandteil zum Erhöhen der Energieproduktivität. In: wt Werkstattstechnik online 101 (2011) Nr. 4, S. 253-260.

REINHART ET AL. 2012A

Reinhardt, G.; Graßl, M.; Greitemann, J.: Energieeffizienz in der Produktion: Untersuchungen zur Forschungs- und Entwicklungslandschaft Bayerns. Garching/Augsburg: Insitut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)/Projektgruppe Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen (RMV) des Fraunhofer IWU Juni 2012.

REINHART ET AL. 2012B

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

REINHART ET AL. 2014

Reinhardt, G.; Graßl, M.; Datzmann, S.: Methode zur Bewertung der Energieflexibilität. In: wt Werkstattstechnik online 104 (2014) Nr. 5, S. 313-319.

REINHART & GRASSL 2013

Reinhardt, G.; Graßl, M.: Energieflexible Fabriken: Maßnahmen zur Steuerung des Energiebedarfs von Fabriken. Verein Deutscher Ingenieure. <http://www.vdi.de/technik/artikel/energiemanagement-wie-smart-managen-wir-energie-wirklich/>.

ROGALSKI 2009

Rogalski, S.: Entwicklung einer Methodik zur Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen. Diss. Universität Karlsruhe (2009). Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe 2009. ISBN: 978-3-86644-383-9. (Reihe Informationsmanagement im Engineering Karlsruhe 2-2009).

ROGALSKI & OVTCHAROVA 2009

Rogalski, S.; Ovtcharova, J.: Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen: ecoFlex – eine branchenübergreifende Methode. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 104 (2009) Nr. 1-2, S. 64-70.

ROOS & LANE 1998

Roos, J.; Lane, I: Industrial Power Demand Response Analyses for One-Part Real-Time Pricing. In: IEEE Transactions on Power Systems 13 (1998), S. 159-164.

ROSCHER 2008

Roscher, J.: Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie. Diss. Universität Stuttgart (2007). Stuttgart: Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb 2008.

SAINI 2004

Saini, S.: Conservation vs. Generation - The Significance of Demand-Side Management (DSM), its Tools and Techniques. In: Refocus 5 (2004) Nr. 3, S. 52-54.

SANTOS ET AL. 2011

Santos, J. P.; Oliveira, M.; Almeida, F. G.; Pereira, J. P.; Reis, A.: Improving the environmental performance of machine-tools: Influence of technology and throughput on the electrical energy consumption of a press-brake. In: Journal of Cleaner Production 19 (2011), S. 356-364.

SCHELLMANN 2012

Schellmann, J. H.: Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz. München: Herbert Utz 2012. ISBN: 978-3-8316-4189-5.

SCHLOMANN ET AL. 2010

Schlomann, B.; Rohde, C.; Eichhammer, W.: Erstellung von Anwendungsbilanzen für das verarbeitende Gewerbe. Karlsruhe: Fraunhofer ISI November 2010.

SCHMID ET AL. 2010

Schmid, J.; Hauer, D.; Schmidt, D.; Schmidt, M.; Staiß, F.; Stadermann, G.; Sterner, M.; Stryi-Hipp, G.: Energiekonzept 2050: Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100 % erneuerbaren Energien. Berlin: Juni 2010.

SCHUFFT 2007

Schufft, W.: Energiebegriff, allgemeine Grundlagen. In: Schufft, W. (Hrsg): Taschenbuch der Elektrischen Energietechnik. München: Carl Hanser 2007.

SCHUH ET AL. 2004

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) Nr. 6, S. 299-304.

SCHWAB 2009

Schwab, A. J.: Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie. 2. Aufl. Dordrecht: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-9226-1.

SCHWEITZER & KÜPPER 2011

Schweizer, M.; Küpper, H.-U.: Systeme zur Kosten- und Erlösrechnung. 10. Aufl. München: Springer 2011. ISBN: 978-3-8006-3804-8.

SEBESTYEN 1990

Sebestyen, T.: XML: Einstieg für Anspruchsvolle. München: Pearson 2010. ISBN: 978-3-8273-2654-6.

SETHI & SETHI 1990

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

SHEWCHUK & MOODIE 1998

Shewchuk, J. P.; Moodie, C. L.: Definition and Classification of Manufacturing Flexibility Types and Measures. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems 10 (1998) 4, S. 325-349.

SLACK 1983

Slack, N.: Flexibility as a Manufacturing Objective. International Journal of Operations and Production Management 3 (1983) 3, S. 4-13.

SOUZA & WILLIAMS 2000

Souza, D. E.; Williams, F. P.: Toward a taxonomy of manufacturing flexibility dimensions. International Journal of Operations Management 18 (2000), S. 577-593.

SPATH ET AL. 2001

Spath, D.; Baumeister, M.; Dill, C.: Ist Flexibilität genug?: Zum Management von Turbulenzen sind neue Fähigkeiten gefragt. In: wt Werkstatttechnik online 98 (2008) Nr. 9, S. 675-680.

SPATH ET AL. 2008

Spath, D.; Rally, P.; Scholtz, O.: Geschäftsstrategien und wandlungsfähige Montagen: Die Kunden bestimmen den Einsatz produktionsorientierter Geschäftsstrategien. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 96 (2001) Nr. 5, S. 235-241.

STADLER ET AL. 2009

Stadler, M.; Krause, W.; Sonnenschein, M.; Vogel, U.: Modelling and evaluation of control schemes for enhancing load shift of electricity demand for cooling devices. In: Environmental Modelling & Software 24 (2009), S. 285-295.

STEGER 2010

Steger, J.: Kosten- und Leistungsrechnung: Einführung in das betriebliche Rechnungswesen, Grundlagen der Vollkosten-, Teilkosten-, Plankosten- und Prozesskostenrechnung. 5. Aufl. München: Oldenbourg 2011. ISBN: 978-3-486-59672-4.

STRBAC 2008

Strbac, G.: Demand side management: Benefits and challenges. In: Energy Policy 36 (2008), S. 4419-4426.

STURM 2006

Sturm, U.: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. München: Oldenbourg 2006. ISBN: 3-486-58019-1.

THIEDE ET AL. 2012

Thiede, S.; Bogdanksi, G.; Herrmann, C.: A Systematic method for increasing the energy and resource efficiency in manufacturing companies. In: Procedia CIRP 2 (2012), S. 28-33.

TONI & TONCHIA 1998

Toni, A. de; Tonchia, S.: Manufacturing flexibility. International Journal of Production Research 36 (1998) Nr. 6, S. 1587-1617.

TORRITI ET AL. 2009

Torrity, J.; Hassan, M. G.; Leach, M.: Demand response experience in Europe: Policies, programmes and implementation. In: Energy 35 (2010), S. 1575-1583.

UBA 2012

Kosmol, J.; Kanthak, J.; Herrmann, F.; Golde, M.; Alsleben, C.; Penn-Bressel, G.; Schmitz, S.; Gromke, U.: Glossar zum Ressourcenschutz. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Januar 2012.

UPTON 1994

Upton, D. M.: The Management of Manufacturing Flexibility. California Management Review 36 (1994) 2, S. 72-89.

VBW 2010

Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V.: Das Energiewirtschaftliche Gesamtkonzept (Kurzfassung). München: Juli 2010.

VDE 2008

VDE: Smart Distribution 2020 virtuelle Kraftwerke in Verteilungsnetzen: Technische, regulatorische und kommerzielle Rahmenbedingungen. Frankfurt am Main: Juli 2008.

VDI 3467

Verein deutscher Ingenieure (VDI): Emissionsminderung: Herstellung von Werkstoffen aus Kohlenstoff und Elektrographit VDI 3467. Düsseldorf. März 1998.

VDMA 2006

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA): Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen. VDMA 34160. Berlin. Juni 2006.

VIJAYARAGHAVAN & DORNFELD 2010

Vijayaraghavan, A.; Dornfeld, D.: Automated energy monitoring of machine tools. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 59 (2010), S. 21-24.

VIN ET AL. 2000

Vin, J.; Ierapetritou, M.G.; Sweeney, P.; Chigirinskiy, M.: Energy cost minimization in an energy intensive industrial plant: An MINLP approach. In: Industrial & Engineering Chemistry Research 41 (2000), S. 91-96.

VON ROON & GROBMAIER 2010

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

VONHOEGEN 2013

Vonhoegen, H.: Einstieg in XML: Grundlagen, Praxis, Referenz. 7. Aufl. Calileo Computing 2013. ISBN 978-3836226202.

WAHAB 1999

Wahab, M.: Measuring machine and product mix flexibilities of a manufacturing system. In: International Journal of Production Research 43 (1999) Nr. 18, S. 3773-3786.

WALTER & WÜNSCHE 2013

Walter, W.; Wünsche, I.: Einführung in die moderne Kostenrechnung: Grundlagen, Methoden, Neue Ansätze. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer 2013. ISBN: 978-3-8349-4074-2.

WARNECKE 1996

Warnecke, H.-J.: Die Fraktale Fabrik – Revolution in der Unternehmenskultur. Stuttgart: Rowohlt 1996. ISBN: 3499197081.

WEBER & ROGLER 2006

Weber, H. K.; Rogler, S.: Betriebswirtschaftliches Rechnungswesen Band 2: Kosten- und Leistungsrechnung sowie kalkulatorische Bilanz. 4. Aufl. München: Franz Vahlen 2006. ISBN: 3-8006-1753-6.

WEINERT 2010

Weinert, N.: Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag 2010. ISBN: 978-3-8396-0173-0.

WEINERT ET AL. 2011

Weinert, N.; Chiotellis, S.; Seliger, G.: Methodology for planning and operating energy-efficient production systems. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 60 (2011), S. 41-44.

WEMHÖNER 2006

Wemhöner, N.: Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau. Diss. RWTH Aachen (2005). Aachen: Shaker 2006. ISBN: 3-8322-5111-1. (Berichte aus der Produktionstechnik 12/2006).

WESTKÄMPER 2006

Westkämper, E.: Digital Manufacturing in the global Era. 3rd CIRP sponsored Conference on Digital Enterprise Technology. Setúbal/Portugal, 18.-20. September 2006.

WESTKÄMPER ET AL. 2000

Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P.; Tilebein, M.: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen: Ein Bezugsrahmen für die Unternehmensentwicklung im turbulenten Umfeld. In: wt Werkstattstechnik online 90 (2000), S. 22-26.

WIENDAHL 2002

Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit: Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. In: wt Werkstattstechnik online 92 (2002) Nr. 4, S. 122-127.

WIENDAHL ET AL. 2007

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Kolakowski, M.: Changeable Manufacturing. Annals of the CIRP 56 (2007) 2, S. 783-809.

WIENDAHL & BREITHAUPT 1998

Wiendahl, H.-P.; Breithaupt, J. W.: Kapazitätshüllkurven - Darstellung flexibler Kapazitäten mit einem einfachen Beschreibungsmodell. Industrie Management 14 (1998) 4, S. 34-37.

WIENDAHL & HERNÁNDEZ 2002

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

WÖHE & DÖRING 2013

Wöhe, G.; Döring, U.: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 25. Aufl. München: Franz Vahlen 2013. ISBN: 978-3-8006-4687-6.

WÜNSCH ET AL. 2011

Wünsch, M.; Thamling, N.; Peter, F.; Seefeldt, F.: Beitrag von Wärmespeichern zur Integration erneuerbarer Energien. Berlin: Prognos Dezember 2011.

YUSTA ET AL. 2012

Yusat, J. M.; Torres, F.; Khodr, H. M.: Optimal methodology for a machining process scheduling in spot electricity markets. In: Energy Conversion and Management 51 (2010), S. 2647-2654.

ZÄH & MÜLLER 2006

Zäh, M. F.; Müller, N.: A Model for Capacity Evaluation under Market Uncertainties. In: Production Engineering 13 (2006) Nr. 2, S. 201-206.

ZÄH ET AL. 2005

Zäh, M. F.; Moeller, N.; Vogl, W.: Symbiosis of Changeable and Virtual Production. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). München, 22.-23. September 2005. München: Utz 2005, S. 3-10. ISBN: 3-8316-0540-8.

ZÄH ET AL. 2006

Zäh, M. F.; Bredow v., M.; Möller, N.: Methoden zur Bewertung von Flexibilität in der Produktion. In: Industrie Management 22 (2006).

ZEHIR & BAGRIYANIK 2012

Zehir, M.; Bagriyanik, M.: Demand Side Management by controlling refrigerators and its effects on consumers. In: Energy Conversion and Management 64 (2012), S. 238-244.

ZHANG ET AL. 2003

Zhang, Q.; Vonderembse, M., Lim, J.-S.: Manufacturing flexibility: defining and analyzing relationships among competence, capability, and customer satisfaction. In: Journal of Operations Management 21 (2003), S. 173-191.

ZIMMERMANN ET AL. 2003

Zimmermann, W.; Fries, H.-P.; Hoch, G.: Betriebliches Rechnungswesen: Bilanzen und Erfolgsrechnung, Kosten- und Leistungsrechnung, Wirtschaftlichkeits- und Investitionsrechnung. 8. Aufl. München: Oldenbourg 2003. ISBN: 3-468-27375-2.

10 Anhang

10.1 Beweis der Ergebnisse von Formel (5.1)

In diesem Abschnitt erfolgt der Nachweis, dass Formel (5.1) Lösungen zwischen 0 und 1 liefert. Die zu untersuchende Formel lautet:

$$E_i = \sum_{m=1}^M \frac{\Delta P_{i,m}(P_{max} - \Delta P_{i,m})}{P_{max}^2} \quad (10.1)$$

Sie kann folgendermaßen umgestellt werden:

$$\begin{aligned} E_i &= \sum_{m=1}^M \frac{\Delta P_{i,m}(P_{max} - \Delta P_{i,m})}{P_{max}^2} = \sum_{m=1}^M \frac{\Delta P_{i,m}}{P_{max}} - \sum_{m=1}^M \frac{\Delta P_{i,m}^2}{P_{max}^2} = \sum_{m=1}^M \frac{\Delta P_{i,m}}{P_{max}} - \\ &\sum_{m=1}^M \left(\frac{\Delta P_{i,m}}{P_{max}} \right)^2 = \sum_{m=1}^M (a_m) - \sum_{m=1}^M (a_m)^2 = \\ &\sum_{m=1}^M a_m - \sum_{m=1}^M b_m \end{aligned}$$

mit

$$a_m = \frac{\Delta P_{i,m}}{P_{max}} \text{ und } b_m = \left(\frac{\Delta P_{i,m}}{P_{max}} \right)^2$$

Da $\Delta P_{i,m} > 0$ und $P_{max} > 0$ und $\Delta P_{i,m} \leq P_{max}$ folgt:

$0 < a_m \leq 1$ und $0 < b_m \leq 1$, wobei $b_m \leq a_m$

Da $\sum_{m=1}^M \Delta P_{i,m} = P_{max}$ folgt:

$$\sum_{m=1}^M a_m = 1$$

Daraus folgt:

$$E_i = 1 - \sum_{m=1}^M b_m$$

Da $0 < b_m \leq 1$ und $b_m \leq a_m$ folgt:

$$E_i = [0; 1]$$

10.2 Zustände von Produktionsstationen

In diesem Abschnitt wird aufgeführt, welche Zustandsdefinitionen einzelner Anlagen und Maschinen von unterschiedlichen Autoren durchgeführt wurden. Dabei zeigt sich, dass die Zustandsdefinition je nach betrachteter Produktionsstation individuell durchgeführt werden muss.

Tabelle 17: Unterschiedliche Zustandsdefinitionen in der Literatur

	Dietmair & Verl 2010	Dietmair et al. 2008	Mitra et al. 2012	Götze et al. 2010	Vijayaraghavan & Donrflod 2010	Weinert et al. 2011	Hu et al. 2012	Balogun & Maitvenga 2013	Thiede et al. 2012	Santos et al. 2011	Abele et al. 2012
Aus	X	X	X	X		X	X		X	X	
Hochlauf	X	X	X		X	X	X	X	X		
Aufwärmen	X										
Stand-by		X		X		X				X	X
Warten	X	X		X		X		X			X
Rüsten				X							
Bearbeitung	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Leerlauf		X			X		X		X		
Warten kalt	X										
Herunterfahren	X				X	X					
Not aus		X									

11 Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden in den Jahren von 2012 bis 2014 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zur Energieflexibilität in der Produktion untersucht wurden und deren Ergebnisse in Teilen in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

- Vikdahl, Erik: Bewertung der Energieflexibilität von Produktionsanlagen (Semesterarbeit, Technische Universität München, abgegeben im Juni 2013)
- Sailer, Hans: Entwicklung einer Methode zur Bewertung der Energieflexibilität von Produktionssystemen (Diplomarbeit, Technische Universität München, abgegeben im Mai 2013)
- Glocker, Lutz: Bewertung des Energieflexibilitätsbedarfs von Fabriken (Diplomarbeit, Technische Universität München, abgegeben im Oktober 2013)
- Feil, Michael: Identifikation von Maßnahmen zur Steuerung des Energiebedarfs von Fabriken (Bachelorarbeit, Technische Universität München, abgegeben im November 2013)

Seminarberichte IWB

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte IWB sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**
82 Seiten - ISBN 3-931327-02-7
- Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**
110 Seiten - ISBN 3-931327-03-5
- Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**
134 Seiten - ISBN 3-931327-04-3
- Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**
95 Seiten - ISBN 3-931327-05-1
- Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**
86 Seiten - ISBN 3-931327-06-0
- Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**
80 Seiten - ISBN 3-931327-07-9
- Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**
130 Seiten - ISBN 3-931327-08-7
- Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**
120 Seiten - ISBN 3-931327-09-5
- 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**
90 Seiten - ISBN 3-931327-10-8
- Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
110 Seiten - ISBN 3-931327-11-6
- Autonome Produktionssysteme**
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- Planung von Montageanlagen**
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- Flexible fluide Kleb-/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**
80 Seiten - ISBN 3-931327-15-9
- Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**
80 Seiten - ISBN 3-931327-16-7
- Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**
80 Seiten - ISBN 3-931327-17-5
- Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**
165 Seiten - ISBN 3-931327-18-3
- Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- EDM Engineering Data Management**
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**
110 Seiten - ISBN 3-931327-26-4
- Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
111 Seiten - ISBN 3-931327-27-2
- Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
154 Seiten - ISBN 3-931327-28-0
- Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlussseminar**
156 Seiten - ISBN 3-931327-29-9
- Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**
183 Seiten - ISBN 3-931327-31-0
- Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**
181 Seiten - ISBN 3-931327-33-7
- Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**
102 Seiten - ISBN 3-931327-34-5
- Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**
129 Seiten - ISBN 3-931327-35-3
- Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
124 Seiten - ISBN 3-931327-36-1
- Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**
95 Seiten - ISBN 3-931327-37-X
- Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**
128 Seiten - ISBN 3-931327-38-8
- Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**
130 Seiten - ISBN 3-931327-39-6
- Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten - ISBN 3-931327-40-X
- Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten - ISBN 3-89675-041-0
- Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten - ISBN 3-89675-042-9
- Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**
120 Seiten - ISBN 3-89675-043-7
- Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen**
125 Seiten - ISBN 3-89675-044-5
- Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**
173 Seiten - ISBN 3-89675-045-3
- Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**
108 Seiten - ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation
131 Seiten - ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen
106 Seiten - ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping - Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung
150 Seiten - ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing - Methoden für die reaktionsfähige Produktion
121 Seiten - ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten - Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle
137 Seiten - ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien
124 Seiten - ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen - Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung
107 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion - Integrierte Prozess- und Produktsimulation
133 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion - Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele
150 Seiten - ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug
150 Seiten - ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion - Datenintegration und Benutzerschnittstellen
150 Seiten - ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien
169 Seiten - ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage - Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik
114 Seiten - ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme - Genauigkeit gezielt entwickeln
131 Seiten - ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien - Anspruch - Realität - Technologien
100 Seiten - ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 - Visionen - Umsetzung - Werkzeuge
124 Seiten - ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen - Einsatz und Innovationspotenzial
143 Seiten - ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 - Basis für Wachstum - Erfahrungen Werkzeuge Visionen
136 Seiten - ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung - Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder
185 Seiten - ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme - Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder
148 Seiten - ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion - Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik
139 Seiten - ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion - Visionen und Methoden zur Kooperation - Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation - Kooperation entlang der Wertschöpfungskette
134 Seiten - ISBN 3-98675-069-0
- 70 Mechatronik - Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen
161 Seiten - ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik - Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten
ISBN 3-89675-071-2 - vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb - Erfahrungen - Werkzeuge - Visionen
ISBN 3-89675-072-0 - vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion - Erwartungen - Erfahrungen - Entwicklungen
179 Seiten - ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung - Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik
133 Seiten - ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung - Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle
95 Seiten - ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme - Einführung in die betriebliche Praxis - Erfahrungen, Best Practices, Visionen
153 Seiten - ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik - Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen
155 Seiten - ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement
267 Seiten - ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing - Fertigungsverfahren für alle Ansprüche
154 Seiten - ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing - Heutige Trends - Zukünftige Anwendungsfelder
172 Seiten - ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement - Herausforderung Variantenmanagement
100 Seiten - ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik - Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen
160 Seiten - ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?
104 Seiten - ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforschung - Innovation im Werkzeug- und Formenbau
375 Seiten - ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing - Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement - Schlang im Mittelstand
102 Seiten - ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik - Vorsprung durch Simulation
134 Seiten - ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion - Wertschöpfung effizient gestalten
122 Seiten - ISBN 978-3-89675-089-1
- 90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik - Durch Innovation schnell und flexibel am Markt
100 Seiten - ISBN 978-3-89675-090-7
- 91 Robotik in der Kleinserienproduktion - Die Zukunft der Automatisierungstechnik
ISBN 978-3-89675-091-4
- 92 Rapid Manufacturing - Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau
ISBN 978-3-89675-092-1
- 93 Handhabungstechnik - Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben
136 Seiten - ISBN 978-3-89675-093-8
- 94 iwv Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen
245 Seiten - ISBN 978-3-89675-094-5
- 95 Zuführtechnik - Herausforderung der automatisierten Montage!
111 Seiten - ISBN 978-3-89675-095-2
- 96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld - Seminar »Risiko und Chance«
151 Seiten - ISBN 978-3-89675-096-9
- 97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 - Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-097-6

- 98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3
- 99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlenschmelzen
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0
- 100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7
- 101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9
- 102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen
ISBN 978-3-8316-4169-7
- 103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung
ISBN 978-3-8316-4188-8
- 104 Ressourceneffizienz in der Lebensmittelkette
ISBN 978-3-8316-4192-5
- 105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! · Herausforderungen und Lösungen für die Zerspanung von Hochleistungswerkstoffen
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5
- 106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2
- 107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

Forschungsberichte IWB Band 1–121

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 sind im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg erschienen.

- 1 Streifinger, E.: Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 Fuchsberger, A.: Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 Maier, C.: Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrieroboter
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 Summer, H.: Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 Simon, W.: Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 Büchs, S.: Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 Hunzinger, J.: Schneiderodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 Pilland, U.: Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 Barthelmeß, P.: Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 Reithofer, N.: Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 Diess, H.: Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 Reinhart, G.: Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungszäse
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 Bürstner, H.: Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 Groha, A.: Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 Riese, K.: Klipsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 Lutz, P.: Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 Klippel, C.: Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 Rascher, R.: Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 Heusler, H.-J.: Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 Kirchknopf, P.: Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 Sauerer, Ch.: Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 Karstedt, K.: Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 Peiker, St.: Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 Schugmann, R.: Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 Wrba, P.: Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 Eibelhäuser, P.: Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 Prasch, J.: Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 Teich, K.: **Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion**
1990 - 52 Abb. - 158 Seiten - ISBN 3-540-52764-8
- 29 Pfang, W.: **Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze**
1990 - 59 Abb. - 153 Seiten - ISBN 3-540-52829-6
- 30 Tauber, A.: **Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung**
1990 - 93 Abb. - 190 Seiten - ISBN 3-540-52911-X
- 31 Jäger, A.: **Systematische Planung komplexer Produktionssysteme**
1991 - 75 Abb. - 148 Seiten - ISBN 3-540-53021-5
- 32 Hartberger, H.: **Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme**
1991 - 58 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-53326-5
- 33 Tuzcek, H.: **Inspektion von Karosserieteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung**
1992 - 125 Abb. - 179 Seiten - ISBN 3-540-53965-4
- 34 Fischbacher, J.: **Planungsstrategien zur stömungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten**
1991 - 60 Abb. - 166 Seiten - ISBN 3-540-54027-X
- 35 Moser, O.: **3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen**
1991 - 66 Abb. - 177 Seiten - ISBN 3-540-54076-8
- 36 Naber, H.: **Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente**
1991 - 85 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-54216-7
- 37 Kupec, Th.: **Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen**
1991 - 68 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-54260-4
- 38 Maulhardt, U.: **Dynamisches Verhalten von Kreissägen**
1991 - 109 Abb. - 159 Seiten - ISBN 3-540-54365-1
- 39 Götz, R.: **Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile**
1991 - 86 Abb. - 201 Seiten - ISBN 3-540-54401-1
- 40 Koepfer, Th.: **3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung**
1991 - 74 Abb. - 126 Seiten - ISBN 3-540-54436-4
- 41 Schmidt, M.: **Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme**
1992 - 108 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-55025-9
- 42 Burger, C.: **Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen**
1992 - 94 Abb. - 186 Seiten - ISBN 3-540-55187-5
- 43 Hoßmann, J.: **Methodik zur Planung der automatisierten Montage von nicht formstabilen Bauteilen**
1992 - 73 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-5520-0
- 44 Petry, M.: **Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabkaskens für robotergeführte Klebprozesse**
1992 - 106 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-55374-6
- 45 Schönecker, W.: **Integrierte Diagnose in Produktionszellen**
1992 - 87 Abb. - 159 Seiten - ISBN 3-540-55375-4
- 46 Bick, W.: **Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades**
1992 - 70 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-55377-0
- 47 Gebauer, L.: **Prozßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen**
1992 - 84 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-55378-9
- 48 Schrüfer, N.: **Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung**
1992 - 103 Abb. - 161 Seiten - ISBN 3-540-55431-9
- 49 Wisbacher, J.: **Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen**
1992 - 77 Abb. - 176 Seiten - ISBN 3-540-55512-9
- 50 Garnich, F.: **Laserbearbeitung mit Robotern**
1992 - 110 Abb. - 184 Seiten - ISBN 3-540-55513-7
- 51 Eubert, P.: **Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe**
1992 - 89 Abb. - 159 Seiten - ISBN 3-540-44441-2
- 52 Glaas, W.: **Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung**
1992 - 67 Abb. - 140 Seiten - ISBN 3-540-55749-0
- 53 Helm, H.J.: **Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose**
1992 - 60 Abb. - 153 Seiten - ISBN 3-540-55750-4
- 54 Lang, Ch.: **Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung**
1992 - 75 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-55751-2
- 55 Schuster, G.: **Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage**
1992 - 67 Abb. - 135 Seiten - ISBN 3-540-55830-6
- 56 Bomm, H.: **Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme**
1992 - 87 Abb. - 195 Seiten - ISBN 3-540-55964-7
- 57 Wendt, A.: **Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen**
1992 - 74 Abb. - 179 Seiten - ISBN 3-540-56044-0
- 58 Hansmaier, H.: **Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung**
1993 - 67 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-56053-2
- 59 Dilling, U.: **Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen**
1993 - 72 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-56307-5
- 60 Strohmayr, R.: **Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringeeinrichtungen**
1993 - 80 Abb. - 152 Seiten - ISBN 3-540-56652-X
- 61 Glas, J.: **Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware**
1993 - 80 Abb. - 145 Seiten - ISBN 3-540-56890-5
- 62 Stetter, R.: **Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes**
1994 - 91 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-56889-1
- 63 Dirndorfer, A.: **Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage**
1993 - 76 Abb. - 144 Seiten - ISBN 3-540-57031-4
- 64 Wiedemann, M.: **Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen**
1993 - 81 Abb. - 137 Seiten - ISBN 3-540-57177-9
- 65 Woenckhaus, Ch.: **Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung**
1994 - 81 Abb. - 140 Seiten - ISBN 3-540-57284-8
- 66 Kummesteiner, G.: **3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme**
1994 - 62 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-57535-9
- 67 Kugelmann, F.: **Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionssystemen**
1993 - 76 Abb. - 144 Seiten - ISBN 3-540-57549-9
- 68 Schwarz, H.: **Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**
1994 - 96 Abb. - 148 Seiten - ISBN 3-540-57577-4
- 69 Wiethen, U.: **Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen**
1994 - 70 Abb. - 142 Seiten - ISBN 3-540-57794-7
- 70 Seehuber, M.: **Automatische Inbetriebnahme geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**
1994 - 72 Abb. - 155 Seiten - ISBN 3-540-57896-X
- 71 Amann, W.: **Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen**
1994 - 71 Abb. - 129 Seiten - ISBN 3-540-57924-9
- 72 Schöpf, M.: **Rechnergestütztes Projektförderungs- und Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**
1997 - 63 Abb. - 130 Seiten - ISBN 3-540-58052-2
- 73 Welling, A.: **Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**
1994 - 66 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-580-0
- 74 Zetmayer, H.: **Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinstserienproduktion**
1994 - 62 Abb. - 143 Seiten - ISBN 3-540-58134-0

- 75 Lindl, M.: Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 - 66 Abb. - 147 Seiten - ISBN 3-540-58221-5
- 76 Zipper, B.: Das integrierte Betriebsmittelwesen - Baustein einer flexiblen Fertigung
1994 - 64 Abb. - 147 Seiten - ISBN 3-540-58222-3
- 77 Raith, P.: Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung
1995 - 51 Abb. - 130 Seiten - ISBN 3-540-58223-1
- 78 Engel, A.: Strömungstechnische Optimierung von Produktionssystemen durch Simulation
1994 - 69 Abb. - 160 Seiten - ISBN 3-540-58258-4
- 79 Zäh, M. F.: Dynamisches Prozessmodell Kreissägen
1995 - 95 Abb. - 186 Seiten - ISBN 3-540-58624-5
- 80 Zwanzger, N.: Technologisches Prozessmodell für die Kugelschleifbearbeitung
1995 - 65 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-58634-2
- 81 Romanow, P.: Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen
1995 - 66 Abb. - 151 Seiten - ISBN 3-540-58771-3
- 82 Kahlenberg, R.: Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen
1995 - 71 Abb. - 136 Seiten - ISBN 3-540-58772-1
- 83 Huber, A.: Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung
1995 - 87 Abb. - 152 Seiten - ISBN 3-540-58773-X
- 84 Birkel, G.: Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen
1995 - 64 Abb. - 137 Seiten - ISBN 3-540-58869-8
- 85 Simon, D.: Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement
1995 - 77 Abb. - 132 Seiten - ISBN 3-540-58942-2
- 86 Nedeljkovic-Groha, V.: Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflussteuerungen
1995 - 94 Abb. - 188 Seiten - ISBN 3-540-58953-8
- 87 Rockland, M.: Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in Montageanlagen
1995 - 83 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-58999-6
- 88 Linner, St.: Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 - 67 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-59016-1
- 89 Eder, Th.: Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionssysteme
1995 - 62 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-59084-6
- 90 Deutschle, U.: Prozeborientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen
1995 - 80 Abb. - 188 Seiten - ISBN 3-540-59337-3
- 91 Dieterle, A.: Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 - 68 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-60120-1
- 92 Hechl, Chr.: Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte
1995 - 73 Abb. - 158 Seiten - ISBN 3-540-60325-5
- 93 Albertz, F.: Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen
1995 - 83 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-60608-8
- 94 Trunzer, W.: Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgensensoren
1996 - 101 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-60961-X
- 95 Fichtmüller, N.: Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 - 83 Abb. - 145 Seiten - ISBN 3-540-60960-1
- 96 Trucks, V.: Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
1996 - 64 Abb. - 141 Seiten - ISBN 3-540-60599-8
- 97 Schäffer, G.: Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
1996 - 71 Abb. - 170 Seiten - ISBN 3-540-60958-X
- 98 Koch, M. R.: Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
1996 - 67 Abb. - 138 Seiten - ISBN 3-540-61104-5
- 99 Moctezuma de la Barrera, J. L.: Ein durchgängiges System zur Computer- und rechnergestützten Chirurgie
1996 - 99 Abb. - 175 Seiten - ISBN 3-540-61145-2
- 100 Geuer, A.: Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
1996 - 84 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-61495-8
- 101 Ebner, C.: Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten
1996 - 67 Abb. - 132 Seiten - ISBN 3-540-61678-0
- 102 Pischelstrieder, K.: Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 - 74 Abb. - 171 Seiten - ISBN 3-540-61714-0
- 103 Köhler, R.: Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
1997 - 62 Abb. - 177 Seiten - ISBN 3-540-62024-9
- 104 Feldmann, Ch.: Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
1997 - 71 Abb. - 163 Seiten - ISBN 3-540-62059-1
- 105 Lehmann, H.: Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystemen
1997 - 96 Abb. - 191 Seiten - ISBN 3-540-62202-0
- 106 Wagner, M.: Steuerungsintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 - 94 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-62656-5
- 107 Lorenzen, J.: Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 - 63 Abb. - 129 Seiten - ISBN 3-540-62794-4
- 108 Krönert, U.: Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung
1997 - 53 Abb. - 127 Seiten - ISBN 3-540-63338-3
- 109 Pfersdorf, I.: Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 - 74 Abb. - 172 Seiten - ISBN 3-540-63615-3
- 110 Kuba, R.: Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 - 77 Abb. - 155 Seiten - ISBN 3-540-63642-0
- 111 Kaiser, J.: Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen
1997 - 67 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-63999-3
- 112 Geyer, M.: Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 - 85 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-64195-5
- 113 Martin, C.: Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 - 73 Abb. - 162 Seiten - ISBN 3-540-64401-6
- 114 Löffler, Th.: Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 - 85 Abb. - 136 Seiten - ISBN 3-540-64511-X
- 115 Lindermaier, R.: Qualitätsorientierte Entwurf in der Produktion
1998 - 84 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-64686-8
- 116 Koehrer, J.: Prozeborientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 - 75 Abb. - 185 Seiten - ISBN 3-540-65037-7
- 117 Schuller, R. W.: Leitfäden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 - 76 Abb. - 162 Seiten - ISBN 3-540-65320-1
- 118 Debuschewitz, M.: Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 - 104 Abb. - 169 Seiten - ISBN 3-540-65350-3

- 119 Bauer, L.: Strategien zur rechnergestützten Offline- Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 - 98 Abb. - 145 Seiten - ISBN 3-540-65382-1
- 120 Pfof, E.: Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 - 69 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-65525-5
- 121 Spitznagel, J.: Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen
1999 - 63 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-65896-3

Forschungsberichte IWB ab Band 122

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte IWB ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 122 *Burghard Schneider*: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 *Bernd Goldstein*: Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung
170 Seiten - ISBN 978-3-89675-546-9
- 124 *Helmut E. Mößner*: Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
164 Seiten - ISBN 978-3-89675-585-8
- 125 *Ralf-Gunter Gräser*: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
167 Seiten - ISBN 978-3-89675-603-9
- 126 *Hans-Jürgen Trossin*: Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-614-5
- 127 *Doris Kugelmann*: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
168 Seiten - ISBN 978-3-89675-615-2
- 128 *Rolf Diesch*: Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
160 Seiten - ISBN 978-3-89675-618-3
- 129 *Werner E. Lulay*: Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
190 Seiten - ISBN 978-3-89675-620-6
- 130 *Otto Murr*: Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
178 Seiten - ISBN 978-3-89675-636-7
- 131 *Michael Macht*: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
170 Seiten - ISBN 978-3-89675-638-1
- 132 *Bruno H. Mehler*: Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden
152 Seiten - ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 *Knut Hetmann*: Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle
146 Seiten - ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 *Stefan Blessing*: Gestaltung der Materialfußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
160 Seiten - ISBN 978-3-89675-690-9
- 135 *Can Abay*: Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
159 Seiten - ISBN 978-3-89675-697-8
- 136 *Stefan Brandner*: Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
172 Seiten - ISBN 978-3-89675-715-9
- 137 *Arnd G. Hirschberg*: Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
165 Seiten - ISBN 978-3-89675-729-6
- 138 *Alexandra Reek*: Strategien zur Fokusspositionierung beim Laserstrahlschweißen
193 Seiten - ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 *Khalid-Alexander Sabbah*: Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
148 Seiten - ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 *Klaus U. Schilffebacher*: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
187 Seiten - ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 *Andreas Sprengel*: Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
144 Seiten - ISBN 978-3-89675-757-9
- 142 *Andreas Gallasch*: Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
150 Seiten - ISBN 978-3-89675-781-4
- 143 *Ralf Cuiper*: Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
174 Seiten - ISBN 978-3-89675-783-8
- 144 *Christian Schneider*: Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-789-0
- 145 *Christian Jonas*: Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-5
- 146 *Ulrich Willnecker*: Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
194 Seiten - ISBN 978-3-89675-891-0
- 147 *Christof Lehner*: Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
205 Seiten - ISBN 978-3-8316-0004-5
- 148 *Frank Rick*: Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
145 Seiten - ISBN 978-3-8316-0008-3
- 149 *Michael Höhn*: Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0012-0

- 150 **Jörn Böhl:** Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0020-5
- 151 **Robert Bürgel:** Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0021-2
- 152 **Stephan Dürrschmidt:** Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0023-6
- 153 **Bernhard Eich:** Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 **Wolfgang Rudarfer:** Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 **Hans Meier:** Verteilte kooperative Steuerung maschinenaher Abläufe
166 Seiten - ISBN 978-3-8316-0044-1
- 156 **Gerhard Nowak:** Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0055-7
- 157 **Martin Werner:** Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
191 Seiten - ISBN 978-3-8316-0058-8
- 158 **Bernhard Lenz:** Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
162 Seiten - ISBN 978-3-8316-0094-6
- 159 **Stefan Grunwald:** Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0095-3
- 160 **Josef Gartner:** Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
165 Seiten - ISBN 978-3-8316-0096-0
- 161 **Wolfgang Zeller:** Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0100-4
- 162 **Michael Loferer:** Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
178 Seiten - ISBN 978-3-8316-0118-9
- 163 **Jörg Führer:** Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 **Jürgen Höppner:** Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0125-7
- 165 **Hubert Götte:** Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
258 Seiten - ISBN 978-3-8316-0126-4
- 166 **Martin Weißenberger:** Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0138-7
- 167 **Dirk Jacob:** Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0142-4
- 168 **Ulrich Raßgoderer:** System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 **Robert Klingel:** Anziehfverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
164 Seiten - ISBN 978-3-8316-0174-5
- 170 **Paul Jens Peter Ross:** Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0191-2
- 171 **Stefan von Praun:** Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0202-5
- 172 **Florian von der Hagen:** Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 173 **Oliver Kramer:** Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-0211-7
- 174 **Winfried Dohmen:** Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0214-8
- 175 **Oliver Anton:** Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenter Montagesysteme
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-0215-5
- 176 **Welf Broser:** Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0217-9
- 177 **Frank Breitinge:** Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterens für das Druckgießen
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 **Johann von Pieveling:** Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
163 Seiten - ISBN 978-3-8316-0230-8
- 179 **Thomas Baudisch:** Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0249-0
- 180 **Heinrich Schieferstein:** Experimentelle Analyse des menschlichen Kaustems
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 **Joachim Berlak:** Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 **Christian Meierloh:** Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudplanung in der Fabrikgestaltung
181 Seiten - ISBN 978-3-8316-0292-6
- 183 **Volker Weber:** Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0330-5
- 184 **Thomas Bongardt:** Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
170 Seiten - ISBN 978-3-8316-0332-9
- 185 **Tim Angerer:** Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0336-7
- 186 **Alexander Krüger:** Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
197 Seiten - ISBN 978-3-8316-0371-8
- 187 **Matthias Meindl:** Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-0465-4
- 188 **Thomas Fusch:** Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0467-8
- 189 **Thomas Mosandl:** Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-0471-5
- 190 **Christian Patron:** Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0474-6
- 191 **Robert Cisek:** Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0475-3

- 192 **Florian Auer:** Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
160 Seiten - ISBN 978-3-8316-0485-2
- 193 **Carsten Selke:** Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
137 Seiten - ISBN 978-3-8316-0495-1
- 194 **Markus Seefried:** Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0503-3
- 195 **Wolfgang Wagner:** Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0586-6
- 196 **Christopher Ulrich:** Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0590-3
- 197 **Johann Härtl:** Prozessgasfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
148 Seiten - ISBN 978-3-8316-0611-5
- 198 **Bernd Hartmann:** Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0615-3
- 199 **Michael Schlip:** Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0631-3
- 200 **Florian Manfred Grätz:** Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 **Dieter Eireiner:** Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0663-9
- 203 **Sven Roeren:** Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 **Henning Rudolf:** Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 **Stella Clarke-Griebisch:** Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 **Michael Ehrenstraber:** Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0743-3
- 207 **Rainer Schack:** Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 **Wolfgang Sudhoff:** Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 **Stefan Müller:** Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 **Ulrich Kohler:** Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 **Klaus Schlickerrieder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Müller:** Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 **Daniel Siedl:** Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrenbewegungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 **Dirk Ansorge:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Würnsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oertli:** Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernd Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Lucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mörtl:** Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 **Sebastian Weig:** Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 **Tobias Hornfeck:** Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 **Hans Egermeier:** Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigl:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlstahns
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0841-6
- 224 **Mark Harfensteller:** Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-0849-2
- 225 **Jochen Werner:** Methode zur roboterbasierter förderbandsynchroner Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 **Florian Hagemann:** Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 **Haitham Rashidy:** Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 **Wolfgang Vogl:** Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 **Sonja Schedl:** Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 **Andreas Trautmann:** Bifocal Hybrid Laser Welding - A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 **Patrick Neise:** Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 **Christian Habicht:** Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in unterbetrieblichen Wertschöpfungsketten
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 **Michael Spitzweg:** Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0931-4

- 234 **Ulrich Munzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 **Georg Völlner:** Rührreißschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Christoph Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer für flexiblen Teilezuführung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schilp:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pörnbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreißschweißen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflusintensiver Produktionsanlagen
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sherif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Rad:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Ruhstorfer:** Rührreißschweißen von Rohren
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmelitungsschweißen von Stählen
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5
- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteilabgabestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Marc Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwungrad-Reißschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Mouthicho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Eschey:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4306-6

- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4310-3
- 278 **Saskia Reinhardt:** Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4317-2
- 279 **Fabian J. Meling:** Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4319-6
- 280 **Jörg Egbers:** Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4328-8
- 281 **Max von Bredow:** Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4337-0
- 282 **Tobias Philipp:** RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen
142 Seiten - ISBN 978-3-8316-4346-2
- 283 **Stefan Rainer Johann Braunreuther:** Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4348-6
- 284 **Johannes Pohl:** Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4358-5
- 285 **Mathy Wiesbeck:** Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-4369-1
- 286 **Sonja Huber:** In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4370-7
- 287 **Robert Wiedenmann:** Prozessmodell und Systemtechnik für das laserunterstützte Fräsen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4384-4
- 288 **Thomas Irenhauser:** Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4404-9
- 289 **Jens Hatwig:** Automatisierte Bahnplanung für Industrieroboter und Scanneroptiken bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung
196 Seiten - ISBN 978-3-8316-4405-6
- 290 **Matthias Baur:** Aktives Dämpfungssystem zur Ratterunterdrückung an spanenden Werkzeugmaschinen
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-4408-7
- 291 **Alexander Schober:** Eine Methode zur Wärmequellenkalibrierung in der Schweißstruktursimulation
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-4415-5
- 292 **Matthias Glonegger:** Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4419-3
- 293 **Markus Kahmert:** Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4416-2
- 294 **Sebastian Schindler:** Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4434-6
- 295 **Tobias Föckerer:** Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärtens
128 Seiten - ISBN 978-3-8316-4448-3
- 296 **Rüdiger Spillner:** Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-4450-6
- 297 **Daniel Schmid:** Rührreißschweißen von Aluminiumlegierungen mit Stählen für die Automobilindustrie
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-4452-0
- 298 **Florian Karl:** Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4458-2
- 299 **Philipp Ronald Engelhardt:** System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-4472-8
- 300 **Markus Graßl:** Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4476-6

