

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

**Methodik zur risikoorientierten Bewertung von Energieflexibilität von  
Produktionssystemen**

**Peter Simon**

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Die Dissertation wurde am 21.05.2019 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 19.11.2019  
angenommen.



## 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.



## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV) in Augsburg und am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) sowie als Gastwissenschaftler am Laboratory for Manufacturing and Productivity (LMP) des Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge, MA, USA.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, und dem Prüfungsvorsitzenden Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh für die stets wohlwollende Förderung und die Möglichkeit zur Promotion. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl möchte ich mich recht herzlich für die Übernahme des Koreferats bedanken. Herrn Prof. Dr. Timothy Gutowski danke ich herzlich für die Gastfreundschaft und den wertvollen Austausch während meines Auslandsaufenthaltes.

Ich bedanke mich bei allen Kolleginnen und Kollegen sowie Projektpartnern für die erfolgreiche und wertschätzende Zusammenarbeit, sowie die prägende und lehrreiche Zeit, an die ich gerne zurückdenke. Mein ausdrücklicher Dank gilt Jan Klöber-Koch, Richard Popp und Dr.-Ing. Cedric Schultz für die wertvollen Hinweise und die gründliche Durchsicht meiner Arbeit. Außerdem danke ich Lucas Kiefer, Martin Rösch, Dr.-Ing. Christian Gebbe, Dr.-Ing. Stefan Krotil, Dr.-Ing. Johannes Graf und Alexander Zipfel für die angenehme Atmosphäre im vorderen Trakt des martini-Parks. Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Studierenden, insbesondere bei Floris Roltsch, Florian Kunzmann und Yannik Zeiträg bedanken.

Mein größter und herzlichster Dank aber gilt meiner gesamten Familie, allen voran meinen Eltern und meiner Freundin Sofia, sowie meinen Freunden, für die stetige Unterstützung, unerschöpfliche Geduld und liebevolle Aufmunterung.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>vi</b>
<b>Formelverzeichnis .....</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation .....	1
1.2 Motivation und Betrachtungsrahmen.....	4
1.3 Zielsetzung, wissenschaftliche Einordnung und Aufbau der Arbeit .....	8
<b>2 Grundlagen.....</b>	<b>13</b>
2.1 Übersicht .....	13
2.2 Produktionssysteme .....	13
2.2.1 Definitionen in der Literatur.....	13
2.2.2 Unterscheidungsmerkmale .....	15
2.2.3 Definition in der vorliegenden Arbeit .....	16
2.2.4 Modellierung .....	16
2.2.5 Flexibilität.....	17
2.2.6 Produktionsplanung und -steuerung .....	20
2.3 Risiko in der Produktion .....	21
2.3.1 Definition.....	21
2.3.2 Ursache-Wirkungskette .....	23
2.3.3 Risikomanagement .....	24
2.3.4 Produktionsrisiken.....	24
2.3.5 Kennzahlen der Zuverlässigkeit technischer Komponenten und Systeme.....	25
2.3.6 Methoden der Risikoidentifizierung und -bewertung .....	25

2.4	Vermarktung von Nachfrageflexibilität.....	26
2.4.1	Begrifflichkeiten.....	26
2.4.2	Instrumente des Demand Response .....	27
2.5	Energieflexibilität .....	30
2.5.1	Definition und Potenzialbegriffe.....	30
2.5.2	Grundsätzliche Lastmanagementstrategien.....	31
2.6	Zusammenfassung .....	32
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung und Handlungsbedarf .....</b>	<b>35</b>
3.1	Übersicht.....	35
3.2	Identifikation und Bewertung von Energieflexibilität im Kontext der Produktionsplanung und -steuerung .....	36
3.2.1	Identifikation relevanter Verbraucher und deren Zustände .....	36
3.2.2	Bewertung von Energieflexibilitätsmaßnahmen.....	38
3.2.3	Umsetzung.....	41
3.3	Methoden und Modelle des Risikomanagements in der Produktion .....	46
3.3.1	Identifikation .....	46
3.3.2	Bewertung .....	49
3.4	Handlungsbedarf.....	52
<b>4</b>	<b>Leitgedanke, Anforderungen und Vorgehen der Methodik.....</b>	<b>55</b>
4.1	Allgemeines .....	55
4.2	Leitgedanke der Methodik.....	56
4.3	Anforderungen an die Methodik.....	57
<b>5</b>	<b>Technische und organisatorische Bewertung von Energieflexibilität.....</b>	<b>61</b>
5.1	Übersicht.....	61

5.2	Identifikation von Energieflexibilität.....	63
5.2.1	Auswahl von Produktionsstationen .....	63
5.2.2	Identifikation von Energieflexibilitätsmaßnahmen .....	65
5.2.3	Eigenschaften von Energieflexibilitätsmaßnahmen .....	67
5.3	Bestimmung der Bewertungsparameter auf Produktionssystemebene ....	68
5.3.1	Auswahl von geeigneten Ansätzen zur Beschreibung von Wirkzusammenhängen innerhalb eines Produktionssystems.....	68
5.3.2	Zielgrößen der Bewertung von Energieflexibilität.....	70
5.3.3	Größen zur Beschreibung des Wirkzusammenhangs .....	73
5.3.4	Einflussfaktoren der Zielgrößen für die Bewertung von Energieflexibilität .....	77
5.3.5	Wirkgefüge der Energieflexibilität innerhalb eines Produktionssystems .....	80
5.4	Kategorisierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen.....	83
5.4.1	Parallele und sequenzielle Energieflexibilitätsmaßnahmenbündel (EFMB) .....	83
5.4.2	Verfügbarkeit von Energieflexibilitätsmaßnahmenbündel .....	85
5.4.3	Energieflexibilitätsmaßnahmenkataloge .....	87
5.4.4	Wechselwirkungen von Energieflexibilitätsmaßnahmen.....	88
5.5	Strategien zur technischen und organisatorischen Bewertung.....	91
5.5.1	Übersicht.....	91
5.5.2	Strategie zur Bewertung der Leistungsänderung (SBL) .....	92
5.5.3	Strategie zur Bewertung zeitlicher Eigenschaften (SBZ) .....	95
5.5.4	Strategie zur Bewertung von Wechselwirkungen (SBW).....	98
5.5.5	Bewertung von EFMB.....	101
5.6	Fazit.....	102

<b>6 Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung von Energieflexibilität.....</b>	<b>105</b>
6.1 Übersicht.....	105
6.2 Beschreibung von Energieflexibilität im Wirkgefüge von Produktionsrisiken .....	107
6.2.1 Wirkrichtung von Produktionsrisiken und Energieflexibilitätsmaßnahmen.....	107
6.2.2 Erweiterung bestehender Bewertungsmodelle für Produktionsrisiken.....	110
6.2.3 Bewertung von Methoden zur Identifikation und Bewertung von Risiken.....	111
6.2.4 Aufnahme von Produktionsrisiken.....	113
6.3 Bewertung von Energieflexibilität unter Berücksichtigung von Produktionsrisiken .....	116
6.3.1 Übersicht .....	116
6.3.2 Strategie zur Bewertung der Auswirkungen von Energieflexibilität auf Produktionsrisiken (SBPR).....	117
6.3.3 Strategie zur Bewertung der Verfügbarkeit von EFM unter Risiko (SBVR) .....	122
6.3.4 Strategie zur Bewertung der zeitlichen Eigenschaften von EFM unter Risiko (SBZR) .....	124
6.4 Wirtschaftlichkeitsbewertung von Energieflexibilität.....	129
6.4.1 Erlöse von Energieflexibilitätsmaßnahmen .....	129
6.4.2 Kosten von Energieflexibilitätsmaßnahmen .....	132
6.4.3 Risikokosten von Energieflexibilitätsmaßnahmen.....	133
6.5 Vermarktungsentscheidung von Energieflexibilität als Investitionsentscheidung.....	138
6.5.1 Investitionsausgaben von Energieflexibilität .....	138
6.5.2 Informationsaufbereitung.....	139

6.6	Fazit.....	140
<b>7</b>	<b>Anwendung der Methodik im Praxisbeispiel.....</b>	<b>141</b>
7.1	Übersicht .....	141
7.2	Beschreibung des Anwendungsszenarios .....	141
7.3	Bewertung von Energieflexibilität .....	143
7.4	Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung.....	147
<b>8</b>	<b>Umsetzung und wirtschaftliche Bewertung der Methodik.....</b>	<b>151</b>
8.1	Übersicht .....	151
8.2	Softwaretools.....	151
8.3	Erfüllung der Anforderungen.....	153
8.4	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Methodik.....	154
8.4.1	Übersicht.....	154
8.4.2	Aufwand .....	155
8.4.3	Nutzen und Wirtschaftlichkeit.....	156
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>159</b>
9.1	Zusammenfassung.....	159
9.2	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf .....	161
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>163</b>
10.1	Prüfkriterien für Kombinations-EFM .....	163
10.2	Bewertung von EFMB .....	164
10.3	Anlagensteckbrief .....	165
10.4	Studienarbeiten.....	166
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>169</b>

# Abkürzungsverzeichnis

AP	Altpapier
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BKARTA	Bundeskartellamt
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BNETZA	Bundesnetzagentur
BPA	Betriebsmittel (Produktionsausfall)
BQM	Betriebsmittel (Qualitätsmängel)
CCP	Critical Peak Pricing
DENA	Deutsche Energie-Agentur
DSM	Demand Side Management
EAP	Erstflotation
EEX	European Energy Exchange
EFM	Energieflexibilitätsmaßnahmen
EFMB	Energieflexibilitätsmaßnahmenbündel
ERP-Systeme	Enterprise-Resource-Planning-Systeme
FERC	Federal Energy Regulatory Commission
FF	Forschungsfrage
FfE	Forschungsstelle für Energiewirtschaft
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
IGCV	Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik

IPA	Information (Produktionsausfall)
IQM	Information (Qualitätsmängel)
ISO	International Organization for Standardization
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KWK	Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen
LPA	Lager (Produktionsausfall)
LQM	Lager (Qualitätsmängel)
MRL	Minutenreserveleistung
MTTR	Mean time to repair
NAP	Nachflotation
NILM	Non-intrusive load monitoring
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OK	Objektklasse
PA	Produktionsausfall
PE	Produktionselement
PM	Papiermaschine
PPA	Personal (Produktionsausfall)
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PQM	Personal (Qualitätsmängel)
PRL	Primärregelleistung
QM	Qualitätsmängel
RTP	Real Time Pricing
SBL	Strategie zur Bewertung der Leistungsänderung
SBPR	Strategie zur Bewertung der Auswirkungen von Energieflexibilität auf Produktionsrisiken

## Abkürzungsverzeichnis

---

SBVR	Strategie zur Bewertung der Verfügbarkeit von EFM unter Risiko
SBW	Strategie zur Bewertung von Wechselwirkungen
SBZ	Strategie zur Bewertung Zeitlicher Eigenschaften
SBZR	Strategie zur Bewertung der zeitlichen Eigenschaften von EFM unter Risiko
SRL	Sekundärregelleistung
StromNZV	Stromnetzzugangsverordnung
SynErgie	Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung
TGA	Technischen Gebäudeausrüstung
TMP	Thermomechanical pulp
TOU	Time of Use-Tarif
TPA	Transport (Produktionsausfall)
TQM	Transport (Qualitätsmängel)
VaR	Value-at-Risk
VBA	Visual Basic for Applications
VBW	Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

## Formelverzeichnis

### *Große lateinische Buchstaben*

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Bedeutung</i>
$AG$	€	Abgaben, die bei der einmaligen Durchführung einer EFM entstehen
$AS$	€	Abschreibungen, die bei der einmaligen Durchführung einer EFM entstehen
$A^{Sta}$	%	Auslastung einer Produktionsstation
$C^{\emptyset}$	Stück	Durchschnittlicher Bestand eines Puffers
$C^{St\ddot{o}}$	Stück	Bestand des Puffers nach Störung
$C^{max}$	Stück	Maximale Kapazität eines Puffers
$C^{min}$	Stück	Sicherheitsbestand eines Puffers
$D$	-	Anzahl der Durchführung von EFM im Betrachtungszeitraum der Risikoanalyse
$D^{in}$	Stück/h	Input eines Puffers
$D^{out}$	Stück/h	Output eines Puffers
$EF$	€	Externe Fehlerkosten eines Risikos
$E^{EFM,AP}$	€	Durchschnittliche Einsparungen bei Nutzung anreizbasierter Programme unter Berücksichtigung der Renditeforderungen des Unternehmens
$E^{EFM,ZT}$	€	Durchschnittliche Einsparungen bei Nutzung zeitbasierter Tarife unter Berücksichtigung der Renditeforderungen des Unternehmens
$EW$	%	Eintrittswahrscheinlichkeit eines Risikos
$EW^{Neu}$	%	Durch die Betrachtung von Energieflexibilität veränderte Eintrittswahrscheinlichkeit eines Risikos

## Formelverzeichnis

---

$FD$	€	<i>Kosten für Fremddienste, die bei der einmaligen Durchführung einer EFM entstehen</i>
$IF$	€	<i>Interne Fehlerkosten eines Risikos</i>
$K^{EFM}$	€	<i>Kosten die bei der einmaligen Durchführung einer EFM entstehen</i>
$K^{PA}$	€	<i>Produktionsausfallkosten der durch die Betrachtung von Energieflexibilität erhöhten Risiken über einen Betrachtungszeitraum</i>
$K^{QM}$	€	<i>Qualitätsmängelkosten der durch die Betrachtung von Energieflexibilität erhöhten Risiken über einen Betrachtungszeitraum</i>
$K^R$	€	<i>Risikokosten der einmaligen Durchführung einer EFM</i>
$MK$	€	<i>Materialkosten, die bei der einmaligen Durchführung einer EFM entstehen</i>
$M^{Sta}$	€/h	<i>Maschinenstundensatz einer Produktionsstation</i>
$MTTR$	Min.	<i>Mean time to repair der betrachteten Produktionsstation</i>
$p^h$	kW	<i>Leistungsbedarf des Zielzustands <math>h</math></i>
$p^g$	kW	<i>Leistungsbedarf des Ausgangszustands <math>g</math></i>
$PK$	€	<i>Personalkosten, die bei der einmaligen Durchführung einer EFM entstehen</i>
$RG$	€	<i>Kosten für Rechtsgüter, die bei der einmaligen Durchführung einer EFM entstehen</i>
$SA^{PA}$	Stück	<i>Schadensausmaß eines Produktionsausfallrisikos</i>
$SA^{QM}$	Stück	<i>Schadensausmaß eines Qualitätsmängelrisikos</i>
$WK$	€	<i>Wagniskosten, die bei der einmaligen Durchführung einer EFM entstehen</i>

$Z$             €            Zinskosten, die bei der einmaligen Durchführung einer EFM entstehen

***Kleine lateinische Buchstaben***

<b><i>Symbol</i></b>	<b><i>Einheit</i></b>	<b><i>Bedeutung</i></b>
$e^{AP}$	€/kWh	Durchschnittlich gezahlter Arbeitspreis
$e^{LP}$	€/kW	Durchschnittlich gezahlter Leistungspreis
$e^{ZT}$	€/kWh	Mittlerer Strompreis
$g$	-	Zählvariable für Ausgangszustände
$h$	-	Zählvariable für Zielzustände
$i$	-	Zählvariable für bereits im Risikoinventar vorhandene Risiken
$j$	-	Zählvariable für Risiken, die durch die Berücksichtigung von Energieflexibilität neu im erweiterten Risikoinventar aufgenommen werden
$k$	-	Zählvariable für Kombinations-EFM innerhalb eines EFMB
$m$	-	Zählvariable für EFM
$n$	-	Zählvariable für Produktionsstationen
$t_{AT}$	Min.	Betriebsdauer pro Arbeitstag
$t_B$	Min.	Zeitdauer des Betrachtungszeitraums
$t^E$	Min.	Durchschnittliche Zeitdauer eines Strompreisniveaus bzw. eines Events
$t_{verweil,\emptyset}^{EFM}$	Min.	Durchschnittliche Verweildauer einer EFM
$t_{akt}^{EFM}$	Min.	Aktivierungsdauer einer EFM
$t_{akt,Stö}^{EFM}$	Min.	Aktivierungsdauer einer EFM im Falle einer Störung während der Aktivierung

## Formelverzeichnis

---

$t_{akt,Risiko}^{EFM}$	Min.	Aktivierungsdauer einer EFM unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Störung
$t_{deakt}^{EFM}$	Min.	Deaktivierungsdauer einer EFM
$t_{max,Risiko}^{EFM}$	Min.	Maximale Verweildauer einer EFM unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Störung
$t_{max}^{EFM}$	Min.	Maximale Verweildauer einer EFM
$t_{min,Stö}^{EFM}$	Min.	Minimale Verweildauer einer EFM im Falle einer Störung
$t_{min,Risiko}^{EFM}$	Min.	Minimale Verweildauer einer EFM unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Störung
$t_{min}^{EFM}$	Min.	Minimale Verweildauer einer EFM
$t_{na}^{EFM}$	Min.	Nachbereitungsdauer einer EFM
$t_{vo}^{EFM}$	Min.	Vorbereitungsdauer einer EFM
$t_{max,Stö}^{EFM,vor}$	Min.	Maximale Verweildauer einer EFM im Falle einer Störung als Auswirkung eines vorgelagerten Puffers bei einer Störung vor der Durchführung einer EFM
$t_{akt}^{ext}$	Min.	Extern vorgegebener Grenzwert für die Aktivierungsdauer
$t_{deakt}^{ext}$	Min.	Extern vorgegebener Grenzwert für die Deaktivierungsdauer
$t_{max}^{ext}$	Min.	Extern vorgegebener Grenzwert für die Maximale Verweildauer
$t_{min}^{ext}$	Min.	Extern vorgegebener Grenzwert für die Minimale Verweildauer
$t_{akt}^K$	Min.	Aktivierungsdauer einer Kombinations-EFM

$t_{\text{deakt}}^K$	<i>Min.</i>	<i>Deaktivierungsdauer einer Kombinations-EFM</i>
$t_{\text{max}}^K$	<i>Min.</i>	<i>Maximale Verweildauer einer Kombinations-EFM</i>
$t_{\text{min}}^K$	<i>Min.</i>	<i>Minimale Verweildauer einer Kombinations-EFM</i>
$t^{PA}$	<i>Min.</i>	<i>Zeitliche Auswirkungen von Produktionsausfallrisiken auf eine EFM</i>
$t_V$	<i>Min.</i>	<i>Zeitliche Verfügbarkeit einer EFM während eines Arbeitstags</i>

**Griechische Buchstaben**

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\Delta P^{EFMB}$	<i>kW</i>	<i>Leistungsdifferenz, welche durch eine EFMB hervorgerufen wird</i>
$\Delta P^{EFM}$	<i>kW</i>	<i>Leistungsdifferenz, welche durch eine EFM hervorgerufen wird</i>
$\Delta P^K$	<i>kW</i>	<i>Leistungsdifferenz, welche durch eine Kombinations-EFM hervorgerufen wird</i>
$\Delta P^{ext}$	<i>kW</i>	<i>Extern vorgegebener Grenzwert für die Leistungsveränderung einer EFM</i>
$\beta^K$	<i>%</i>	<i>Verfügbarkeit der Kombinations-EFM</i>
$\beta^{int}$	<i>%</i>	<i>Max. erforderliche Verfügbarkeit der Kombinations-EFM</i>
$\beta_m^{PA}$	<i>%</i>	<i>Verfügbarkeit der EFM unter Berücksichtigung des Produktionsausfallsrisikos</i>
$\lambda^{EFM}$	<i>Stück/h</i>	<i>Durchsatz der Produktionsstation während der EFM</i>
$\lambda^{Sta}$	<i>Stück/h</i>	<i>Durchsatz einer Produktionsstation</i>
$\rho_{Fall}$	<i>%</i>	<i>Eintrittswahrscheinlichkeit des jeweiligen Falls zur Berechnung der maximalen Verweildauer</i>

## Formelverzeichnis

---

$\rho_{akt}$	%	<i>Anteil der störungsfreien Aktivierungsdauer, nach der im Durchschnitt eine Störung auftritt</i>
$\rho_{min}$	%	<i>Anteil der bis zur Störung durchschnittlich vergangenen minimalen Verweildauer</i>
$\varphi$	-	<i>Anwenderspezifisch zu definierende Toleranz bezüglich der Leistungsveränderung</i>
$\tau$	-	<i>Anwenderspezifisch zu definierende Toleranz bezüglich der zeitlichen Eigenschaften</i>
$\eta^{Sta}$	%	<i>Zuverlässigkeit der betrachteten Produktionsstation</i>
$\delta^E$	%	<i>Individuellen Preisschranke von Unternehmen zur Nutzung der Energieflexibilität</i>

# 1 Einleitung

*It has to start somewhere  
It has to start sometime  
What better place than here  
What better time than now.*

*Zack de la Rocha*

## 1.1 Ausgangssituation

Renommierte Wissenschaftler sind sich einig, dass der Klimawandel durch die Menschheit verursacht wird (BENESTAD UND SCHMIDT 2009; LE QUÉRÉ ET AL. 2009). Die daraus entstehenden globalen Folgen, wie z. B. der Anstieg des Meeresspiegels und Hitzewellen, sind mittlerweile vielen Staaten bewusst geworden. In diesem Zusammenhang wurden im Pariser Klimaabkommen aus dem Jahr 2015 alle Staaten aufgefordert eine Klima-Langfriststrategie zu entwickeln (KÖHLER ET AL. 2010; UNITED NATIONS 2015; US-AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN 2016). Die Bundesrepublik Deutschland kam dieser Aufforderung im November 2016 als erstes Land nach und hinterlegte die Beschreibung der eigenen Strategie bei den Vereinten Nationen. Der dazugehörige Plan wurde mit dem Beschluss der Energiewende und den damit verbundenen Maßnahmen bereits eingeleitet und hat weitreichende Konsequenzen für den Energiemarkt und die Verbraucher (BMUB 2017).

Eine weitere grundlegende Motivation der Energiewende ist in der Ressourcenverknappung zu finden (BMW I 2014), da eine dauerhaft hohe Lebensqualität auf der stetigen Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen basiert. Es müssen Maßnahmen ergriffen werden, um nicht mehr Ressourcen, wie z. B. Kohle oder Öl, zu verbrauchen, als wieder regeneriert werden können (ABELE UND REINHART 2011; KLEINE UND HAUFF 2009). Das Ziel ist dabei die Sicherstellung einer zuverlässigen, wirtschaftlichen und umweltverträglichen Energieversorgung (BMW I 2010). Damit geht eine tiefgreifende Veränderung der Energiemärkte in Deutschland einher (BNETZA UND BKARTA 2017).

## 1.1 Ausgangssituation

Wie in Abbildung 1-1 dargestellt, entfielen im Jahr 2016 ca. 66,6 % der Stromerzeugung auf nicht erneuerbare Energien. Die Nutzung von Kohle, Öl, Gas und Kernenergie ist dabei enthalten (FRAUNHOFER ISE 2017). Der Einsatz erneuerbarer Energien als Substitution der dominierenden Energiearten besitzt folglich eine hohe Bedeutung bei der Reduzierung des Verbrauchs natürlicher Ressourcen (VBW 2010; BURGER ET AL. 2012). Zusätzlich können z. B. durch das Ersetzen von Energie aus dem Verbrennungsprozess durch Solarenergie oder Energie aus Wasserkraft CO<sub>2</sub>-Einsparungen erreicht werden (DENA 2010). Der Kern der Energiewende ist somit die Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch von derzeit 33,4 % auf 80 % bis zum Jahr 2050 (BMWi 2010). Dabei wird aktuell prognostiziert, dass die kurzfristigen Ziele bis zum Jahr 2020 übertroffen werden (BMWi 2017).

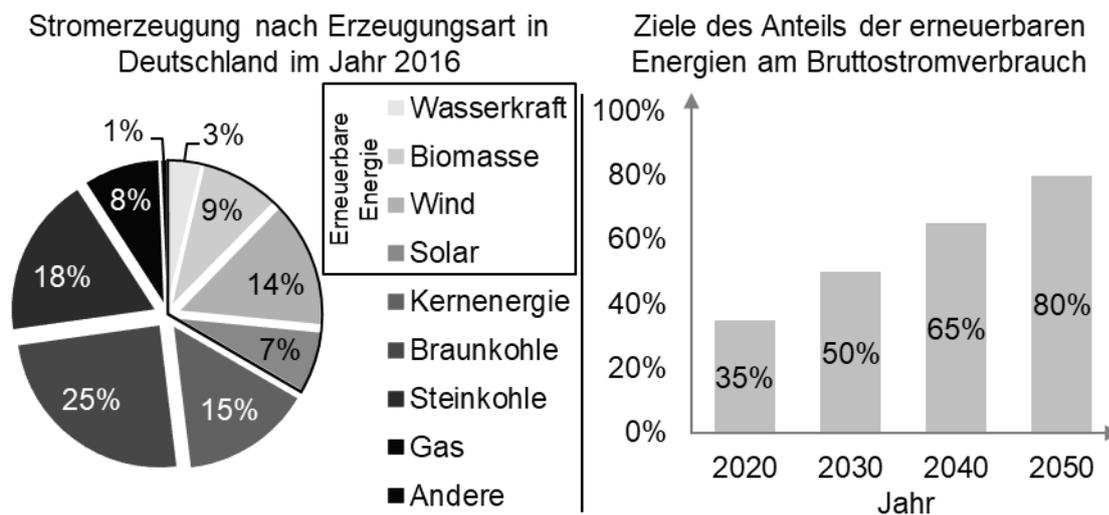


Abbildung 1-1: Stromerzeugung nach Erzeugungsart und Ziele des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch nach (BMWi 2010; FRAUNHOFER ISE 2017)

Die somit ansteigende Erzeugung erneuerbarer Energien geht aufgrund ihrer Abhängigkeiten von den jeweils aktuellen Witterungsbedingungen mit einer erhöhten Volatilität der zur Verfügung stehenden elektrischen Energie einher (KANNGIESER ET AL. 2011). Hierbei ist zu beachten, dass Erzeugung und Verbrauch zu jedem Zeitpunkt ausgeglichen sein müssen, da sich elektrischer Strom in den erforderlichen Mengen aktuell nicht wirtschaftlich speichern lässt (SCHUFFT 2007). Zur Messung des Gleichgewichts wird die Netzfrequenz herangezogen. Dazu ist es nötig, dass der jeweilige Übertragungsnetzbetreiber das Stromnetz stabil hält (SERVATIUS ET AL. 2012). Dabei werden mithilfe von verschiedenen Instrumenten zum Ausgleich von Netzschwankungen entweder eine Anpassung des Stromangebots

(z. B. Redispatch-Maßnahmen) oder der Stromnachfrage (z. B. Regelleistungsrreserven) vorgenommen (DENA 2010). Zum übergeordneten Ausgleich von Schwankungen ist zusätzlich der Aufbau neuer Stromnetztrassen und Reservekraftwerke nötig (LANGROCK ET AL. 2016). Der dargestellte steigende Aufwand zur Erhaltung der Netzstabilität ist mit volkswirtschaftlichen Kosten verbunden<sup>1</sup>, welche die Preise von elektrischem Strom für die privaten Verbraucher und die Industrie ansteigen lassen (KLOBASA ET AL. 2013; BNETZA & BKARTA 2017). Dabei sind die durchschnittlichen Strompreise für die Industrie inklusive Stromsteuer in den letzten 15 Jahren um 139 % angestiegen. Im Jahr 2016 lag der absolute Preis damit nach BDEW 2016 bei 15,44 ct/kWh, wobei 6,89 ct/kWh der Beschaffung, dem Netzentgelt und dem Vertrieb sowie 6,35 ct/kWh den Konzessionsabgaben zugeordnet wurden. Aus diesem Grund verfolgen produzierende Unternehmen die Entwicklungen auf dem deutschen Energiemarkt mit großem Interesse und analysieren diesen in Bezug auf Möglichkeiten, Energiekosten zu reduzieren (REINHART ET AL. 2012).

Ein Ansatz zur Sicherstellung der Netzstabilität ist die beabsichtigte Steuerung der Stromnachfrage von Verbrauchern als Reaktion auf Signale der Angebotsseite (BAUER ET AL. 2017). Da der verarbeitenden Industrie und dem Bergbau im Jahr 2016 über 47 % des Nettostromverbrauchs zugerechnet wurde (AGEB 2017), stellt dieser Sektor eine entscheidende Stellgröße dar. Zur Steuerung der Stromnachfrage nutzen produzierende Unternehmen eventuell bestehende Flexibilität in der Produktion, um ihren Lastgang temporär zu verändern (REINHART ET AL. 2014). Dadurch werden zum einen ein weiteres Instrument zur Gewährleistung der Netzstabilität geschaffen und zum anderen den Verbrauchern Möglichkeiten zur Einsparung von Energiekosten geboten (LANGROCK ET AL. 2015). Die Reduzierung der Kosten bei der Strombeschaffung kann aus der Ausnutzung von Strompreisschwankungen resultieren, die wiederum von Schwankungen des Stromangebots verursacht werden. Bei der europäischen Strombörse EPEX SPOT konnte 2015 ein Anstieg der Preisstreuung<sup>2</sup> beobachtet werden, der u. a. auf den beschriebenen Zusammenhang zurückzuführen ist (BNETZA UND BKARTA 2016).

---

<sup>1</sup> Die Kosten der Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen in Deutschland stiegen in den Jahren 2011 bis 2016 um 265 % auf 220 Mio. € an (BNETZA 2017).

<sup>2</sup> Beispielhaft betrug die Spannweite der mittleren 50 % der größensortierten Phelix-Day-Base-Werte 2015 genau 10,42 Euro/MWh und stieg im Vergleich zu 2014 um 8 % (BNETZA UND BKARTA 2016).

## 1.2 Motivation und Betrachtungsrahmen Ausgangssituation

Mit dem steigenden Anteil erneuerbarer Energien wird dabei weiterhin von einer steigenden Preisvolatilität ausgegangen (KÖHLER UND AGRICOLA 2012). Abbildung 1-2 verdeutlicht anhand des Verlaufs der Strompreise des EPEX SPOT Phelix Day Base am 06.12.2017 (EEX 2017) und eines beispielhaft geplanten und angepassten Lastgangs eines produzierenden Unternehmens die wirtschaftlichen Anreize für Unternehmen, ihren Stromverbrauch zeitlich anzupassen. In diesem Beispiel können durch Lastverschiebung 5,05 % der Energiekosten dieses Tages eingespart werden.

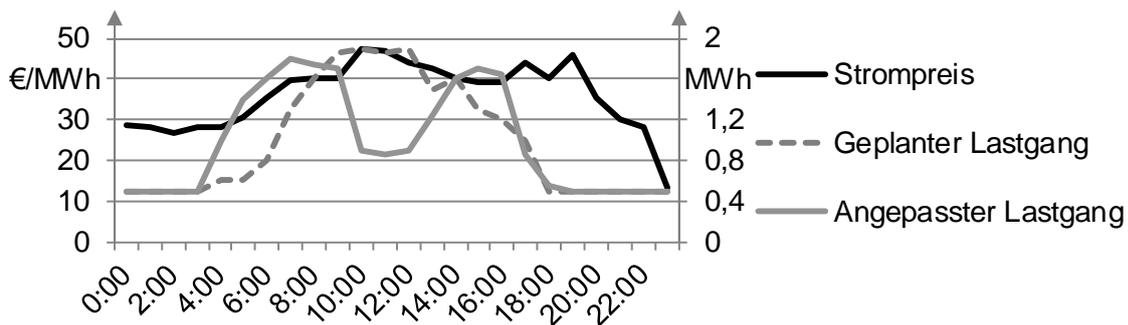


Abbildung 1-2: Strompreis des EPEX SPOT Phelix Day Base am 06.12.2017 und beispielhaft geplanter und angepasster Lastgang eines Unternehmens (EEX 2017)

## 1.2 Motivation und Betrachtungsrahmen

Die Veränderungen auf dem Energiemarkt zeigen die Motivation produzierender deutscher Unternehmen, sich mit ihrem elektrischen Energieverbrauch und im Speziellen mit ihrer damit verbundenen Flexibilität auseinanderzusetzen. Dabei weisen Unternehmen unterschiedliche technische Potenziale auf (LANGROCK ET AL. 2015). Nach einer Studie über das realisierbare Lastmanagementpotenzial der vier Branchen Zement-, Papier-, Chlor- und Stahlindustrie werden für den süddeutschen Raum wirtschaftliche Potenziale in Höhe von 400 bis 450 MW identifiziert<sup>3</sup>, die aktuell größtenteils ungenutzt sind. Im Weiteren geben in einer Onlinebefragung 26 % von 97 befragten Unternehmen an, keine Erfahrung mit Lastmanagement zu haben. Die tatsächliche Nutzung der Potenziale für einen optimierten Stromeinkauf wird lediglich von 16 % durchgeführt (DENA 2010; KLOBASA ET AL. 2013).

<sup>3</sup> Zur Bewertung dieser Größenordnung kann die von der Bundesnetzagentur ausgewiesene bundesweite Leistungsreserve zur erfolgreichen Beherrschung des Systembetriebs von 2,5 GW herangezogen werden (KLOBASA ET AL. 2013).

Die dargestellten Zusammenhänge verdeutlichen den Bedarf von Unternehmen nach Methoden und Vorgehen zur Bewertung der Potenziale von Energieflexibilität in der Produktion. Energieflexibilität ist als die Fähigkeit definiert, „sich schnell und mit sehr geringem finanziellen Aufwand an Änderungen des Energiemarktes anzupassen“ (REINHART ET AL. 2012). Dabei stellt die technische Bewertung der Potenziale die Voraussetzung der ökonomischen Bewertung dar, da nicht alle identifizierten Möglichkeiten des Lastmanagements wirtschaftlich umgesetzt werden können. Mit der Teilnahme an verschiedenen Vermarktungsmöglichkeiten der Nachfrageflexibilität sind in vielen Fällen Investitionen verbunden, die durch die potenziellen Energiekostenreduzierungen refinanziert werden müssen.

Im Weiteren wird in der Literatur häufig auf den zur Veränderung des Lastgangs notwendigen Eingriff in die Planung oder den bereits geplanten Produktionsablauf durch die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) hingewiesen (BEIER 2017; KELLER ET AL. 2017; SCHULTZ ET AL. 2017). Diese sind häufig mit Risiken bezüglich der Produktionsziele von Unternehmen, wie z. B. die Ausbringungsmenge, verbunden. Dabei kann bspw. die Reduktion der Zuverlässigkeit einer Anlage genannt werden (LIEBL ET AL. 2015A; LIEBL ET AL. 2015B). Die Veränderung der Risikosituation durch die Implementierung von zeitlichen Lastveränderungen ist folglich bei einer Bewertung von Energieflexibilität zu berücksichtigen (GRAßL 2015).

Darüber hinaus ist es aufgrund der hohen Komplexität bei der Ermittlung von Energieflexibilitätpotenzialen notwendig, den Betrachtungsrahmen einzugrenzen und zu definieren. Nachfolgend wird der Fokus dieser Arbeit auf elektrischen Strom, die Auswahl der Betrachtungsebene in einem Unternehmen und die Einschränkung bezüglich der Analyse von Produktionsstationen begründet und beschrieben.

### **Elektrischer Strom**

Als Input für Produktionssysteme sind Unternehmen auf den Bezug von Energie in Form von

- elektrischer Energie (50 %),
- Brennstoffe und Gase (43 %), sowie
- Fernwärme (7 %),

angewiesen. Dabei nimmt der Einsatz von elektrischem Strom beim verarbeitenden Gewerbe den größten Anteil ein (FRAUNHOFER ISI 2013). Durch die bereits

## **1.2 Motivation und Betrachtungsrahmen Ausgangssituation**

---

erwähnten steigenden Strompreise für das verarbeitende Gewerbe ergibt sich folglich eine hohe wirtschaftliche Relevanz für die Betrachtung elektrischer Energie. Damit stellt sie den Fokus dieser Arbeit dar. Um diese innerhalb eines produzierenden Unternehmens analysieren zu können, erscheint es sinnvoll, nachfolgende räumliche Eingrenzung des Betrachtungsrahmens vorzunehmen.

### **Betrachtungsebenen in produzierenden Unternehmen**

Nach WIENDAHL ET AL. (2007) können zur Kategorisierung von Betrachtungsebenen in produzierenden Unternehmen eine ressourcenorientierte und eine räumliche Sichtweise eingenommen werden. Die ressourcenorientierte Sichtweise nach WESTKÄMPER UND DECKER (2006) betrachtet die technischen und menschlichen Ressourcen, die benötigt werden, um Prozesse auszuführen. Die räumliche Sichtweise nach NYHUIS ET AL. (2005) basierend auf WIENDAHL (2002) und fokussiert die räumlichen Gegebenheiten einer Fabrik, die sich wiederum in Abhängigkeit der Ressourcen ergeben. Eine Gruppierung erfolgt dabei hinsichtlich ähnlicher Bedingungen, wie z. B. einheitliche Boden- oder Lichtverhältnisse.

Im Rahmen der Bewertung von Energieflexibilität stehen weitestgehend Material- und Informationsflüsse sowie die dabei eingesetzten Ressourcen im Fokus, um die Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen einzelnen Elementen in der Produktion betrachten zu können. Hierbei spielt bspw. eine Betrachtung der Ergonomie und der Sicherheit von Produktionsstationen, die in der räumlichen Sichtweise von zentraler Bedeutung sind, eine untergeordnete Rolle. Daher wird im Weiteren die in Abbildung 1-3 dargestellte Einordnung von Ebenen der Produktion aus einer ressourcenorientierten Sichtweise fokussiert.

Die Basis stellen die einer Wertschöpfung zugrundeliegenden Prozesse, wie z. B. Bohren oder Fräsen, dar. Die zweite Stufe sind einzelne Produktionsstationen. Dabei sind alle wertschöpfenden Tätigkeiten sowie die Handhabung von Werkstücken und Werkzeugen ebenso inbegriffen wie Maschinen. Eine weitere Aggregation erfolgt im nächsten Schritt mit dem Begriff der Produktionsstationen. Darunter sind alle Ressourcen zusammengefasst, die zur abschließenden Erstellung eines Werkstücks benötigt werden. Eine eventuelle Qualitätsprüfung ist dabei mitberücksichtigt (WIENDAHL ET AL. 2007). Der Begriff des Produktionssystems umfasst alle bisher genannten Elemente, die in direktem Zusammenhang miteinander stehen. Dazu zählen die Fertigungs- und Montageprozessketten und die für die Ausführung notwendigen unterstützenden Elemente der Materialflusstechnik. Im Anschluss werden mehrere Systeme zu Segmenten zusammengefasst. Die Pro-

dukte verlassen diese in den meisten Fällen versandfertig, weshalb Produktionssegmente u. a. die Produktion, den Transport, die Lagerung und die Qualitätsprüfung von Produkten beinhalten. Zusätzlich sind sie oftmals baulich voneinander getrennt (WIENDAHL ET AL. 2014). Der Aggregationsstufe einer Fabrik sind oftmals mehrere Segmente zugeordnet, die als Knotenpunkt eines Netzwerks dienen. Hierbei werden Zusammenhänge aufgezeigt, die sich durch Material- und Informationsflüsse entlang der Supply-Chain ergeben. Das Netzwerk gibt eine Übersicht über geografisch separierte Fabriken (BÖCK 2013).

Zur detaillierten Analyse ist die Auswahl einer möglichst hohen Bewertungsebene von entscheidender Bedeutung. Allerdings wird ebenfalls die Komplexität und damit der Aufwand der Bewertungsaufgabe enorm gesteigert. Um Zusammenhänge zwischen Betriebsmitteln betrachten zu können, ist die Ebene des Produktionssystems ausreichend, da hierbei Material- und Informationsflüsse analysiert werden können. Zusätzlich kann zur Bewertung von mehreren Systemen in Produktionssegmenten eine Aggregation einzelner Bewertungen erfolgen. Eine Erhöhung der Bewertungskomplexität durch die Fokussierung aller Betrachtungsebenen ist daher unnötig und kann vermieden werden.

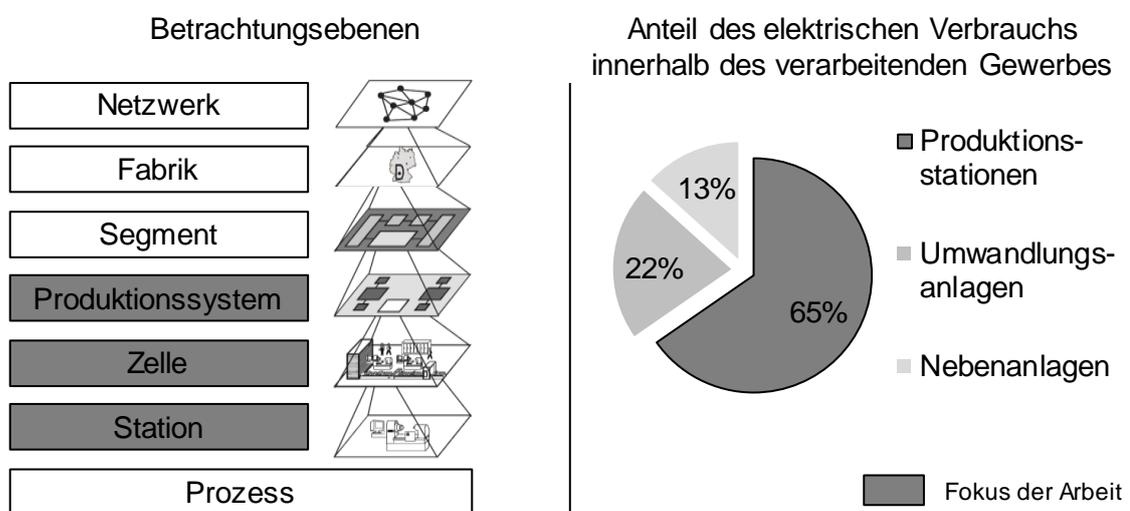


Abbildung 1-3: Fokus der Arbeit bezüglich Betrachtungsebenen (WIENDAHL ET AL. 2014) und Anteil des elektrischen Verbrauchs innerhalb des verarbeitenden Gewerbes (FRAUNHOFER ISI 2013)

## Produktionsstationen

Der Einsatz elektrischer Energie in Produktionssystemen im verarbeitenden Gewerbe lässt sich nach dem Verbrauch in wertschöpfende *Produktionsstationen* (z. B. Werkzeugmaschinen), *Umwandlungsanlagen* als Anlagen zur Bereitstellung

### 1.3 Zielsetzung, wissenschaftliche Einordnung und Aufbau der Arbeit

---

von bestimmten Energieformen (z. B. Druckluftkompressoren) und *Nebenanlagen* als Anlagen ohne direkten Bezug zur Produktion (z. B. Beleuchtung) unterscheiden (BÖCKMANN 2014). Den weitaus größten Anteil und damit das grundsätzlich höchste Potenzial haben die Produktionsstationen (FRAUNHOFER ISI 2013), weshalb auf ihnen auch der Fokus dieser Arbeit liegt. Abbildung 1-3 stellt diesen Zusammenhang grafisch dar.

### 1.3 Zielsetzung, wissenschaftliche Einordnung und Aufbau der Arbeit

Die gegenwärtige Situation produzierender Unternehmen sowie die dargestellte Motivation der vorliegenden Arbeit verdeutlichen, dass produzierende Unternehmen Methoden und Vorgehensweisen zur Bewertung von Energieflexibilitätspotenzialen benötigen, um eine Vermarktungsentscheidung bezüglich der identifizierten Möglichkeiten treffen zu können. Insbesondere die Bewertung eventueller Veränderungen der Risikosituation, welcher sich produzierende Unternehmen durch eine zeitliche Beeinflussung ihres Lastgangs gegenübersehen, muss hierbei berücksichtigt werden. Abbildung 1-4 zeigt die Zielsetzung der Arbeit und die vier daraus abgeleiteten Forschungsfragen.

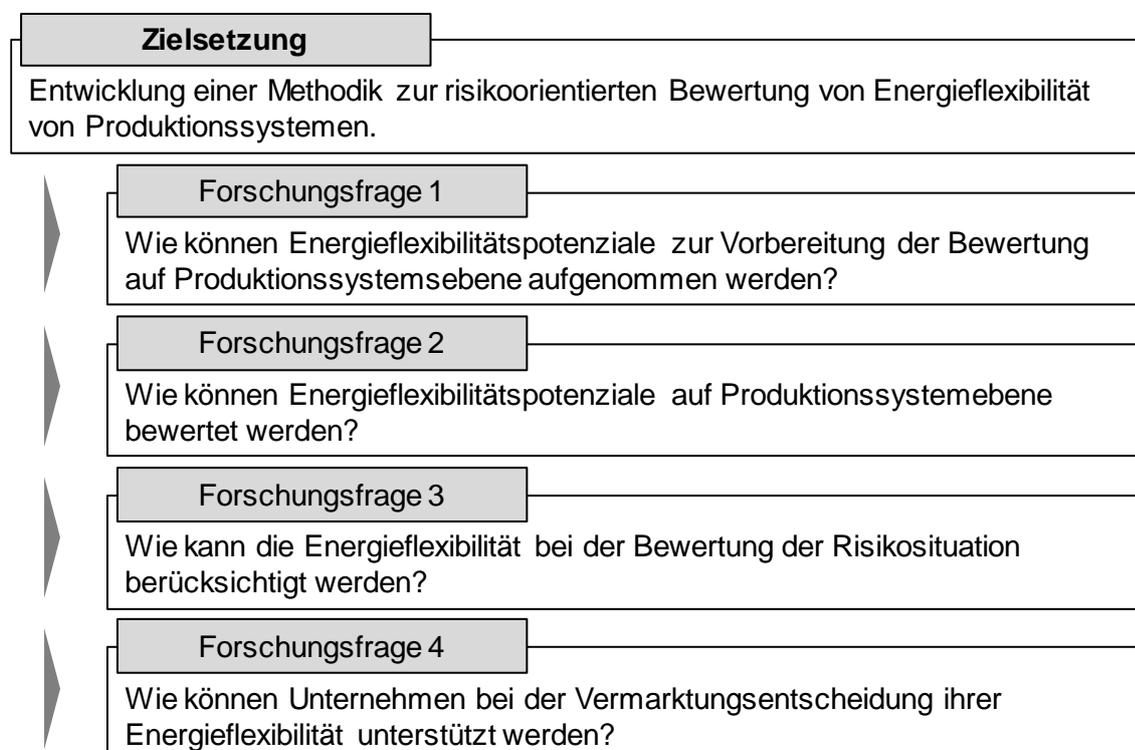
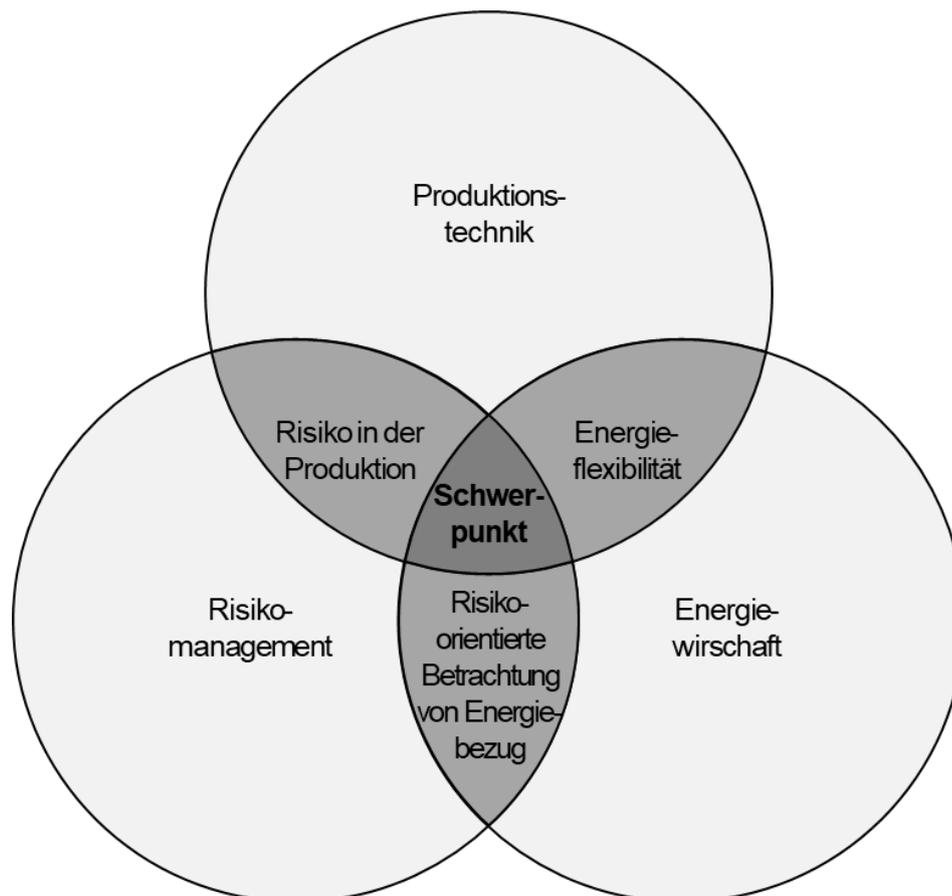


Abbildung 1-4: Zielsetzung und Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit

Die hier vorliegende Arbeit ist nach ULRICH UND HILI (1976) den angewandten Handlungswissenschaften und damit den Realwissenschaften zuzuordnen. Durch die Analyse menschlicher Handlungsalternativen entsteht eine Methodik für die Behandlung der o. g. Aufgabenstellung. Dabei müssen die aktuellen Erkenntnisse und insbesondere die Methoden aus den wissenschaftlichen Themengebieten der Produktionstechnik, der Energiewirtschaft und des Risikomanagements berücksichtigt und miteinander verbunden werden (siehe Abbildung 1-5). Die Vorgehensweise kann folglich als kreativ/synthetisch beschrieben werden.

Bei der Betrachtung von Energieflexibilität ist es erforderlich, die Anforderungen der Energiewirtschaft und die aktuellen Gegebenheiten in der Produktionstechnik kombiniert zu untersuchen. Im Weiteren gilt es, eine risikoorientierte Berücksichtigung der möglichen Energiebezugsformen vorzunehmen. Die Überschneidung des Risikomanagements mit der Produktionstechnik mündet in der Analyse des Risikos in der Produktion. Die Verknüpfung der drei Wissenschaftsgebiete stellt folglich die Basis der Untersuchungen zur Entwicklung einer Methodik zur risikoorientierten Bewertung von Energieflexibilität von Produktionssystemen dar.



*Abbildung 1-5: Verknüpfung der wissenschaftlichen Themengebiete und der dadurch entstehende Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit*

### 1.3 Zielsetzung, wissenschaftliche Einordnung und Aufbau der Arbeit

Um die dargelegte Zielsetzung zu erreichen und die Forschungsfragen zu beantworten, wurde die in Abbildung 1-6 dargestellte Struktur gewählt, die sich in neun inhaltliche Kapitel unterteilt. Nach der einführenden Erläuterung der aktuellen Situation des deutschen Energiemarktes sowie deren Bedeutung für produzierende Unternehmen und deren Risikosituation erfolgt in Kapitel 2 die Darstellung der relevanten Grundlagen. Darauf aufbauend werden in Kapitel 3 die aktuellen Methoden und Modelle der Identifikation und Bewertung von Energieflexibilität im Kontext der PPS und des Risikomanagements in der Produktion vorgestellt, bewertet und der sich daraus ergebene Handlungsbedarf beschrieben.

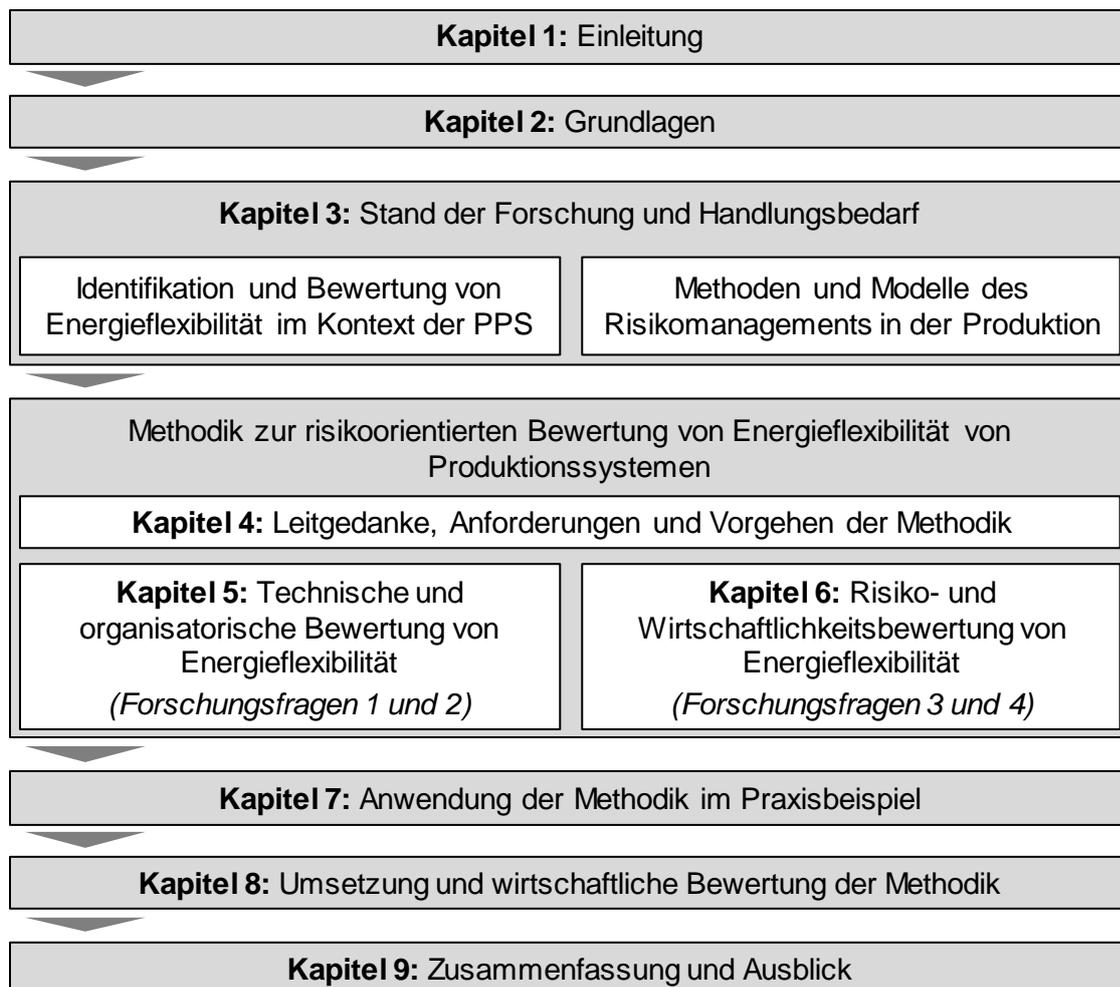


Abbildung 1-6: Aufbau der vorliegenden Arbeit

Kapitel 4 zeigt den Leitgedanken der Arbeit auf und definiert die Anforderungen an die Methodik zur risikoorientierten Bewertung von Energieflexibilität von Produktionssystemen. Im Anschluss wird das übergeordnete Vorgehen vorgestellt. Kapitel 5 widmet sich der Forschungsfrage 1 und 2 und entwickelt als ersten Bau-

stein der Methodik ein Vorgehen zur technischen und organisatorischen Bewertung von Energieflexibilität. Dabei stellen ein Wirkgefüge der entsprechenden Einflussfaktoren und drei Strategien zur Bewertung von Energieflexibilitätsmaßnahmen die zentralen Bestandteile dar. Im Fokus des sechsten Kapitels stehen die Betrachtung der Risikosituation von produzierenden Unternehmen im Kontext von Energieflexibilität und die damit einhergehende Entwicklung von drei weiteren Strategien zur Bewertung (Forschungsfrage 3) sowie die Wirtschaftlichkeitsbewertung von Energieflexibilität (Forschungsfrage 4). Die Bewertungsstrategien geben dabei bezüglich des Produktionsrisikos relevanten Input für die übergeordnete Bewertung der Wirtschaftlichkeit, z. B. in Form eines monetär bewerteten Risikos. Die bei der Beantwortung der zwei Forschungsfragen entstehenden Vorgehensweisen sind dadurch stark miteinander verknüpft und werden aus diesem Grund in einem Kapitel beschrieben. Ziel ist es dabei die abschließende Informationsaufbereitung für eine Vermarktungsentscheidung der Energieflexibilität für das Management des betroffenen Unternehmens in sich geschlossen zu beschreiben.

Das Kapitel 7 beschreibt die Validierung der Methodik in einem Praxisbeispiel. Darauf aufbauend wird in Kapitel 8 deren Umsetzung in einem Softwareprogramm vorgestellt und die Wirtschaftlichkeit analysiert. Kapitel 9 fasst die Ergebnisse der Arbeit abschließend zusammen. Zusätzlich erfolgt ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen des Vorgehens im Bereich der Bewertung von Energieflexibilität.



## 2 Grundlagen

### 2.1 Übersicht

Aufbauend auf der beschriebenen Ausgangssituation und Zielsetzung der Arbeit werden in diesem Kapitel die erforderlichen Grundlagen zur Bewertung von Energieflexibilität von Produktionssystemen unter Berücksichtigung der Risikosituation von produzierenden Unternehmen beschrieben. Hierbei ist es erforderlich, den Begriff des Produktionssystems über dessen Eigenschaften herzuleiten und für diese Arbeit zu definieren. Zusätzlich werden die Aufgaben und Ziele der PPS als einer der Adressaten der Methode untersucht, um deren Anforderungen bei der Erstellung der Bewertungsmethode zu berücksichtigen. Im Weiteren werden die Grundlagen zur Risikobetrachtung der Produktion erläutert. Dabei ist der Begriff des Risikos zunächst zu definieren. Anschließend wird die zugehörige Ursache-Wirkungskette dargestellt, um darauf aufbauend die vier Phasen des Risikomanagements zu erläutern, das Produktionsrisiko zu beschreiben sowie Methoden der Risikoidentifikation und -bewertung zu beurteilen. Abschließend werden die nötigen Begrifflichkeiten und Möglichkeiten zur Vermarktung von Nachfrageflexibilität dargestellt. Das Kapitel fasst damit die erforderlichen Kenntnisse zum Verständnis dieser Arbeit zusammen (siehe Abbildung 2-1).

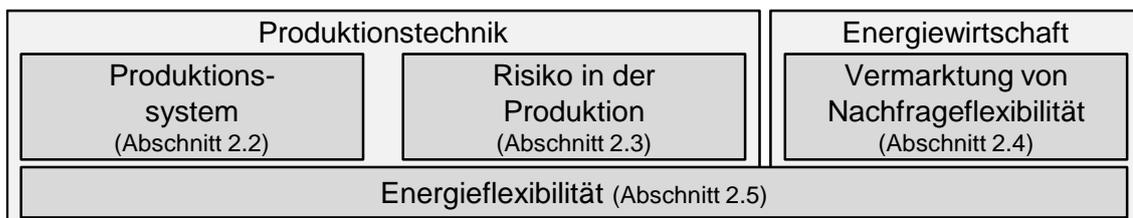


Abbildung 2-1: Übersicht zum Aufbau der Grundlagen

## 2.2 Produktionssysteme

### 2.2.1 Definitionen in der Literatur

In der Literatur existieren zahlreiche Definitionen des Begriffs Produktion. HELBING (2010) definiert die Produktion als „*Gesamtheit von Technik, Organisation und Tätigkeit zur Neuherstellung, Wiederherstellung und Verwertung von*

## 2.2 Produktionssysteme

*nutzbaren Produkten*“. Ein früherer Ansatz besitzt einen engeren Betrachtungsraum auf die industrielle Produktion und definiert diese als „*Erzeugung von Ausbringungsgütern (Produkten) aus materiellen und nichtmateriellen Einsatzgütern (Produktionsfaktoren) nach bestimmten technischen Verfahrensweisen*“ (GÜNTHER UND TEMPELMEIER 2009). DYCKHOFF UND SPENGLER (2010) und BLOHM ET AL. (2008) nutzen eine ähnliche Definition und beschreiben die Produktion als eine Transformation produktiver Faktoren in Produkte, wobei eine qualitative Veränderung der Faktoren erfolgt. Diese Veränderung hat das Ziel einer Nutzenerhöhung und stellt somit einen Wertschöpfungsprozess dar (DYCKHOFF UND SPENGLER 2010), der als Input-Output-Modell (siehe Abbildung 2-2) beschrieben werden kann.

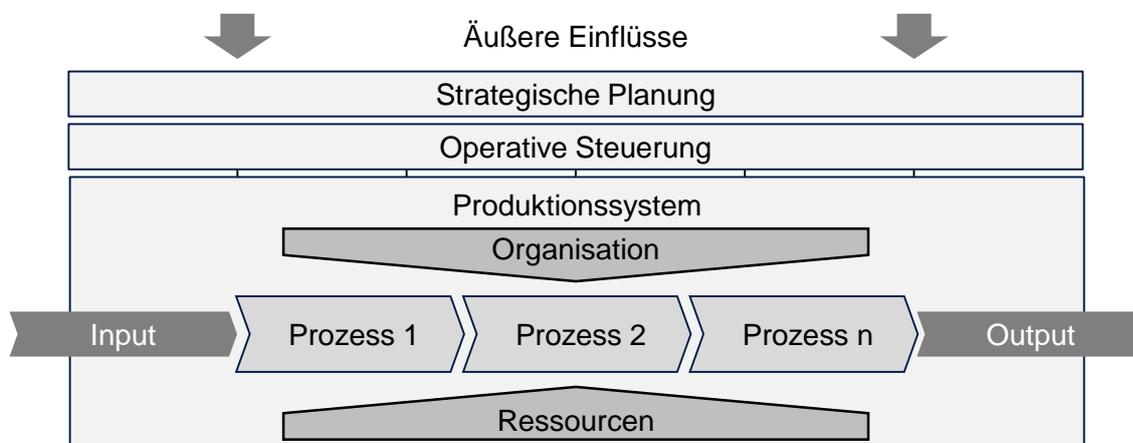


Abbildung 2-2: Grundmodell eines Produktionssystems nach NYHUIS (2010)

Inputfaktoren des dynamischen soziotechnischen Systems (FREITAG 2005) können beispielsweise Material, Energie oder Know-how sein. Durch verschiedene wertschöpfende Prozesse, z. B. die Montage von Bauteilen, und nicht-wertschöpfende Prozesse, z. B. der Transport, findet eine Transformation statt. Den anschließend entstehenden Output stellen u. a. Produkte und Reststoffe dar (NYHUIS ET AL. 2008). Das Input-Output-Modell kann um einige Einflussfaktoren ergänzt werden, wie beispielsweise die strategischen Ausrichtungen des Unternehmens durch das Management. So stellen EVERSHEIM UND SCHUH (1996) fest: „In einem Produktionssystem wird durch die langfristige, strategische Planung und die kurzfristige, operative Planung das Ziel verfolgt, eine Produktionsaufgabe unter flexiblem, kosten- und zeitoptimalem Einsatz der Produktionsfaktoren zu erfüllen.“ Die organisatorischen Rahmenbedingungen der Prozesse sind durch die Aufbau- und die Ablauforganisation gegeben (NYHUIS 2010). Im Weiteren werden für die Erfüllung der Produktionsaufgaben Ressourcen benötigt. Es sind dabei Personal, Betriebsmittel, Gebäude, Kapital und EDV zu unterscheiden (EVERSHEIM UND SCHUH

1996). Betriebsmittel im Speziellen sind die Gesamtheit der „Anlagen, Geräte und Einrichtungen, die zur betrieblichen Leistungserstellung dienen“ (VDI 2815). Bei der Betrachtung des gesamten Grundmodells müssen zusätzlich äußere Einflüsse der Technologie, der Umwelt, der Politik, der Gesellschaft oder der Ökonomie beachtet werden (NYHUIS ET AL. 2008).

### 2.2.2 Unterscheidungsmerkmale

In der Literatur wird eine Vielzahl von Unterscheidungsmerkmalen von Produktionssystemen genannt. Zu den häufigsten Merkmalen zählen der Leistungstyp und der Organisationstyp. Der *Leistungstyp* wird anhand der Häufigkeit differenziert, mit der eine spezielle Produktart in einem definierten Planungszeitraum ohne Unterbrechung produziert wird. Dabei kann eine Einzel-, Serien- und Massenproduktion unterschieden werden. Der *Organisationstyp* kann in Baustellen-, Werkstatt-, Gruppen- und Fließproduktion unterschieden werden und beschreibt die räumliche Struktur eines Produktionssystems anhand der organisatorischen Anordnung der Einheiten (GÜNTHER UND TEMPELMEIER 2009; DYCKHOFF UND SPENGLER 2010). Abbildung 2-3 zeigt die Eignung der Organisationstypen für die unterschiedlichen Leistungstypen der Produktion, je nachdem ob Fertigungs- oder Montageprozesse betrachtet werden.

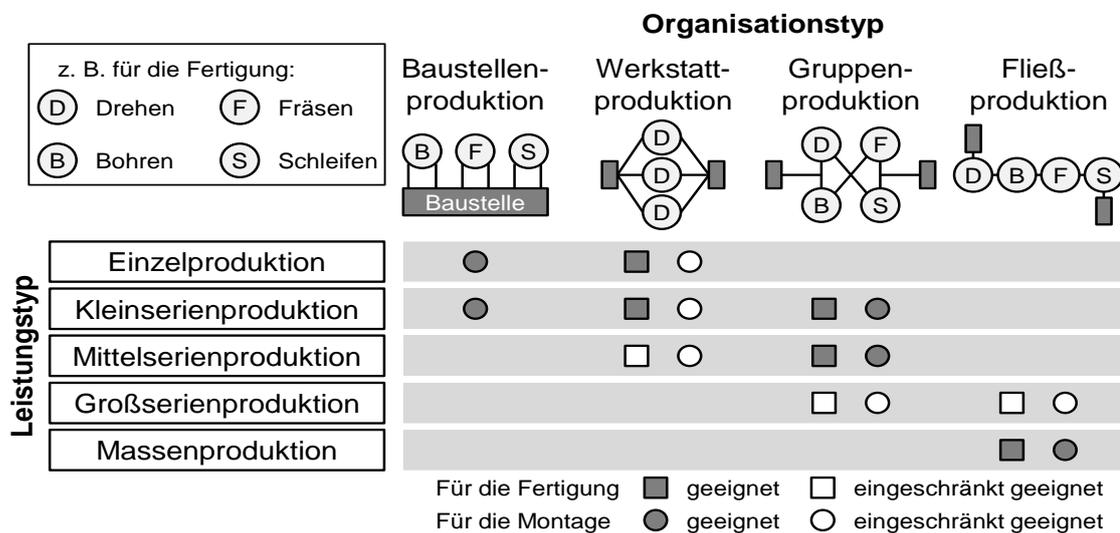


Abbildung 2-3: Produktionsarten und Fertigungs- und Montageprinzipien nach REINHART (2015)

Zusätzlich zu den genannten Merkmalen muss aufgrund der Relevanz für diese Arbeit beachtet werden, dass die im Abschnitt 1.2 beschriebenen Produktionssta-

## 2.2 Produktionssysteme

---

tionen im Material- und Informationsfluss miteinander verbunden sind (WESTKÄMPER UND ZAHN 2009). Bezogen auf den Materialfluss kann diese Verbindung im einfachsten Fall einen ausschließlich seriellen Materialfluss darstellen. Produktionsstationen, Systeme und Segmente können jedoch auf der jeweils nächsthöheren Betrachtungsebene auch parallele Produktionsstationen, Systeme bzw. Segmente aufweisen, da z. B. gleiches Material verschiedene Vorgänge durchlaufen kann. Dies wird als paralleler Materialfluss bezeichnet (ARNOLD 2013).

### 2.2.3 Definition in der vorliegenden Arbeit

Nach der allgemeinen Beschreibung von Produktionssystemen und deren Einordnung bezüglich der Betrachtungsebenen kann abschließend eine für diese Arbeit gültige Definition des Begriffs vorgenommen werden: Ein Produktionssystem besteht aus mindestens zwei Fertigungs- oder Montagestationen, die im Material-, Energie- und Informationsfluss seriell oder seriell-parallel miteinander verknüpft sind. Diese Verknüpfung kann temporär sein, die räumliche Nähe der Produktionsstationen muss jedoch gewährleistet sein. Darüber hinaus können unterstützende Produktionsstationen der Materialfluss- und Verpackungstechnik enthalten sein. Nicht miteingeschlossen sind damit explizit alle Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung, wie z. B. die Druckluftversorgung.

Aufbauend auf der Definition von Produktionssystemen gilt es, diese als Basis für eine strukturierte Analyse zu beschreiben. Dabei haben sich zwei Ansätze der Modellierung durchgesetzt, die nachfolgend erläutert werden.

### 2.2.4 Modellierung

Die Modellierung von Produktionssystemen dient zur Erhöhung der Übersicht sowie der Beherrschung von Komplexität (WESTKÄMPER UND LÖFFLER 2016) und stellt oftmals die Basis für Simulationen dar (FREITAG 2005). Die hierbei verwendeten Elemente unterscheiden sich je nach gewähltem Ansatz.

Im *ersten Ansatz* stellt SCHUH (2006) mit PROPLAN einen Ansatz mit 14 Prozess-elementen vor, die in acht direkte, unmittelbar zur Wertschöpfung eines Auftrags beitragende (z. B. Montage einer Baugruppe) und sechs indirekte, nicht unmittelbar beitragende (z. B. Transport) Prozesselemente unterteilt werden. Jedes Element besitzt jeweils einen Eingang, bis zu drei Ausgänge und zusätzlich existieren Unterbrechungs- und Verzweigungsausgänge. Damit gelingt die Darstellung der Verknüpfung im Information- und Materialfluss. Im *zweiten Ansatz* schlagen

SCHENK ET AL. (2014) vor, das System anhand von Funktionsketten (z. B. Transportieren und Transformieren), Flusssystemen (z. B. Produktfluss und Werkzeugfluss) und Flusssystemelementen (z. B. Speichereinrichtungen und Übergabeeinrichtungen) zu differenzieren.

Die Vorstellung der o. g. Ansätze verdeutlicht deren Fähigkeit, die Grundlage einer strukturierten Analyse von Energieflexibilität zu bilden. Insbesondere ist die Möglichkeit einer systematischen Untersuchung der Risikosituation gegeben. Im Anschluss an die Diskussion der Beschreibung von Produktionssystemen stellt sich vor dem Hintergrund einer energieflexiblen Produktion die Frage nach der Veränderungsfähigkeit der identifizierten Eigenschaften. Aus diesem Grund wird nachfolgend das Konzept der Flexibilität dargestellt.

### 2.2.5 Flexibilität

Um vor dem Hintergrund eines turbulenten Marktumfelds (CISEK ET AL. 2002; ABELE ET AL. 2006; ROGALSKI 2009) wettbewerbsfähig agieren zu können, spielt die Veränderungsfähigkeit von produzierenden Unternehmen als Mittel der Beherrschbarkeit der Einflüsse eine entscheidende Rolle (SCHUH ET AL. 2000; WESTKÄMPER ET AL. 2000). Es lassen sich grundsätzlich die Konzepte der Wandlungsfähigkeit und der Flexibilität unterscheiden.

Im Rahmen der Flexibilität können nur Veränderungen realisiert werden, die innerhalb der Struktur des bisherigen Systems umsetzbar sind (NACHTWEY ET AL. 2009). Dabei sind ausschließlich Veränderungen in einem festgelegten, unveränderlichen Spielraum bzw. Korridor mit definierten Handlungsoptionen zulässig (WIENDAHL UND HERNANDEZ 2002). REINHART UND GRUNWALD (2000) definieren den Begriff Flexibilität in Bezug auf Produktionssysteme als die Fähigkeit, innerhalb einer bestimmten Zeitspanne und innerhalb vorgehaltener Korridore für verschiedene Aufgaben einsatzfähig zu sein.

Im Gegensatz dazu sind wandlungsfähige Systeme nicht explizit begrenzt, da die Korridore sowohl verschiebbar als auch in ihrer Größe veränderbar sind (NYHUIS ET AL. 2008; NACHTWEY ET AL. 2009). Im Rahmen dieser Arbeit wird die Ist-Situation, d. h. die Veränderungsfähigkeit innerhalb eines bestehenden Systems, bewertet, daher gilt es nachfolgend, das Konzept der Flexibilität näher zu untersuchen.

### Flexibilitätsarten

SETHI UND SETHI (1990) unterscheiden in ihrer ausführlichen Literaturanalyse vier Flexibilitätsarten: *Maschinenflexibilität* beschreibt die verschiedenen Operationstypen, die eine Maschine ausführen kann, und die Leichtigkeit des Wechsels zwischen diesen. Im Speziellen bezieht sich der Begriff dabei auf die Produktionsaufgaben, die eine Produktionsstation ohne großen Umrüstaufwand vollziehen kann (GUPTA UND GOYAL 1989; SETHI UND SETHI 1990; WAHAB 2005). Darauf aufbauend beschreibt *Produktflexibilität* auf Systemebene die Fähigkeit, verschiedene Produkte herzustellen bzw. das Produktionssystem schnell und günstig an variierende Produkte anzupassen (GUPTA UND GOYAL 1989; SETHI UND SETHI 1990; AURICH ET AL. 2003;). *Mengenflexibilität* bezeichnet die Fähigkeit eines Produktionssystems, sich schnell an veränderte Produktionsmengen anzupassen und trotz unterschiedlicher Ausbringungsmengen wirtschaftlich zu agieren. Insbesondere bei steigender Nachfrage kann diese Flexibilitätsart von hoher Bedeutung sein (SETHI UND SETHI 1990; ROGALSKI 2009). *Routenflexibilität* besteht dann, wenn eine Produktionsaufgabe an mehreren Produktionsstationen durchgeführt werden kann. Sie bewertet die Fähigkeit eines Produktionssystems, gleiche Produkte auf unterschiedlichen Routen zu produzieren. Dies dient oftmals der Unempfindlichkeit gegenüber Ausfällen und Engpässen (GUPTA UND GOYAL 1989; SETHI UND SETHI 1990).

### Dimensionen von Zuständen

Die im letzten Abschnitt vorgestellten Flexibilitätsarten lassen sich anhand von mehreren Dimensionen beschreiben (SETHI UND SETHI 1990; GUPTA UND SOMERS 1996). SLACK (1983) schlagen dabei drei Dimensionen als Maß an Flexibilität eines Systems vor, die nach GRABL (2015) auch in der Flexibilitätsdefinition von (NYHUIS ET AL. 2008) zu erkennen sind:

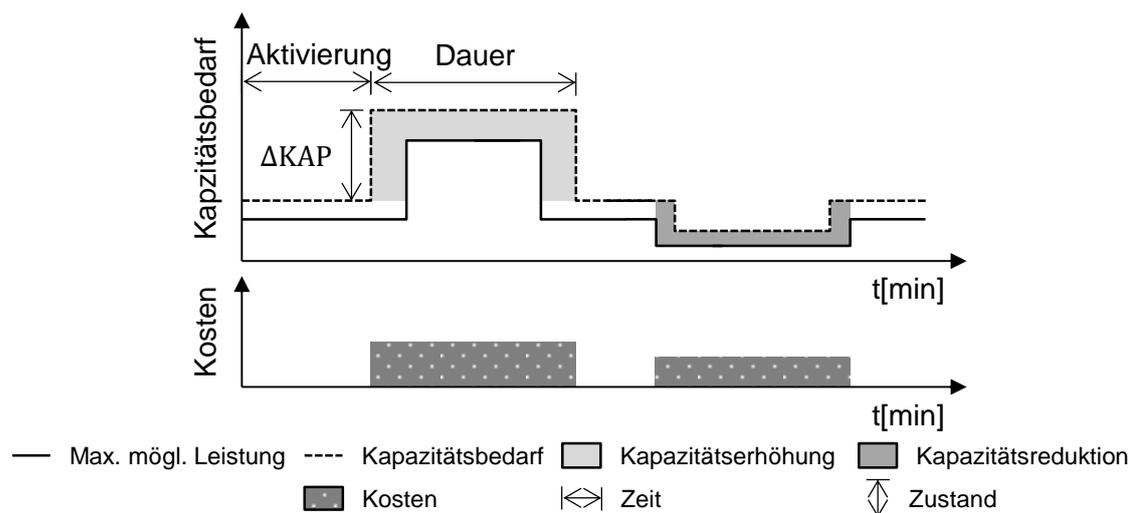
*„Flexibilität beschreibt die Fähigkeit (Zustandsdimension) [...], sich schnell (Zeitdimension) und nur mit sehr geringem finanziellen Aufwand (Kostendimension) an geänderte Einflussfaktoren anzupassen.“*

Da sich die in der Literatur beschriebenen Dimensionen in ihrem jeweiligen Anwendungszweck unterscheiden (GUPTA UND SOMERS 1996) und sich im Regelfall auf die drei genannten Dimensionen zurückführen lassen, werden diese nachfolgend näher erläutert.

Zustände, als augenblickliches Beschaffensein einer Sache, werden häufig zur Charakterisierung von Flexibilität in der Produktion herangezogen (OLHAGER

1993; WATTS ET AL. 1993; UPTON 1994; SWAMIDASS 2000). Dabei beschreibt die Zustandsdimension die Bandbreite an Zuständen, die ein System annehmen kann (SLACK 1983). Die Flexibilität eines Systems steigt hierbei mit der Anzahl möglicher Systemzustände (SHEWCHUK UND MOODIE 1998). Die zeitliche Betrachtung fokussiert die Dauer eines Zustandswechsels und die Zeitspanne der Zustandsänderung. Dabei gilt ein System als umso flexibler, je schneller der Zustandswechsel vollzogen werden kann (SLACK 1983; UPTON 1994). Bei der Kostendimension wird zwischen Kosten (zur Erhaltung von Flexibilität) und Flexibilitätskosten (bei der Umsetzung eines Zustandswechsels zusätzlich entstehenden Kosten) unterschieden (GOTTSCHALK 2007). Je weniger Kosten durch Flexibilität verursacht werden, umso flexibler gilt ein System (SLACK 1983).

Die Zustands-, die Zeit- und die Kostendimension sind in Abbildung 2-4 in Anlehnung an die Illustration von GOTTSCHALK (2007) dargestellt, um Erhöhung bzw. Reduzierung der maximalen Produktionskapazität zu beschreiben.



*Abbildung 2-4: Drei Dimensionen der Flexibilität nach den Parametern zur Beschreibung der Veränderung der Produktionskapazität nach GOTTSCHALK (2007)*

In den letzten Abschnitten wurden mehrheitlich statische Eigenschaften von Produktionssystemen erläutert. Um jedoch einen vollständigen Überblick über die Funktionsweise eines Produktionssystems zu gewinnen, werden nachfolgend die Aufgaben und Ziele der Produktionsplanung und -steuerung dargelegt.

### 2.2.6 Produktionsplanung und -steuerung

Die Produktionsplanung und -steuerung übernimmt in produzierenden Unternehmen die Abwicklung externer und interner Aufträge aus dem Produktionsprogramm (WIENDAHL 2010). Zur Unterscheidung der beiden Begriffe werden in der Literatur häufig verwendete Definitionen herangezogen:

*„Produktionsplanung: Systematisches Suchen und Festlegen von Zielen für die Produktion, Vorbereiten von Produktionsaufgaben und Festlegung des Ablaufes zum Erreichen dieser Ziele.“*

*„Produktionssteuerung: Veranlassen, Überwachen und Sichern der Durchführung von Produktionsaufgaben hinsichtlich Bedarf (Menge und Termin), Qualität und Kosten und Arbeitsbedingungen.“* (WIENDAHL 2010)

Die Hauptfunktionen der Produktionsplanung stellen die Arbeitsvorbereitung, die Auftragsterminierung, die Losgrößenrechnung und die Kapazitätsplanung dar. Daneben liegt der Fokus der Produktionssteuerung auf der Belegungsplanung, der Auftragsfreigabe, der Auftragsüberwachung und der Ressourcenüberwachung (SCHUH UND STICH 2012). Dabei werden unterschiedliche logistische und wirtschaftliche Ziele verfolgt. WIENDAHL (2010) fasst diese in einem aus Logistikleistungen und Logistikkosten bestehenden Zielsystem zusammen. Abbildung 2-5 veranschaulicht diesen Zusammenhang grafisch.

Das Ziel der *Logistikleistung* setzt sich aus einer hohen Liefertreue, bedingt durch die Termintreue, und einer kurzen Lieferzeit, als Folge einer kurzen Durchlaufzeit, zusammen. Die Ziele des Bereichs der *Logistikkosten* lassen sich in die Prozesskosten, bspw. als infolge der Auslastungshöhe und niedrige Bestandskosten, die in Abhängigkeit der Bestandshöhe anfallen, untergliedern. Die vier Zielgrößen stehen vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit des Unternehmens in einem Zielkonflikt, der als Dilemma der Ablaufplanung bezeichnet wird und sich durch den gegenläufigen Charakter von Termintreue, Durchlaufzeit, Auslastung und Bestand ergibt.

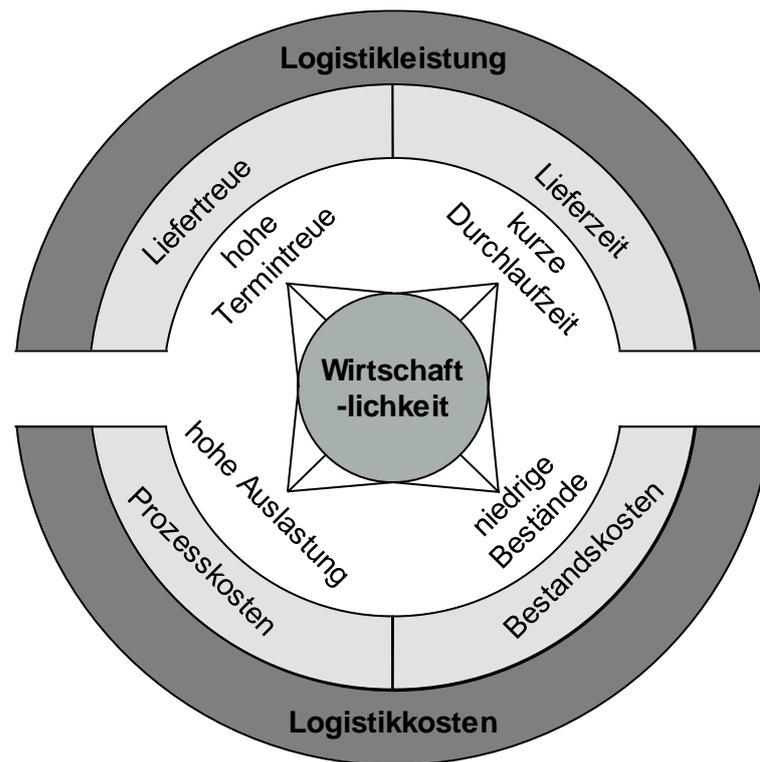


Abbildung 2-5: Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung nach WIEN-DAHL (2010)

Nach der Beschreibung von Produktionssystem sowie deren Planung und Steuerung werden im nachfolgenden Abschnitt die Grundlagen der Risikobetrachtung in der Produktion erläutert. Hierzu wird zunächst der Begriff des Risikos definiert, um im Anschluss Risikokategorien vorzustellen und die Phasen des Risikomanagements und im Speziellen die Risikobewertung zu erläutern.

## 2.3 Risiko in der Produktion

### 2.3.1 Definition

Eine allgemeingültige Definition des Begriffs Risiko<sup>4</sup> ist mit großen Herausforderungen verbunden, da dieser in der Alltagssprache (SHAPIRA 1997) als auch in der Wissenschaft unterschiedliche Bedeutungen aufweist (KUNZE 2007). Eine Ursache hierfür liegt nach (JONEN 2007) in den verschiedenen Anwendungsfeldern, in

<sup>4</sup> Der Begriff *Risiko* leitet sich vom italienischem *risico* ab und wurde von Kaufleuten des 16. Jahrhunderts mit Gefahr bzw. Wagnissen in Verbindung gebracht (BRANDL 2007).

## 2.3 Risiko in der Produktion

---

denen Risiken betrachtet werden, und er folgert weiter, dass es keinen einheitlichen Risikobegriff geben kann, sondern lediglich einen zweckmäßigen.

Die existierenden Definitionen des Begriffs können in drei Ansätze unterteilt werden: ursachenorientiert, wirkungsorientiert (HÖLSCHER 2002) oder eine Kombination beider Ansätze (BRAUN 1984; HÄRTERICH 1987). Der *ursachenorientierte* Begriff bezieht sich auf unvollkommen vorliegende Informationszustände (ZEPP 2009) und ist damit durch die Beschaffenheit der Informationsstruktur zum Zeitpunkt der Entscheidungsfindung charakterisiert (BRAUN 1984). Allgemein können Ursachen als Ereignisse, aus denen Risiken entstehen, beschrieben werden (JONEN 2007). Hierbei müssen die Wahrscheinlichkeiten des Eintretens dieser nicht zwangsläufig objektiv sein, so sind subjektive Einschätzungen oftmals ausreichend, damit die Wahrscheinlichkeiten geschätzt werden können (WINTER 2004).

Die *wirkungsbezogenen* oder auch zielorientierten Begriffe fokussieren die Auswirkungen des Risikos (JONEN 2007) und damit die ökonomische Wirkung (WINTER 2004). Die angestrebten Ziele dienen dabei als Bezugsgröße der Auswirkungen und die Abweichungen davon werden als Risiko definiert (ZEPP 2009). Grundsätzlich sind sowohl positive als auch negative Zielabweichungen möglich (WINTER 2004).

Die Kombination von objektiven und subjektiven Wahrscheinlichkeiten des Informationsdefizits stellt den dritten Ansatz der Begriffsdefinition dar (HÄRTERICH 1987). Nach ZEPP (2009) schließen sich diese nicht gegenseitig aus, sondern ergänzen sich und unterstützen somit eine umfassendere Begriffsdefinition.

Eine für diese Arbeit zweckmäßige und gültige Definition muss vor dem Hintergrund der Bewertung und unter Berücksichtigung von Unternehmenszielen eine zielbezogene Komponente besitzen. Darüber hinaus ist es erstrebenswert, mögliche Ursachen dieser Abweichungen zu betrachten. Aus diesen Gründen wird nachfolgend die für die vorliegende Arbeit gültige Definition von Risiko als Kombination des Informationsdefizits und der Zielverfehlung formuliert:

*Risiko ist ein unerwartetes Ereignis, dessen Eintritt mit objektiven und subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben wird und die daraus resultierenden positiven und negativen Abweichungen von einem festgelegten Erwartungswert.*

Zusätzlich gilt der mathematische Ansatz der DIN 31000, wonach sich ein Risiko aus dem bei Ereigniseintritt zu erwartenden Schadensausmaß und der zu erwartenden Häufigkeit eines gefährdeten Ereignisses ergibt.

### 2.3.2 Ursache-Wirkungskette

Bei der Betrachtung des oben definierten Risikos ergibt sich ein Zusammenhang, der als Ursache-Wirkungskette (siehe Abbildung 2-6) beschrieben wird. Die zunehmende Komplexität von Unternehmen in einer von steigender Dynamik geprägten Unternehmensumwelt, in Verbindung mit modernen Konzepten der Betriebsorganisation, führt zu einer Erhöhung der Komplexität der Ursache-Wirkungsbeziehungen industrieller Risiken (STEINMETZ 2007). Die Kausalität von Risiken stellt demnach ein zentrales Problem der Risikobewertung dar. Ein mögliches Instrument zur Erfassung und Analyse dieser komplexen Ursache-Wirkungszusammenhänge ist die Systemtheorie (ROMEIKE 2004). Die Systembetrachtung verdeutlicht, dass Störprozesse aufgrund der interdependenten Beziehungen nicht nur aus einer Ursache, sondern auch aus einem Zusammenspiel mehrerer Ursachen resultieren können (STEINMETZ 2007). Daher ist eine zu starke Vereinfachung der Ursache-Wirkungszusammenhänge, wie sie in der Praxis oftmals in Form einer mono-kausalen Bewertung von Risiken angewandt wird, zu vermeiden (HÖLSCHER 2002).

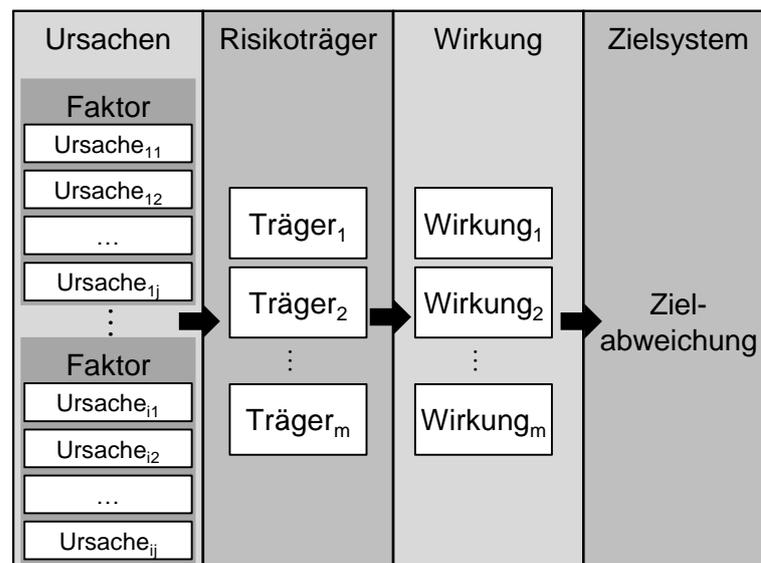


Abbildung 2-6: Ursache-Wirkungskette von Risiken nach STEINMETZ (2007)

Nach WEIG (2008) sind Risikoursachen als primäre Risikoquellen zu verstehen, die auf entsprechende Risikofaktoren transferiert werden können. Die Risikofaktoren (z. B. die fehlerhafte Ausführung einer Tätigkeit) bewirken über sog. Risikoträger ein potenzielles Risikoereignis. Risikoträger stellen i. d. R. Elemente der Produktion (in diesem Beispiel der Mitarbeiter) dar. Potenzielle Risikoereignisse (z. B. ein fehlerhaftes Produkt) beeinflussen letztlich das Zielsystem und führen zu

## 2.3 Risiko in der Produktion

---

einer negativen Abweichung zuvor definierter Ziele (STEINMETZ 2007). In Abbildung 2-6 wird die Beziehung von Ursachen und Wirkungen von Risiken dargestellt.

### 2.3.3 Risikomanagement

Der Risikomanagementprozess ist nach DIN 31000 als „*systematische Anwendung von Managementgrundsätzen, -verfahren und -prozessen zur Kommunikation und Konsultation, zum Erstellen des Zusammenhangs sowie zur Identifikation, Analyse, Bewertung, Bewältigung, Überwachung [...] und Überprüfung von Risiken[...]*“ beschrieben. Die Phase der Erstellung des Zusammenhangs definiert dabei die Parameter, die bei der Festlegung des Geltungsbereichs zu berücksichtigen sind. Laut verschiedener Autoren können die weiteren Phasen oftmals zu einem Zyklus der Identifikation, Bewertung, Steuerung und Überwachung von Risiken zurückgeführt werden (HÖLSCHER 2002; DIEDERICHS 2013; ILLETSCHKO ET AL. 2014; AHRENS-FREUDENBERG 2015; HUTH UND ROMEIKE 2016).

Die *Risikoidentifikation* umfasst die strukturierte und detaillierte Erfassung der im betrachteten System relevanten Risiken. Da in dieser Phase der Abgleich mit verschiedenen Risikokriterien vollzogen wird, stellt sie die Grundlage der *Risikobewertung* dar (HÖLSCHER 2002). Dies beruht auf den Unternehmenszielen, um festzustellen, ob das jeweilige Ausmaß der Risiken akzeptierbar oder tolerierbar ist (DIN 31000). Die Phase der *Risikosteuerung* hat das Ziel, die Risiken entsprechend der Unternehmensstrategie zu beeinflussen. Hierzu müssen geeignete Maßnahmen bestimmt und koordiniert werden (DIEDERICHS 2013).

Die *Risikoüberwachung* überprüft die Richtigkeit der Risikoidentifikation und -bewertung sowie die Effektivität der vorgenommenen Risikosteuerungsmaßnahmen. Bei einer eventuellen Abweichung vom Zielzustand werden Korrekturmaßnahmen veranlasst (GLEIBNER UND AHRENS-FREUDENBERG 2015).

### 2.3.4 Produktionsrisiken

HÄRTERICH (1987) und STEINMETZ (2007) kategorisieren die Risiken in der Produktion in Anlehnung an das allgemeine Input-Output-Modell (siehe Abschnitt 2.2.1). Dabei kann jeder Phase des Modells eine Gruppe von Risiken zugeordnet werden, die als Input-, Kombinations- und Outputrisiken bezeichnet werden. Abbildung 2-7 enthält eine Aufzählung der einzelnen Risiken, welche von den genannten Autoren beschrieben werden.

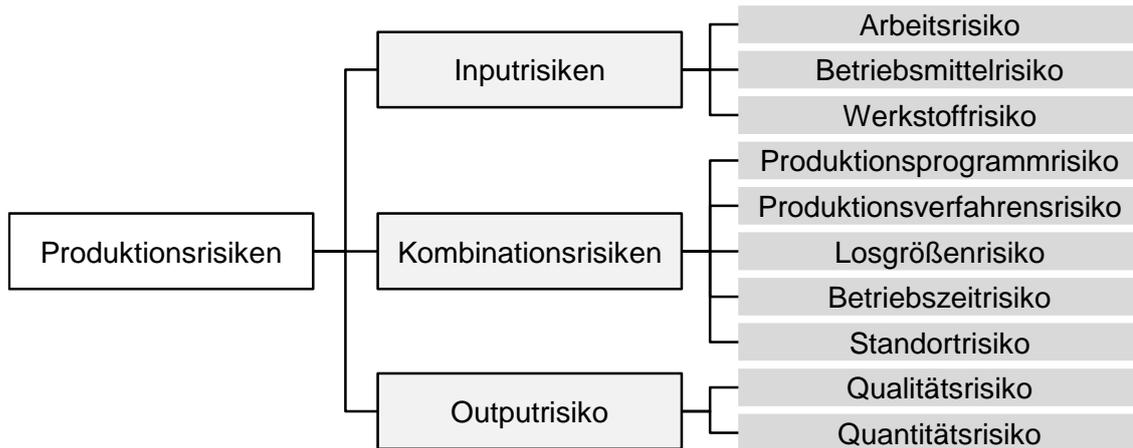


Abbildung 2-7: Produktionsrisiken nach HÄRTERICH (1987), STEINMETZ (2007) und KÖNIG (2008)

### 2.3.5 Kennzahlen der Zuverlässigkeit technischer Komponenten und Systeme

Eine Vielzahl der genannten Produktionsrisiken steht in Zusammenhang mit der Zuverlässigkeit technischer Komponenten und Systeme und ist dabei als „Wahrscheinlichkeit, ein Objekt (Komponente oder System) zu einem bestimmten Zeitpunkt in funktionsfähigem Zustand vorzufinden“ (EBERLIN UND HOCK 2014) definiert. Sie kann wiederum durch die Fehlerrate berechnet werden und stellt die Anzahl der Fehler einer Produktionsstation pro Zeiteinheit dar. Die Betriebsdauer dient als Betrachtungszeitraum für die Berechnung und als Basis der Mean Time To Repair (MTTR), eine Kennzahl, die den Zeitpunkt eines Fehlers in einer Produktionsstation über die Reparaturdauer bis zur Wiederherstellung des funktionsfähigen Zustands angibt (EBERLIN UND HOCK 2014).

### 2.3.6 Methoden der Risikoidentifizierung und -bewertung

Um eine Übersicht zu den Methoden der Risikoidentifizierung und -bewertung geben zu können, muss zunächst aufgrund der Vielzahl der existierenden Ansätze in unterschiedlichen Disziplinen, wie z. B. dem Bankwesen, eine Einschränkung bezüglich der Eignung für den Produktionsbereich nach ROMEIKE UND HAGER (2009) getroffen werden. Alle hierbei genannten Methoden werden nachfolgend erläutert und sind im weiteren Verlauf der Arbeit hinsichtlich deren Eignung für die Risikobewertung von Energieflexibilität zu analysieren.

## 2.3 Risiko in der Produktion

---

Die Ursprünge des nach seinem Erfinder Kaoru Ishikawa benannten *Ishikawa-Diagramms* (auch Fischgräten-Diagramm und Ursache-Wirkungs-Diagramm) liegen im Qualitätsmanagement (STEVEN 2007). Dabei wird zunächst die Problemstellung bzw. die Wirkung definiert, um anschließend die Ursachen zu ermitteln (SYSKA 2006). Bei *Brainstorming* handelt es sich um eine unsystematische Kreativitätsmethode, die auf Intuition und Assoziation basiert (VANINI 2012; GLEIBNER 2011). Ausgehend von einer Störung eines technischen Systems wird bei der *Fehlerbaumanalyse* durch eine Top-Down-Analyse nach möglichen Ursachen für den Ausfall gesucht (DIN 25424; WOLF UND RUNZHEIMER 2009). Die *Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)* ist eine Methode der Prozess- und Systemanalyse, bei der ein technisches System dahingehend untersucht wird, wie es sich beim Ausfall einzelner Komponenten verhält (VANINI 2012). *Simulationsverfahren* sind eine weitere Möglichkeit der quantitativen Risikobewertung, mit welchen zusätzlich parametrische und nicht-parametrische Ansätze gegliedert werden können. Zur Quantifizierung von qualitativen Risiken, wie Imageschäden oder strategischen Risiken, werden in der Literatur sog. *Scoring-Modelle*, beispielsweise Risiko-Punkte-Tafel, vorgeschlagen (SCHNECK 2010).

In den letzten zwei Abschnitten wurden die Grundlagen für die Bewertung von Produktionssystemen im Speziellen unter Betrachtung des Produktionsrisikos gelegt. Im Folgenden werden die Möglichkeiten einer Vermarktung von Nachfrageflexibilität erläutert, um im Anschluss durch eine Symbiose aus den beiden Themengebieten Produktionstechnik und Energiewirtschaft die Grundlagen der Energieflexibilität von produzierenden Unternehmen zu beschreiben.

## 2.4 Vermarktung von Nachfrageflexibilität

### 2.4.1 Begrifflichkeiten

Bei der Betrachtung der Möglichkeiten zur Vermarktung von Nachfrageflexibilität werden die Begriffe *Demand Side Management (DSM)* und *Demand Response* substituierend, aber teilweise auch sehr unterschiedlich verwendet (LOSI ET AL. 2015). Daher erfolgt nachfolgend eine Abgrenzung der beiden Bereiche anhand ihrer Definitionen.

Unter dem Begriff des DSM werden verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung des Energiesystems mithilfe der Anpassung der Höhe oder des zeitlichen Auftretens des Verbrauches zusammengefasst (APPELRATH ET AL. 2012). Diese können u. a. aus dem Bereich der Energieeffizienz stammen, z. B. der Einsatz von energieeffizienteren Lüftungsanlagen. Des Weiteren sind Maßnahmen zur Anpassung des Energieverbrauchs an die Energieerzeugung und umgekehrt inbegriffen. Dabei sind sowohl preis- und anreizbasierte Programme für Verbraucher betrachtet als auch die Anpassung der Stromerzeugung von Kraftwerken auf der Erzeugerseite (PALENSKY UND DIETRICH 2011; LOSI ET AL. 2015). Ein Teilbereich des DSM stellt Demand Response dar (DEPARTEMENT OF ENERGY 2006). FFE (2010) untersuchen verschiedene Definitionen des Begriffs hinsichtlich der einbezogenen Anbieter und Nachfrager, Laständerung, Umsetzung und Anreizsetzung. Auf Basis dieser Analyse definieren sie den Begriff wie folgt:

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

Der Begriff umfasst folglich die Möglichkeiten einer Fabrik, ihre Nachfrageflexibilität zu vermarkten. Daher soll das Themengebiet nachfolgend eingehend beschrieben werden.

### **2.4.2 Instrumente des Demand Response**

Die Instrumente des Demand Response lassen sich grundsätzlich in indirekte zeitbasierte Tarife und direkt anreizbasierte Programme unterteilen. Diese werden nachfolgend beschrieben.

#### **2.4.2.1 Zeitbasierte Tarife**

Mithilfe der zeitbasierten Tarife wird versucht, das Verhalten und damit den Energiebedarf der Verbraucher indirekt durch einen in Abhängigkeit der Zeit variablen Strompreis zu beeinflussen (DEPARTEMENT OF ENERGY 2006). Die größten Vorteile der Tarife liegen aus Sicht des Netzbetreibers in der schnellen Umsetzung und den niedrigen Investitionen, allerdings ist durch die Abhängigkeit zum Verhalten des Endnutzers eine gewisse Unsicherheit gegeben (ZEHIR UND

## 2.4 Vermarktung von Nachfrageflexibilität

---

BAGRIYANIK 2012). Laut DEPARTEMENT OF ENERGY 2006 können dabei grundsätzlich drei Tarife unterschieden werden:

- Time of Use-Tarife (TOU)
- Critical Peak Pricing (CPP)
- Real Time Pricing (RTP)

Die Time of Use-Tarife (TOU) besitzen das Merkmal eines für einen längeren Zeitraum im Voraus fixierten Preisniveaus für bestimmte Zeiträume innerhalb eines Tages (STRBAC 2008). Die Tarife spiegeln dabei die durchschnittlichen Erzeugungskosten bestimmter Perioden wider (DEPARTEMENT OF ENERGY 2006). In Deutschland werden diese durch Hoch- und Niedrigtarife für Unternehmen abgebildet (FfE 2010).

Tarife des Critical Peak Pricing (CPP) sind eine Erweiterung der TOU-Tarife. Dabei werden die Tarife um eine oder mehrere Eventpreisstufen erweitert. Diese treten bei außergewöhnlichen Vorkommnissen mit einer gewissen Vorankündigungszeit von oftmals einem Tag in Kraft (ALBADI UND EL-SAADANY 2008). Die Höhe der Preisstufen sind bereits im Voraus bekannt (FERC 2009).

Beim Real Time Pricing (RTP) werden i. d. R. stündlich schwankende Preisstufen und Gültigkeiten am Vortag bzw. eine Stunde vorab bekannt gegeben. Typischerweise nehmen nur energieintensive Verbraucher am stündlichen Handeln teil (FARUQUI ET AL. 2009). Dabei spiegeln die Preise des RTP die Kosten der Stromerzeugung zu diesem Zeitpunkt wider. Der Tarif verfolgt damit das Ziel der Glättung der Nachfragekurve (ALBADI UND EL-SAADANY 2008).

### 2.4.2.2 Anreizbasierte Programme

Anreizbasierte Programme entlohnen teilnehmende Partner für die Anpassung der Last bzw. bereits für die Kapazitätsvorhaltung im Sinne einer erhöhten Netzstabilität (DEPARTEMENT OF ENERGY 2006). Beispielhaft wird dabei der Regelleistungsmarkt vorgestellt, der wichtigste Markt für Leistungsvorhaltung in Deutschland (FfE 2010).

Unternehmen können eine positive oder negative Regelleistung zur Verfügung stellen, was einer Erhöhung bzw. eine Verringerung der Last entspricht (AICHELE UND DOLESKI 2014). Die Erlöse des Verbrauchers ergeben sich durch den Leistungspreis (€/kW) für die kapazitive Vorhaltung der Flexibilität. Zusätzlich wird die Aktivierung der vorgehaltenen Leistung über einen Arbeitspreis (€/kWh)

vergütet (KLOBASA ET AL. 2013). Es lassen sich die drei nachfolgend beschriebenen Teilmärkte (siehe Abbildung 2-8) unterscheiden, welche die Stabilisierungsinstrumente der Netzbetreiber darstellen (AICHELE UND DOLESKI 2014):

- Primärregelleistung (PRL)
- Sekundärregelleistung (SRL)
- Minutenreserveleistung (MRL)

Die Netz- und Systemregelungen der deutschen Übertragungsnetzbetreiber sind in der Verordnung über den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen (Stromnetzzugangsverordnung – StromNZV § 6) geregelt. Darin ist u. a. die Notwendigkeit einer Präqualifizierung von teilnehmenden Erzeugungsanlagen beschrieben, die einen Testlauf zur Sicherstellung der technischen und zeitlichen Verfügbarkeit der Produktionsstation umfassen (DENA 2010).

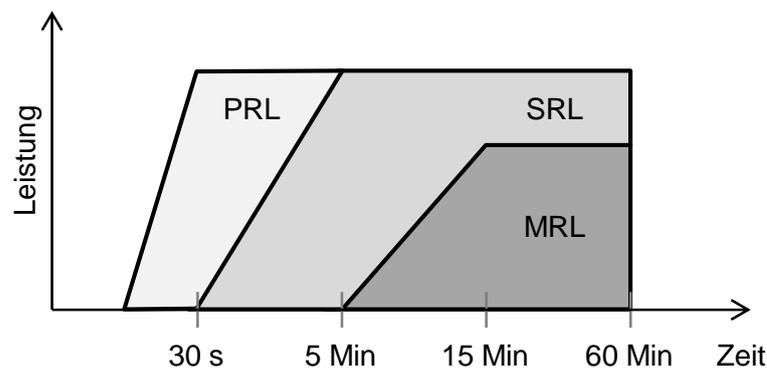


Abbildung 2-8: Verschiedene Arten der Regelleistung im Vergleich nach LEHNHOFF (2010), KAMPER (2010) und SCHÄFERS (2014)

Tabelle 2-1 unterscheidet die Teilmärkte anhand ihrer minimalen Leistungserbringung und der Möglichkeit eines Poolings, d. h. die Bündelung mehrerer kleiner Produktionsstationen, die jede für sich diese Mindestgröße nicht erreichen (SERVATIUS ET AL. 2012). Des Weiteren sind verschiedene zeitliche Eigenschaften und die Art der Vergütung zu unterscheiden.

## 2.4 Vermarktung von Nachfrageflexibilität

Tabelle 2-1: Vergleich der verschiedenen Regelleistungsarten

	PRL	SRL	MRL
Minimaler Leistungsblock	1 MW	5 MW (Pooling möglich)	5 MW (Pooling möglich)
Aktivierungszeit bis $P_{\max}$	30 s	5 min	15 min
Zuzusichernde Abgabezeit	15 min	4 h	4 h
Ausschreibungszeitraum	1 Woche	1 Woche	1 Tag
Ausschreibungshäufigkeit	Wöchentlich	Wöchentlich	Täglich
Vergütung	Leistung	Leistung + Arbeit	Leistung + Arbeit

Nach der Beschreibung der Möglichkeiten einer Vermarktung von Nachfrageflexibilität in diesem Abschnitt wird nachfolgend die Symbiose der Felder der Produktionstechnik und der Energiewirtschaft zum Themengebiet der Energieflexibilität vollzogen.

## 2.5 Energieflexibilität

### 2.5.1 Definition und Potenzialbegriffe

Der Begriff Energieflexibilität ist erstmals von REINHART ET AL. (2012) wie folgt definiert worden:

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

Darauf aufbauend beschäftigt sich eine Vielzahl von Studien mit der Erfassung von Energieflexibilitätspotenzialen (LANGROCK ET AL. 2016). Dabei sind unterschiedliche Begriffe teilweise mit ähnlicher Bedeutung belegt und unterschiedliche Bedeutungen den gleichen Begriffen zugeordnet. DUFTER ET AL. (2017) stellen aus diesem Grund eine Meta-Studie zur Definition von einheitlichen Potenzialbegriffen vor. Die qualitative Abgrenzung der Begriffe ist in Abbildung 2-9 dargestellt und nachfolgend beschrieben.

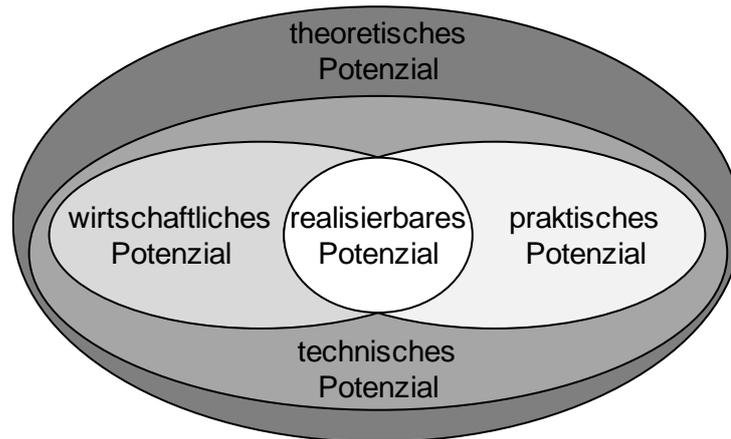


Abbildung 2-9: Qualitative Abgrenzung der Potenzialbegriffe von Energieflexibilität nach DUFTER ET AL. (2017)

Grundsätzlich steht die installierte Leistung eines Betrachtungsbereichs der Produktion zur Lastveränderung zur Verfügung. Da dieses Potenzial aus sicherheits- und anlagenrelevanten Restriktionen in seltenen Fällen gänzlich abzurufen ist, wird es als *theoretisches Potenzial* bezeichnet. Die neben den genannten Ausnahmen weiter zur Verfügung stehende Last stellt das *technische Potenzial* dar. Wenn der Erlös der Vermarktung der Flexibilität höher ist als die dadurch zusätzlich entstandenen Kosten, wird es als *wirtschaftliches Potenzial* definiert. In Abhängigkeit der in Abschnitt 2.2.5 beschriebenen Flexibilität von Produktionssystemen und der Entwicklung der Vermarktungsmöglichkeiten (Abschnitt 2.4) kann dieses Potenzial über die Zeit erheblich variieren. Um unternehmensinterne regulatorische und administrative Hemmnisse zu berücksichtigen, kann ein *praktisches Potenzial* als weitere Teilmenge des technischen Potenzials eingeführt werden. Die Schnittmenge des wirtschaftlichen und praktischen Potenzials ergibt das *realisierbare Potenzial* und ist damit „das Potenzial, das betriebswirtschaftlich sinnvoll von Unternehmen genutzt und gleichzeitig auch von den Unternehmen selbst für Flexibilisierungen freigegeben werden kann“ (DUFTER ET AL. 2017).

### 2.5.2 Grundsätzliche Lastmanagementstrategien

Eine Laständerung erfolgt durch die geplante Abweichung des tatsächlichen Lastgangs gegenüber einer Last im Referenzbetrieb. Welche Abweichungen dabei berücksichtigt werden, wird in verschiedenen Studien unterschiedlich definiert (FFE 2010). Eine häufig verwendete Definition und für diese Arbeit sinnvoll erscheinende Einteilung findet sich in den U.S.A. (DEPARTEMENT OF ENERGY 2006).

## 2.5 Energieflexibilität

Diese international verbreitete Ansicht sieht grundsätzlich drei Möglichkeiten für Unternehmen vor, ihre Last zu ändern (siehe Abbildung 2-10).

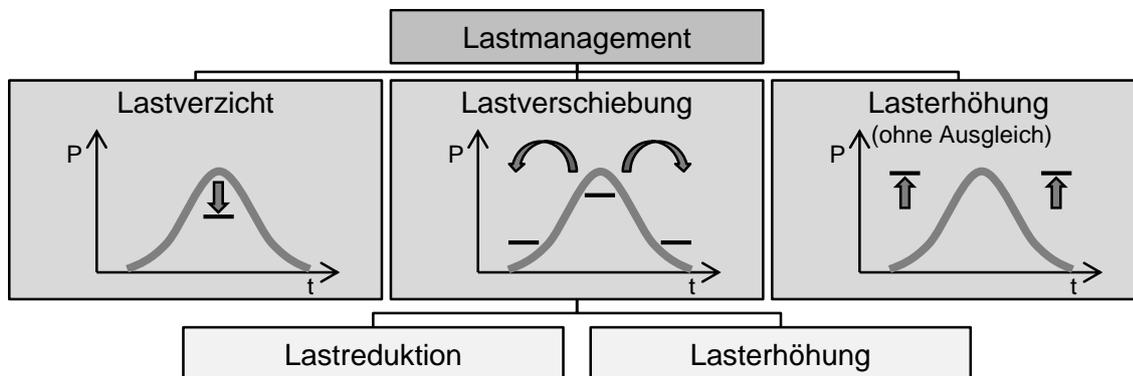


Abbildung 2-10: Grundsätzliche Lastmanagementstrategien in Anlehnung an LANGROCK ET AL. (2016)

Ein Lastverzicht stellt eine temporäre Reduktion des Stromverbrauchs im Vergleich zu einem regulären Stromverbrauch dar und kann dabei z. B. durch die Teil- oder Vollabschaltung einer Produktionsstation vonstattengehen, während eine Lasterhöhung durch eine Erhöhung der Leistungsaufnahme im Vergleich zum Referenzbetrieb erfolgt (LANGROCK ET AL. 2015). Ist ein Nachholbedarf dieser Reduzierung oder Erhöhung von Nöten, so ist dies mit einer Lastverschiebung verbunden, da auf jede Lastreduzierung eine Lasterhöhung folgt und umgekehrt (LANGROCK ET AL. 2016).

## 2.6 Zusammenfassung

In dem vorliegenden Kapitel 2 wurden die wesentlichen Grundlagen im Hinblick auf die Bewertung von Energieflexibilität von Produktionssystemen erläutert sowie wichtige Begrifflichkeiten definiert. In Anbetracht der in Kapitel 1.3 beschriebenen Zielsetzung der Arbeit erfolgte in diesem Rahmen eine Einschränkung auf die im Materialfluss verknüpften Produktionsstationen und eine explizite Abgrenzung der technischen Gebäudeausrüstung.

Die Eigenschaften der Produktion wurden vorgestellt und die Ebenen eines Produktionsbetriebs beschrieben, um darauf aufbauend eine für diese Arbeit gültige Definition für Produktionssysteme zu geben. Vertiefend wurde dabei auf das Risikomanagement in der Produktion eingegangen sowie dessen Methoden vorgestellt.

Anhand der Vorstellung verschiedener Vermarktungsmöglichkeiten von Nachfrageflexibilität gelingt im Anschluss die Symbiose der Felder der Produktionstechnik und der Energiewirtschaft zum Themengebiet der Energieflexibilität. Hierbei wurden Begriffe zur Bestimmung von Potenzialen sowie generelle zur Verfügung stehende Laständerungsmöglichkeiten vorgestellt. Darauf aufbauend erfolgt in Kapitel 3 die Untersuchung des in diesem Zusammenhang relevanten Standes der Forschung und der Technik.



## 3 Stand der Forschung und Handlungsbedarf

### 3.1 Übersicht

Kapitel 3 beschreibt den relevanten Stand der Forschung hinsichtlich der im Abschnitt 1.3 vorgestellten Zielsetzung der vorliegenden Arbeit und baut auf den in Kapitel 2 eingeführten Grundlagen auf. Hierzu werden in Abschnitt 3.2 Verfahren und Ansätze nach einem möglichen Vorgehen zur Einführung eines energieflexiblen Verhaltens in der Produktion in die Identifikation, die Bewertung und die Umsetzung von Energieflexibilität gegliedert<sup>5</sup>.

Aufgrund der in Abschnitt 1.2 erwähnten Risiken der Energieflexibilität stehen in Abschnitt 3.3 Forschungsarbeiten im Bereich von Risiken der Produktion im Fokus. In diesem Zusammenhang wird in Anlehnung an den vorherigen Abschnitt die in Abbildung 3-1 dargestellte Einteilung für die Identifizierung und Bewertung von Risiken in der Produktion gewählt<sup>5</sup>. Die dabei vorgestellten Methoden sind eine wesentliche Basis der Methodik zur risikoorientierten Bewertung von Energieflexibilität von Produktionssystemen. Daher erfolgt nach der Beurteilung der Relevanz der vorgestellten Forschungsarbeiten am Ende jeden Abschnitts in Abschnitt 3.4 die Ableitung des Handlungsbedarfs.

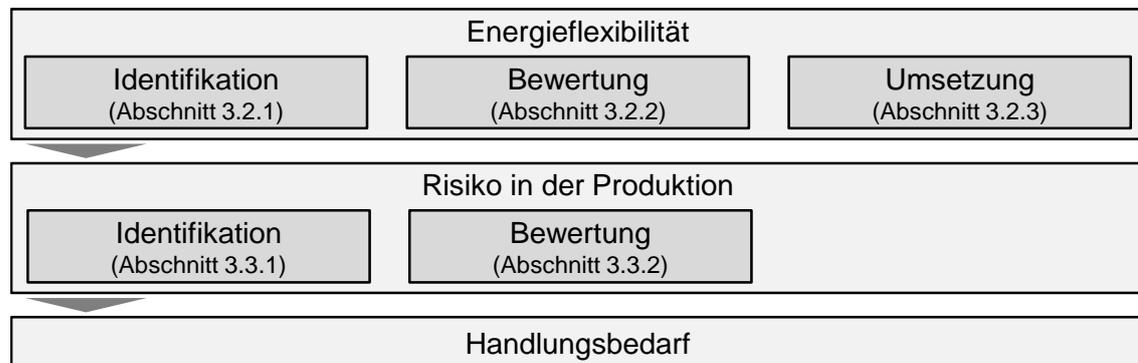


Abbildung 3-1: Übersicht zum Aufbau des Stands der Forschung in der vorliegenden Arbeit

<sup>5</sup> Einige Arbeiten können nicht exklusiv einem Bereich zugeordnet werden und sind daher teilweise mehrfach mit ihren jeweiligen Ansätzen gewürdigt. Diese Gliederung wird dennoch gewählt, um einen didaktisch sinnvollen Aufbau des jeweiligen Abschnitts zu gewährleisten.

## **3.2 Identifikation und Bewertung von Energieflexibilität im Kontext der Produktionsplanung und -steuerung**

---

### **3.2 Identifikation und Bewertung von Energieflexibilität im Kontext der Produktionsplanung und -steuerung**

#### **3.2.1 Identifikation relevanter Verbraucher und deren Zustände**

Da produzierende Unternehmen i. d. R. nicht den Stromverbrauch eines vollständigen Produktionssystems im Rahmen der Lastflexibilisierung verschieben und es aus ökonomischer Sichtweise wenig rentabel ist, Kleinstverbraucher bezüglich einer Laständerung zu betrachten, ist es notwendig, relevante Verbraucher zu identifizieren und zu charakterisieren.

GRABL (2015) schlägt in seiner Methode zur Bewertung von Energieflexibilität in der Produktion im ersten Schritt seiner Vorgehensweise eine Fokussierung auf die relevanten Produktionsstationen vor. Anhand der zwei Faktoren Energie- und Leistungsbedarf einer Produktionsstation spannt er eine Matrix auf, in die die Produktionsstationen eingeordnet werden. Im Anschluss werden diejenigen mit einem hohen Energie- bzw. Leistungsbedarf zur detaillierten Betrachtung empfohlen (Reinhart et al. 2014). Im Weiteren verweisen viele Arbeiten auf die Notwendigkeit der Identifikation von Zuständen der entsprechenden Produktionsstationen (MOUZON ET AL. 2007; DIETMAIR UND VERL 2008; HAAG 2013; GRABL ET AL. 2014; RACKOW ET AL. 2015). Daher werden nachfolgend zustandsbasierte Ansätze vorgestellt.

LIEBL UND ZÄH (2014) entwickeln ein Simulationsmodell zur Energiebedarfsprognose von Produktionsstationen. LIEBL ET AL. (2015B) greifen dieses auf und spezifizieren die Anforderungen für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) an ein solches System. Dabei wird auf die Notwendigkeit von Messungen der Leistungsaufnahme hingewiesen. Abbildung 3-2 zeigt die Gesamtleistungsaufnahme einer Spritzgussanlage. Es werden die grundsätzlichen Zustände „Aus“, Standby-Betrieb“ und „Produktivbetrieb“ identifiziert und letzterer erneut bezüglich der durchschnittlichen Leistungsaufnahme der Anlage bei Herstellung einzelner Bauteile unterteilt. Hierbei könnte die Feststellung einer hohen Differenz zwischen zwei Zuständen einer Anlage auf ein hohes Energieflexibilitätspotenzial hinweisen (LIEBL UND ZÄH 2014). Ein ähnliches Vorgehen findet sich auch in weiteren Untersuchungen zur Lastverschiebung (DIETMAIR UND VERL 2008; HAAG 2013; GRABL 2015) und zur Energieeffizienz (JUNGE 2007; WEINERT 2010).

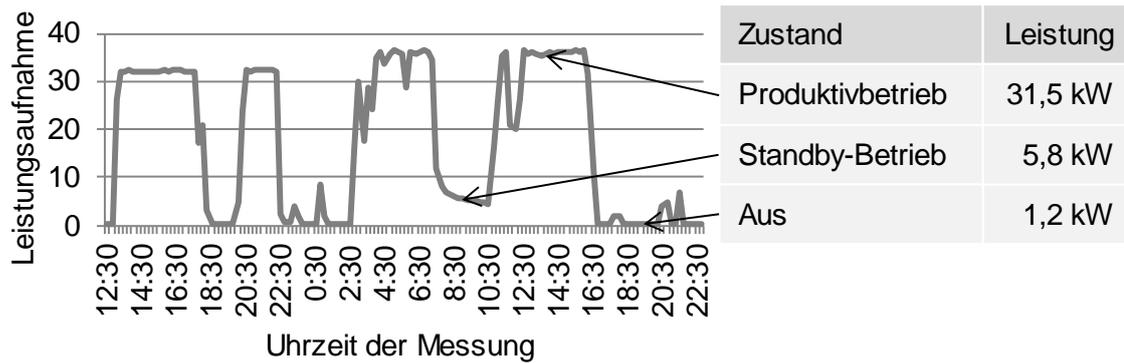


Abbildung 3-2: Zustandsanalyse einer Spritzgussanlage nach LIEBL UND ZÄH (2014)

Zur detaillierten Untersuchung der Zustandswechsel schlagen LIEBL ET AL. (2015A) die Kategorisierung von technischer und organisatorischer Energieflexibilität vor. Technische Energieflexibilität beeinflusst den anlagen- und produktionspezifischen Lastgang direkt. Organisatorische Energieflexibilität umfasst dagegen die planerischen Möglichkeiten, den Energiebedarf zu verändern, und wirkt damit indirekt (LIEBL ET AL. 2015A; BEIER ET AL. 2017). Im Anschluss werden die von GRABL UND REINHART (2014) vorgeschlagenen Energieflexibilitätsmaßnahmen (EFM), mit denen es zur einer Änderung des Energiebedarfs einer Fabrik kommen kann, jeweils in eine technische und organisatorische Kategorie unterteilt und deren Machbarkeit anhand einer Laserschneidanlage und eines Reflow-Ofens untersucht. Tabelle 3-1 zeigt eine Übersicht der zur Verfügung stehenden EFM-Arten.

Das Ergebnis der Identifikation von Energieflexibilität stellt damit die o. g. EFM dar. GRABL (2015) definiert diese wie folgt:

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

Die in den vorgestellten Arbeiten beschriebenen Methoden zur initialen Identifizierung von Energieflexibilität stellen die Grundlage der Bewertung von Energieflexibilität auf allen Betrachtungsebenen (siehe Abbildung 1-3) und damit auch des Produktionssystems dar. Gleichzeitig ist festzustellen, dass die Arbeiten aufgrund des Fokus auf zustandsbasierte Ansätze verstärkt einzelne Anlagen betrachten. Die Beschreibung eines übergeordneten Vorgehens für die Betrachtung mehrerer Anlagen inklusive einer Reihenfolgenbildung bleibt aus. Dies ist jedoch für den Anwender einer Methodik zur Bewertung auf höherer Betrachtungsebene un-

### 3.2 Identifikation und Bewertung von Energieflexibilität im Kontext der Produktionsplanung und -steuerung

erlässlich, da sich der Aufwand durch eine solche Priorisierung erheblich reduzieren lässt. Im Weiteren finden sich in der Literatur einige Ansätze zur Bewertung von EFM, die nachfolgend beschrieben werden.

Tabelle 3-1: *Energieflexibilitätsmaßnahmen zur Änderung des Energiebedarfs einer Fabrik nach GRAßL (2015)*

EFM	Beschreibung
 Mittelfristige Anpassung von Prozessstarts	Beschreibt das vorzeitige oder verzögerte Beginnen von Prozessen innerhalb mittelfristiger Zeiträume.
 Kurzfristige Anpassung von Prozessstarts	Beschreibt das vorzeitige oder verzögerte Beginnen von Prozessen innerhalb kürzerer Zeiträume.
 Anpassung der Maschinenbelegung	Beschreibt die Veränderung der Zuordnung eines Produktes zu den zur Herstellung des Produktes genutzten Produktionsstationen.
 Anpassung der Auftragsreihenfolge	Beschreibt die Veränderung der Bearbeitungsreihenfolge von unterschiedlichen Produkten.
 Anpassung von Pausenzeiten	Beschreibt das kurzfristige Verschieben der Pausenzeiten von Mitarbeitern.
 Anpassung von Schichtzeiten	Beschreibt das Verschieben der Produktionszeiten.
 Unterbrechung von Prozessen	Beschreibt das zeitweise Stoppen eines Prozesses sowie das Fortsetzen des Prozesses nach einer gewissen Zeitdauer.
 Anpassung von Prozessparametern	Beschreibt die Herstellung eines Produktes durch eine Produktionsstation mit gegenüber dem Regelprozess veränderten Prozessparametern.
 Speicherung von Energie	Beschreibt die bewusste Speicherung von Energie in einem geeigneten Speichermedium.
 Wechsel der Energiequelle	Beschreibt die Nutzung unterschiedlicher Energieträger zur Leistungserbringung eines Prozesses.

#### 3.2.2 Bewertung von Energieflexibilitätsmaßnahmen

UNTERBERGER ET AL. (2017) beschreiben in ihrer auf dem System Engineering-Ansatz basierenden Methode zur Gestaltung energieflexibler Produktionssysteme eine Vorgehensweise ihrer Modellierung, mit dem Ziel einer Integration von Energieflexibilität in der Planungsphase. Der Fokus liegt dabei auf der Herleitung und

Beschreibung von Maßnahmen zur Steigerung von Energieflexibilität durch investigative Eingriffe, wie bspw. durch die Änderung der zur Verfügung stehenden Betriebsmittel. UNTERBERGER ET AL. (2018) greifen diesen Ansatz auf und beschreiben die notwendigen Designprinzipien zur Erhöhung von Energieflexibilität in der Planungsphase.

KABELITZ UND STRECKFUß (2014A) stellen einen analytischen Ansatz zur Bewertung der Energieflexibilität von Produktionssystemen vor. Dieser basiert auf der produktionstheoretischen Annahme, dass der Verbrauch der Produktionsfaktoren zum einen von der Leistungsintensität und zum anderen von den technischen Eigenschaften der Betriebsmittel abhängt (BERNDT UND CANSIER 2007; FANDEL 2010). Daraus wird eine Verbrauchsfunktion von Energie abgeleitet, die mithilfe der zweimaligen Ableitung nach der Zeit die Frage beantworten kann, ob es lohnenswert ist, die Leistungsintensität des Betrachtungsraums anzupassen. In der Literatur wird der theoretische Ansatz gewürdigt, allerdings steht der Beweis durch eine praktische Umsetzung noch aus (LIEBL ET AL. 2015A). KABELITZ UND STRECKFUß (2014B) identifizieren die energierelevanten Dimensionen der Fertigungsflexibilität anhand der Analyse der Maschinen-, Prozess-, Volumen- und Routenflexibilität. Dabei werden jedoch keine konkreten Vorgehen zur technischen und organisatorischen Bewertung von Energieflexibilität und auch keine Ansätze einer möglichen wirtschaftlichen Betrachtung aufgezeigt. In weiteren Veröffentlichungen sind die beiden Ansätze (KABELITZ UND STRECKFUß 2014A, 2014B) als Basis für die Umsetzung in der Planung und Steuerung genannt.

GRABL (2015) legt in seiner Bewertungsmethode den Fokus auf die Produktionsebene. Durch die zusätzliche Wahl eines maßnahmenbasierten Ansatzes (siehe Abschnitt 3.2) gelingt ihm die Entwicklung einer anwendungsnahen Vorgehensweise. Der Autor leitet zunächst aus verschiedenen Flexibilitätsarten der Produktion von Slack (1983) (siehe Abschnitt 2.2.5) sechs Energieflexibilitätsaxiome (siehe Tabelle 3-2) her. Auf deren Basis dieser werden im Anschluss die relevanten Größen zur Bewertung der EFM vorgestellt. Hierbei werden die Leistungsdivergenz der betroffenen Zustände, die Kosten einer EFM, die Verfügbarkeit einer Produktionsstation und vier weitere zeitliche Eigenschaften, genannt (GRABL UND REINHART 2014).

Bezüglich einer Erlösberechnung der EFM unterscheidet GRABL (2015) die Berücksichtigung der in Abschnitt 2.4.2 vorgestellten Instrumente des Demand Response. Bei der Berechnung der Kosteneinsparungsmöglichkeiten im Rahmen

### 3.2 Identifikation und Bewertung von Energieflexibilität im Kontext der Produktionsplanung und -steuerung

---

der Nutzung zeitbasierter Tarife werden die Abweichungen vom jeweiligen mittleren Strompreis in einem Betrachtungszeitraum unter Berücksichtigung der Schwankungsbreite und -dauer der Strompreise sowie der Renditeforderung des Unternehmens betrachtet. Im Gegensatz dazu wird bei der Berechnung der Kosteneinsparungsmöglichkeiten anreizbasierter Programme nicht die Abweichung von einem Durchschnittsstrompreisniveau herangezogen, sondern die Vergütungen für das Anpassen und Vorhalten von Leistungsänderungen. Diese werden anhand der durchschnittlichen Höhe des Arbeits- und Leistungspreises berechnet. Im Anschluss werden unter Berücksichtigung der genannten Größen die einzelnen EFM einer Produktionsstation zu einer Kennzahl zur Bewertung der Energieflexibilität einer gesamten Produktionsstation aggregiert (REINHART ET AL. 2014).

*Tabelle 3-2: Sechs Energieflexibilitätsaxiome nach GRAßL (2015)*

Nr.	Energieflexibilitätsaxiome
1	Je größer/geringer die Anzahl der Zielzustände eines Systems ist, desto flexibler/unflexibler ist es.
2	Je gleichmäßiger/ungleichmäßiger die Verteilung der Zielzustände eines Systems ist, desto flexibler/unflexibler ist es.
3	Je schneller/langsamer ein Wechsel zwischen den Zuständen eines Systems durchgeführt werden kann, desto flexibler/unflexibler ist es.
4	Je kürzer/länger die minimale Verweildauer der Zustände eines Systems ist, desto flexibler/unflexibler ist es.
5	Je länger/kürzer die maximale Verweildauer der Zustände eines Systems ist, desto flexibler/unflexibler ist es.
6	Je günstiger/teurer ein Wechsel zwischen den Zuständen eines Systems ist, desto flexibler/unflexibler ist es.

Bezüglich eines Standards zur Bewertung von Flexibilität stellt GRAßL (2015) bei der Betrachtung eines Klassifizierungsschemas einer Literaturanalyse von TONI UND TONCHIA (1998) fest, dass dieses in der Literatur nicht vorhanden ist. Vielmehr wird für jede neue Bewertungsaufgabe ein neues Bewertungsverfahren entwickelt. Daher wird hier auf die Darstellung unterschiedlicher Verfahren verzichtet.

Im letzten Abschnitt sind die Inhalte der Arbeiten zur Bewertung von Energieflexibilität beschrieben. Dabei werden Vorgehen zur Bewertung und Steigerung der Energieflexibilität in der Planungsphase vorgestellt. Ein strukturiertes Vorgehen zur IST-Situationsanalyse bleibt allerdings aus. Andere Ansätze widmen sich

ebenfalls diesem Bereich. Jedoch ist, wie bereits bei der Beurteilung der Ansätze zur Identifikation, hierbei ebenfalls eine Tendenz zur Betrachtung einzelner Anlagen festzustellen. Da allerdings in den meisten Fällen starke Verknüpfungen zwischen diesen existieren, muss ein Bewertungsansatz auf Produktionssystemebene die Zusammenhänge berücksichtigen. Insbesondere sind dabei Wechselwirkungen, die von der Durchführung einzelner EFM ausgehen, zu integrieren.

### 3.2.3 Umsetzung

Neben den Untersuchungen zur Identifizierung und Bewertung von Energieflexibilität finden sich in der Literatur einige Ansätze zur Umsetzung der Energieflexibilitätspotenziale in der PPS. Zur Vorstellung der Arbeiten werden nachfolgend die Werke beschrieben, die sich verstärkt mit der Produktionsplanung beschäftigen. Im Anschluss werden die der Produktionssteuerung untersucht.

#### **Produktionsplanung**

BONNESCHKY (2002) stellt unter Einsatz der sog. UPN-Modellierung (SCHIEFER-DECKER 2006) einen Ansatz zur Integration energiewirtschaftlicher Aspekte in PPS-Systemen vor. Hierbei wird der Produktionsstandort anhand von Umwandlungsanlagen (U), Produktionsanlagen (P) und Nebenanlagen (N) kategorisiert sowie mithilfe von Energiekennzahlen beschrieben. Neben einer erhöhten Energieeffizienz wird dabei das Ziel verfolgt, während der Produktionsbedarfsplanung die nötigen Energiemengen zu ermitteln und die Energiedisposition zu planen.

Im Zuge des durch das BMBF geförderten Projekts „Entwicklung energetischer Planungsalgorithmen für Enterprise-Resource-Planning-Systeme (ERP-Systeme) (EnPlan)“ werden die Energiebedarfe der Fertigungsprozesse durch ein auf einem ERP-System basierendes, intelligentes Energiemanagementsystem geplant, erfasst und überwacht. Hierzu werden energetische Planungsalgorithmen zur Durchlaufterminierung, Kapazitätsabstimmung und Ressourcenbelegungsplanung entwickelt. Der Fokus liegt dabei auf Aspekten der Produktionsplanung und -steuerung für die metallverarbeitende Industrie (GOLDHAHN ET AL. 2012).

HERRMANN (2013) entwickelt einen Methodenbaukasten zur Ermittlung von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung bezüglich des Energie- und Hilfsstoffverbrauchs sowie auf Produktionsziele (siehe Abschnitt 2.2.6). Dabei werden die drei Methodenbausteine der Energie- und Hilfsstoffmessung, des energiebewussten ERP sowie die Visualisierung und Bewertung von Energie- und Stoffströmen vorgestellt.

### **3.2 Identifikation und Bewertung von Energieflexibilität im Kontext der Produktionsplanung und -steuerung**

---

PUTZ ET AL. (2015) stellen eine Methode zur Integration der Herausforderungen erneuerbarer Energien in die Aufgaben der PPS vor. Hierzu werden von den Autoren Material-, Energie-, Personal- und Informationsfluss als zentrale Elemente eines Produktionssystems dargestellt, welche die drei Ebenen der Energieversorgung, der Produktion und der TGA miteinander verbinden. Die Zielvorgaben der einzelnen Elemente können z. B. bezgl. einer termingerechten Auftragsabwicklung voneinander abweichen, weshalb sie bei der Lösung der PPS-Aufgaben zu berücksichtigen sind.

JUNGE (2007) verfolgt die simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Hierfür werden Maßnahmen definiert, mit denen der Energiebedarf zeitlich variiert werden kann. Der Autor erläutert jedoch keine Kosten, die im Zusammenhang mit den Maßnahmen entstehen. Zur Validierung werden verschiedene Anwendungsszenarien in einem Simulationsmodell von parallelen Spritzgussmaschinen vorgestellt.

Die entwickelten Methoden von RAGER (2008) umfassen eine energieorientierte Maschinenbelegungsplanung mit identischen parallelen Maschinen. Die Arbeit geht dabei sowohl auf die Klassifikation und Formulierung eines Entscheidungsmodells sowie auf die Evaluation anhand eines Produktionssystems aus dem Bereich der Textilveredelung ein. Der Fokus liegt jedoch auf der Vermeidung von Lastspitzen zur Senkung von Energiekosten. Später erweitern RAGER ET AL. (2015) den Ansatz um eine Berücksichtigung des schwankenden Energieangebots bzw. der volatilen Energiepreise.

(PECHMANN UND SCHÖLER 2011; PECHMANN ET AL. 2012A; PECHMANN ET AL. 2012B; ICHOUA UND PECHMANN 2013) stellen Energiekennzahlen für ein PPS-System auf und nennen Maßnahmen, mithilfe derer die Maschinenbelegung angepasst werden kann. Die zustandsbasiert abgeleiteten Maßnahmen, wie z. B. die Verschiebung von Auftragsstartzeiten, werden eingesetzt, um sich an schwankende Energiepreise anzupassen und damit die Energiekosten für produzierende Unternehmen zu reduzieren.

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderte Projekt „Energiekostenorientierte Belegungsplanung“ (EnKoBel) beschäftigt sich mit der Anpassung der Maschinenbelegungsplanung an schwankende Energiepreise. Hierbei wird die Termintreue hoch priorisiert und die Energiekosten sowie weitere logistische Zielgrößen berücksichtigt (BÖNING 2013; BÖNING ET AL.

2013). BÖNING ET AL. (2017) stellen einen memetischen Algorithmus vor, der zusätzliche Reparaturverfahren anwendet, um im evolutionären Prozess entstandene Unzulässigkeiten zu beheben.

In ihrem Ansatz zur Optimierung der PPS mit besonderem Augenmerk auf die Volatilität von Energiepreisen berücksichtigen EMEC ET AL. (2013) die Zustände und die Dauer der Zustandswechsel, um den Belegungsplan entsprechend anzupassen. Dabei betrachten die Autoren die Produktionsplanung bis zum Vortrag der Produktion. EMEC ET AL. (2016) greifen dieses Konzept auf und validieren es anhand einer Produktionslinie mit Bohr- und Fräsmaschinen.

WANG UND LI (2013) entwickeln eine Methode zur Minimierung der Energiekosten und des Energieverbrauchs. Dabei wird eine energieeffiziente, bedarfsgerechte und kosteneffektive Planung der Produktion angestrebt. Es wird die Annahme getroffen, dass Puffer die Unzuverlässigkeit von Produktionsstationen, z. B. aufgrund von Ausfällen, und deren Auswirkungen auf den Durchsatz abmildern können. Des Weiteren werden zudem Wechselwirkungen zwischen den Produktionsstationen betrachtet. Zur Lösung des Optimierungsproblems wird die metaheuristische binäre Partikelschwarmoptimierung angewandt.

In einer frühen Arbeit von ASHOK UND BANERJEE (2001) wird ein lineares Programm zur Minimierung von Energiekosten durch Terminierung der Lasten unter Berücksichtigung von Produktions-, Prozessfluss- und Lagerrestriktionen, basierend auf Vorüberlegungen zur Reduzierung des Strombedarfs während Peak-Zeiten, entwickelt (ASHOK UND BANERJEE 2000). Unter Berücksichtigung der Restriktionen der minimalen Menge von Endprodukten, der Kontinuität des Materialflusses und einer maximalen Lagerkapazität wird ein mathematisches Modell zur Minimierung der Energiekosten aufgebaut. ASHOK UND BANERJEE (2003) entwickeln darauf basierend ein nichtlineares Optimierungsmodell zur Minimierung der Energiekosten durch die Nutzung von Kältespeichern. Des Weiteren werden die vorgestellten Ansätze unter Berücksichtigung der Restriktionen von ASHOK UND BANERJEE (2001) zur Betrachtung des zeitvariablen Stromtarifs TOU, der Anwendung in der Fließfertigung (ASHOK 2006) und der Anwendung bei kontinuierlichen Prozessen beispielhaft an einem Elektrolyseprozess (BABU UND ASHOK 2008) befähigt.

Keller et al. (2015) entwickeln in ihrer Arbeit eine Methodik zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung. Dabei gelingt es den Autoren, die Abbildung der Energiebezugsoptionen in der PPS anhand eines Vorgehens zur Generierung von Mengen- und Leistungsmodellen, die dem Planungsverlauf zu Verfügung gestellt

### **3.2 Identifikation und Bewertung von Energieflexibilität im Kontext der Produktionsplanung und -steuerung**

---

werden, zu integrieren. Zusätzlich werden die Schritte zur Definition von Maschinen-, Produkt- und Auftragsmodellen aufgezeigt, um mithilfe derer eine Modellierung der Energiebedarfe eines Produktionssystems vorzunehmen. Zur Vereinigung der beiden Modellierungen zu Energiebezug und -bedarf wird ein sequenzielles Planungsverfahren aufgestellt (KELLER ET AL. 2016A; KELLER ET AL. 2016B; KELLER UND REINHART 2016; KELLER ET AL. 2017).

Im Anschluss an die Vorstellung der Arbeiten zur energieorientierten Produktionsplanung werden nachfolgend die der Produktionssteuerung erläutert.

#### **Produktionssteuerung**

In seiner Arbeit über Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme stellt WEINERT (2010) das Konzept der „Energy-Blocks“ vor. Die aus den jeweiligen Zuständen von Produktionsstationen abgeleiteten Energiebedarfsmengen werden in einer Datenbank hinterlegt. Im Anschluss wird die dadurch gewonnene Transparenz bezüglich des Energieverbrauchs von Produktionssystemen genutzt, um diesen im Planungsverlauf berücksichtigen zu können. Durch den fortgesetzten Einsatz der Ergebnisse wird zudem die Nutzung in der Produktionssteuerung möglich (WEINERT ET AL. 2011). WEINERT UND MOSE (2016) erweitern das Konzept der Energy-Blocks in einem Agenten-basierten Ansatz um die des Anwendungsfelds des Lastmanagements. Am Beispiel einer Anpassung von Ofenprozessen wird die Maximallast eines Produktionsbereichs reduziert.

WILLEKE ET AL. (2014) beschreiben erste Ansätze einer energiekostenorientierten Fertigungssteuerung durch eine entsprechende Auftragsfreigabe und konkretisieren diese bezüglich der Integration zeitvariabler Energiekosten (WILLEKE ET AL. 2015A). Im Anschluss wird die Erweiterung des Ansatzes um die Reihenfolgebildung von Aufträgen unter Berücksichtigung von auftragsspezifischen Energiekosten vorgestellt (WILLEKE ET AL. 2015B).

FERNANDEZ ET AL. (2013) verfolgen einen Ansatz zur Reduzierung des Energieverbrauchs in Peak Perioden ohne eine Verringerung des Systemdurchsatzes. Durch sog. „Just-for-Peak“ Pufferbestände werden Produktionsprozesse zeitlich entkoppelt. Die Autoren beschreiben weiterhin Richtlinien zur Identifizierung der relevanten Puffer sowie zur Befüllung und Entleerung der jeweiligen Bestände. Zudem wird die Verfügbarkeit einer Maschine anhand der Zuverlässigkeit berücksichtigt.

Hierauf aufbauend entwickeln SUN ET AL. (2014) ein analytisches Modell zum Lastmanagement mit dem Ziel der Reduzierung des Energieverbrauchs in Peak

Zeiten. In vielen Ansätzen gilt der Systemdurchsatz als das Ziel mit einer hohen Priorität (FERNANDEZ ET AL. 2013; SUN UND LI 2013, ZHOU UND LI 2013). SUN ET AL. (2014) untersuchen eine Lockerung dieser Restriktion und stellen die Auswirkungen auf die Kosten bei Unterbrechen der Produktion in den Fokus. Im Anschluss werden die Energiekosteneinsparungen gegenübergestellt. Dadurch ergeben sich in der Produktionssteuerung neue Möglichkeiten, wie z. B. dass der Zielbestand des „Just-for-Peak“ Pufferbestands nicht mehr zwingend erreicht werden muss, bevor eine Lastverschiebung durchgeführt werden kann. Beide Ansätze beschreiben ein nichtlineares Optimierungsproblem.

SUN ET AL. (2015) untersuchen die Einbindung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) in ein energieorientiertes Lastmanagement für Produktionssysteme mit mehreren Produktionsstationen und Puffern. Dabei werden verschiedene Maßnahmen definiert und deren Auswirkungen auf die Minimierung der Gesamtkosten betrachtet. Diese setzen sich aus den Energie- und den KWK-Kosten zusammen.

Einen weiteren Ansatz zur Anpassung an sich ändernde Strompreise stellen NEUGEBAUER ET AL. (2012) in ihrer Arbeit zu energieintensiven Produktionssteuerungen vor. Energie wird von den Autoren als begrenzte Ressource betrachtet und Anforderungen an die Energieeffizienz von Produktionssystemen abgeleitet (PUTZ ET AL. 2012; PUTZ ET AL. 2013; STOLDT ET AL. 2013; PUTZ ET AL. 2014). Als Einflüsse werden dabei u. a. die Zustände von Produktionssystemen und Zustandsabhängigkeiten, wie z. B. Wechselwirkungen zwischen Produktionsstationen, genannt.

BEIER (2017) entwickelt ein Verfahren für die Produktionssteuerung, das den Energiebedarf der Produktion an das aktuelle Energieangebot bzw. die Eigenversorgung anpasst. Der Fokus der Arbeit liegt auf der Kapazitätssteuerung. In einer Simulation kann der Autor nachweisen, dass sein Ansatz den Anteil der Strom-eigenversorgung erhöhen kann. Dabei sind allerdings die Risiken verlängerter Durchlaufzeiten und höherer Umlaufbestände zu beachten (BEIER ET AL. 2015; BEIER ET AL. 2016; BEIER ET AL. 2017). Zwar nennen die Autoren solche Risiken, unterlassen es aber, diese monetär zu bewerten.

SCHULTZ ET AL. (2015B) entwickeln in ihrer Arbeit ein System zur Produktionssteuerung unter Berücksichtigung von Energie als begrenzte Ressource. Dabei bildet ein softwarebasiertes, energieorientiertes Informationsmanagement die Basis des Steuerungssystems. Darauf aufbauend werden die Informationen während des Betriebsablaufs in ein aktuelles Abbild der Produktionssituation übertragen und eine Prognose des resultierenden Lastgangs vorgenommen. Zusätzlich entwickeln

### **3.3 Methoden und Modelle des Risikomanagements in der Produktion**

---

die Autoren energieorientierte Steuerungsverfahren, die kritische Lastgangsabweichungen adressieren und Lastausgleiche vornehmen. Hierzu werden Verfahren der energieorientierten Reihenfolgebildung, der hybriden energieorientierten Auftragsfreigabe sowie des situativen Lastmanagements definiert und in einer Steuerungskaskade konfiguriert (SCHULTZ ET AL. 2015A; SCHULTZ ET AL. 2016; SCHULTZ ET AL. 2017).

Die zuletzt vorgestellten Arbeiten beschreiben Ansätze zur Umsetzung von Energieflexibilität in der PPS und nennen dabei Einflussfaktoren von Energieflexibilität. Diese sind in einer Bewertung von Energieflexibilität auf Produktionssystemebene zu berücksichtigen. Ein strukturiertes Vorgehen zur Identifikation dieser ist allerdings nicht gegeben. Im Weiteren müssen folglich die betrachteten Werke bei der Definition der Anforderungen an die Methodik der vorliegenden Arbeit berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 4.3). Zunächst werden jedoch nachfolgend die relevanten Arbeiten zur Identifikation und Bewertung von Risiken in der Produktion dargestellt.

### **3.3 Methoden und Modelle des Risikomanagements in der Produktion**

#### **3.3.1 Identifikation**

Basierend auf den in Abschnitt 2.3 vorgestellten Grundlagen der Risikobetrachtung in der Produktion werden nachfolgend Ansätze zur Identifikation von Produktionsrisiken von Produktionssystemen diskutiert. Nach HEIN (2007) müssen dabei zwei grundlegende Anforderungen berücksichtigt werden: Zum einen sollen auch neue, bisher unbekannte Risiken erfasst werden und zum anderen sind diese nachfolgend in Hinblick auf die festgelegten Unternehmensziele zu bewerten. Wie in Abbildung 3-3 dargestellt, lassen sich dabei grundsätzlich progressive und retrograde Methoden voneinander abgrenzen (MUGLER 1979; IMBODEN 1983; SCHUY 1989; WOLF UND RUNZHEIMER 2009; DIEDERICHS 2013). Progressive Ansätze gehen von den Risikoursachen aus und verfolgen deren Wirksamwerden iterativ bis zu den Unternehmenszielen. Dabei werden i. d. R. die potenziellen Risikoereignisse anhand standardisierter Checklisten aufgelistet. Retrograde Ansätze versuchen, beispielsweise mit Kreativitätsmethoden wie dem Brainstorming Risiken zu identifizieren, die direkt auf die Ziele und Strategien des Unternehmens wirken, um anschließend die jeweiligen Ursachen zu untersuchen.

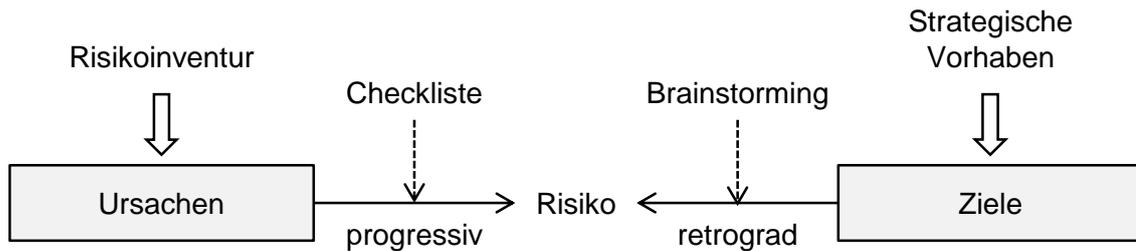


Abbildung 3-3: Unterscheidung der progressiven und retrograden Risikoidentifikation nach HEIN (2007)

Die nachfolgend vorgestellten Arbeiten verwenden in ihren Methoden jeweils eine Kombination der beiden Arten zur Risikoidentifikation. Dieser Ansatz hat sich durchgesetzt, um die wesentlichen Nachteile der progressiven Risikoidentifikation, wie die Vernachlässigung scheinbar unbedeutender Risiken oder zu detaillierten Erfassung von Risiken, zu reduzieren (HEIN 2007).

KÖNIG (2008) beschreibt in seiner Arbeit zum Management betrieblicher Risiken produzierender Unternehmen ein Vorgehen zur Identifikation von Produktionsrisiken (siehe Abbildung 3-4). Dabei stellt der Aufbau eines Modells des betrachteten Produktionssystems die Basis dar, um für jeden Prozessschritt die jeweiligen Produktionsrisiken und deren Auswirkungen auf das betrachtete Prozesselement zu analysieren. In einem abstrahierten Modell des Produktionssystems werden Produktionsobjekte (Objektklassen), Beschaffungsobjekte und Marktobjekte beschrieben. *Objektklassen* sind hierbei diejenigen, die in einem direkten Zusammenhang mit dem Produktionsprozess stehen, und können in die folgenden Unterklassen unterteilt werden:

- Betriebsmittel
- Verkettungselemente bzw. Transporteinrichtungen
- Personal
- Informationssysteme
- Lagersysteme

*Beschaffungsobjekte* sind für die Versorgung des Produktionsprozesses mit allen erforderlichen Materialien verantwortlich und können in Zukaufteile sowie Hilfsmittel, Verbrauchsmaterial und Hilfsstoffe unterteilt werden. *Marktobjekte* stellen die Einflüsse des Kunden auf den Produktionsprozess dar.

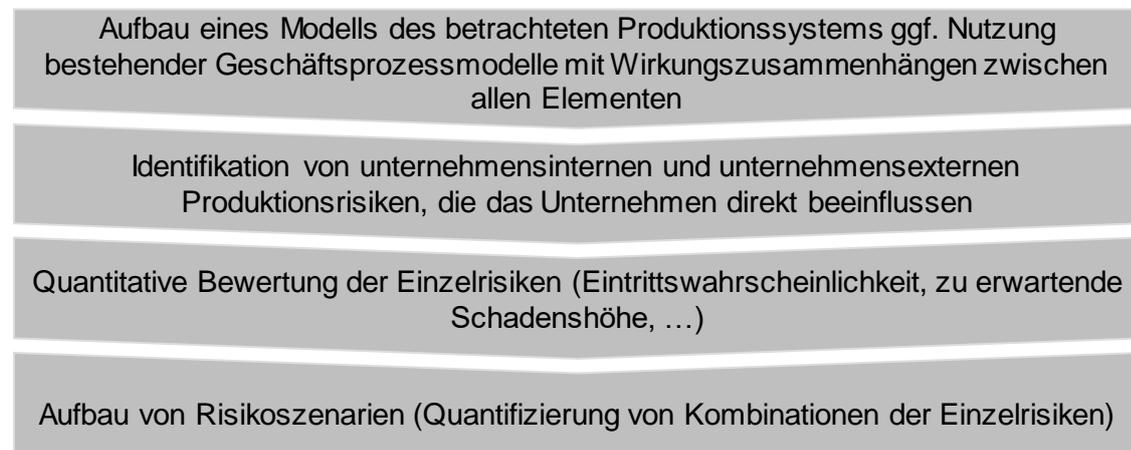
Neben der reinen Beschreibung der einzelnen Prozesselemente in den Objektklassen erfolgt eine Darstellung der Wirkbeziehungen zwischen den Elementen. Daran können im Anschluss Interaktionen zwischen Einzelrisiken identifiziert werden.

### 3.3 Methoden und Modelle des Risikomanagements in der Produktion

---

Darauffolgend wird die eigentliche Identifikation der Produktionsrisiken durchgeführt. Zunächst werden die jeweiligen Prozesselemente einzeln betrachtet, wodurch die Einzelrisiken ermittelt werden können. Zudem sollen globale Risiken, die nicht direkt einem Prozesselement zuzuordnen sind, identifiziert werden. In der späteren Risikobewertung werden diese auf alle betroffenen Prozessschritte aufgeteilt.

Im nächsten Schritt werden die Einzelrisiken einer ersten quantitativen Bewertung anhand der Schadenshöhe und der Eintrittswahrscheinlichkeit unterzogen. Die Bewertung von Einzelrisiken besitzt jedoch keine ausreichende Aussagekraft über die Risikosituation eines Produktionssystems. Daher sind die Einzelrisiken in Abhängigkeit ihrer Wirkbeziehungen zusammenzufassen. Dies gelingt im letzten Schritt durch die Zusammenfassung von Einzelrisiken in Risikoszenarien.



*Abbildung 3-4: Vorgehen zur Identifizierung von Produktionsrisiken nach KÖNIG (2008)*

WEIG (2008) erarbeitet ein Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten. Zur Identifizierung der zu betrachtenden Risiken werden, ausgehend von einer Kategorisierung von Risikofaktoren, mittels Risikochecklisten in Workshops potenzielle Risikoursachen benannt. Ausgewählte Experten ermitteln anhand zuvor definierter Ziele und der aus den Risikofaktoren entwickelten Checkliste eine möglichst große Anzahl an Risiken. Die so identifizierten internen und externen Risikofaktoren werden in einer dynamischen Risikomatrix hinterlegt.

HEIN (2007) beschreibt in seiner Arbeit zum strategischen Risikomanagement im Maschinen- und Anlagenbau eine erstmalige Risikoinventur als Ausgangspunkt

der kontinuierlich durchzuführenden Risikoidentifikation. Aufgrund der Komplexität wird empfohlen, diesen Arbeitsschritt von Führungskräften vornehmen zu lassen. Die dabei resultierende Auflistung aller Risiken wird im nachfolgenden Schritt auf Mehrfachnennung untersucht. Im Weiteren besteht grundsätzlich die Gefahr, dass mögliche Auswirkungen und Schäden von Risiken als tatsächliche Risiken erfasst werden. Diese können anhand einer Identifikation der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge ermittelt und ebenfalls aus der Risikoliste eliminiert werden. Abschließend werden die Verantwortungsbereiche je Risiko identifiziert. Hierbei gilt zu beachten, dass die Verantwortung für Risiken auch bereichsübergreifend verteilt sein kann.

KLÖBER-KOCH ET AL. (2016) stellen in ihrem Ansatz zur vorausschauenden Produktionsplanung unter Beachtung des operativen Risikos ein Vorgehen zur Identifizierung und Modellierung von Produktionsrisiken vor. Dabei wird darauf hingewiesen, die entsprechenden Einzelrisiken zusätzlich auf deren Wechselwirkungen hin zu untersuchen. Im ersten Schritt der Systemmodellierung werden die grundlegenden Elemente der Produktion, wie z. B. Produktionsressourcen oder Handhabungseinrichtungen, abgebildet. Von hoher Relevanz ist dabei die zu wählende Detailtiefe. So muss beispielsweise entschieden werden, ob die Betrachtung einer Produktionsstation in Form einer Black-Box ausreichend ist oder ob eine weitere Unterteilung in Aggregate erfolgen muss. Diese Differenzierung ist ebenfalls im zweiten Schritt zu beachten, in dem den Elementen Funktion, wie z. B. Transportieren, Fertigen oder Lagern, zugewiesen werden. Im dritten Schritt werden die Ausfallwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit der zuvor gewählten Detailtiefe ermittelt und somit eine erste Quantifizierung der Risiken vorgenommen.

Die vorgestellten Ansätze beschreiben die Identifikation von Produktionsrisiken und wählen dabei größtenteils die Betrachtungsebene des Produktionssystems. Damit stellen sie die Basis der hier vorliegenden Arbeit dar. Eine Berücksichtigung von energetischen Faktoren steht nicht im Fokus, insbesondere Energieflexibilität, als mögliche Risikoursache, wird nicht betrachtet.

#### **3.3.2 Bewertung**

Zur quantitativen Bewertung von Produktionsrisiken werden nach KÖNIG (2008) zunächst die Veränderungen am Produktionssystem, die sich durch die identifizierten Einzelrisiken und den daraus abgeleiteten Risikoszenarien ergeben, betrachtet (siehe Abbildung 3-5). Dadurch können erste Aussagen über Auswirkungen von z. B. Maschinenstillständen, den entstehenden Verlust an

### 3.3 Methoden und Modelle des Risikomanagements in der Produktion

---

produzierten Gütern oder die erforderlichen Änderungen am Produktionsprozess getroffen werden.

Der Autor identifiziert dabei zwei geeignete Methoden: So besteht die Möglichkeit, Produktionsrisiken durch eine abgewandelte Form des aus der Finanzmathematik stammenden Value-at-Risk (VaR) zu bewerten. Da zukünftige Ereignisse bei der Berechnung des VaR mithilfe historischer Daten ermittelt werden, sind Ereignisse, die in der Vergangenheit noch nicht aufgetreten sind, nicht prognostizierbar. Entscheidungen sollten daher nicht alleine auf Basis dieses Werts getroffen werden. Zudem werden die zur Berechnung des VaR benötigten Daten in Bezug auf die Produktion kritisch bewertet. Aus diesem Grund wird eine zweite Möglichkeit der Bewertung von Produktionsrisiken betrachtet. Da Informationen in der Produktion bezüglich Maschinenkosten, Personalkosten, Ausfallzeiten etc. i. d. R. vorhanden sind, können mögliche Ausfalldauern oder sonstige Zeitverzögerungen leicht quantifiziert werden. Demnach bietet sich eine quantitative Risikobewertung mithilfe dieser Größen an, da sie ohne erheblichen Aufwand zu ermitteln sind. Dabei wird die Annahme getroffen, dass die Schadenshöhe im Falle eines auftretenden Produktionsrisikos über die folglich anfallende Ertragsminderung bewertet werden kann. Deren Quantifizierung kann durch nachfolgende Größen erfolgen:

- Kosten zu Schadensbeseitigung (z. B. erforderliche Reparaturen)
- Kosten für Maschinenstillstand (z. B. laufende Fixkosten)
- Kosten für Umsatz-/Erlösausfall (z. B. entfallendes Produktionsvolumen)
- Kosten für Konventionalstrafen

Weiterhin bietet sich nach KÖNIG (2008) als zu beurteilende Zielgröße die Nutzung der Gesamtanlageneffektivität OEE an. Diese besteht aus dem Gesamtnutzungsgrad, dem Leistungsgrad und dem Qualitätsgrad einer Anlage (KAMISKE 2015). Um eine aussagekräftige Bewertung des Einflusses von Produktionsrisiken auf das Unternehmen treffen zu können, soll die OEE in Kosten umgerechnet werden. Diese Umrechnung ist dabei über die geplante bzw. real produzierte Stückzahl und die damit erzielbaren Einnahmen oder auch dem erzielbaren Deckungsbeitrag möglich. Abschließend werden aus den gewonnenen Erkenntnissen die zu erwartende Schadenshöhe berechnet und unternehmensspezifische Kennzahlen ermittelt (KÖNIG 2008).

Berechnung der Veränderungen im Modell des Produktionssystems bei Nutzung der Risikoszenarien als Eingangsinformation (Szenario-, Worst-Case-Analyse, historische Simulation, Vergleich zum Branchendurchschnitt)

Berechnung der zu erwartenden Entwicklung von Umsatz, O.E.E., etc. und Quantifizierung gängiger Risikomaße durch statische und dynamische Simulationen

*Abbildung 3-5: Vorgehen zur Bewertung von Produktionsrisiken nach KÖNIG (2008)*

Im Konzept zur Bewertung von Risiken bei der Fabrikplanung nach WEIG (2008) werden - ausgehend von den in Risikoworkshops identifizierten Risiken - deren Wirkung über die Risikoträger Betriebsmittel, Personal, Fläche und Kapital auf die Herstellkosten untersucht. Dies gelingt mithilfe sog. Transferfunktionen. Dem einzelnen Risikoträger werden dabei mehrere Typen, wie z. B. Stufenfunktionen oder lineare Funktionen, zugeordnet. Mittels einer Variation der Ressourcenkosten bilden die Transferfunktionen potenzielle Risikoschadenskosten ab. Anschließend werden die bewerteten Einzelrisiken in einer Risk Map gesammelt und nach deren Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß eingeordnet, um die kritischen Risiken für die nachfolgende Ableitung von Steuerungsmaßnahmen zu identifizieren. Der letzte Schritt stellt die Berechnung eines Gesamtrisikos über die Aggregationsstufen der System-, Bereichs- und Fabrikebene dar. Dabei bedient sich WEIG (2008) der Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung bzw. der Simulationsmethoden (SCHREIBER 1994; BUSCH 2005).

HEIN (2007) nennt als geeignete Methoden zur Risikobewertung in der Produktion die Fehlerbaumanalyse und FMEA. Der Autor begründet dies durch die intuitive Nutzbarkeit, die weite Verbreitung in der Praxis und die eingängige Visualisierung dieser Methoden. Jedoch werden zusätzlich die fehlende Berücksichtigung von zeitlichen Komponenten und von Risikointerdependenzen als Nachteil genannt (ROMEIKE 2004). Da eine solche Risikobewertung oftmals auch eine subjektive Einordnung von Mitarbeitern darstellt, wird vorab ein gemeinsames Verständnis des Risikobegriffs geschaffen. Hierfür werden zunächst die Unternehmensziele klar definiert und hierarchisch dargestellt. Aufbauend darauf werden die Bewertungskriterien Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit operationalisiert. Hierdurch können Bewertungsunterschiede zwischen Mitarbeitern reduziert und somit die Aussagekraft des Bewertungsergebnisses verbessert werden.

### 3.4 Handlungsbedarf

---

Klöber-Koch et al. (2016) stellen einen weiteren Ansatz zur Quantifizierung von Risiken in der Produktion vor. Anhand eines Modells des betrachteten Produktionssystems (siehe Abschnitt 2.2.4) können Eintrittswahrscheinlichkeiten ausreichend sicher bestimmt werden. Anschließend wird das Schadensausmaß bei Eintritt des jeweiligen Risikos bestimmt. Um die Auswirkung einzelner Produktionsrisiken auf die Ziele der Produktion zu quantifizieren, muss zunächst deren Auswirkung auf andere Systemelemente ermittelt werden. Hierfür stellt ein Wirkmodell das zentrale Instrument dar (KLÖBER-KOCH ET AL. 2017). Zusätzlich wird das Schadensausmaß monetär quantifiziert. Die Autoren stellen fest, dass dies z. B. bezüglich der Liefertermintreue über drohende Vertragsstrafen erfolgen kann. Neben der Liefertermintreue existieren noch weitere Produktionsziele, die durch Risiken beeinträchtigt werden können und demnach zur vollständigen Risikoquantifizierung berücksichtigt werden müssen. Die abschließende Gewichtung der einzelnen Zielgrößen ist je nach Unternehmen vorzunehmen.

Im vorangegangenen Abschnitt wurden Forschungsarbeiten zur Bewertung von Produktionsrisiken diskutiert. Diese befähigen Unternehmen dazu, Risiken einschätzen zu können, berücksichtigen jedoch keine Einflüsse, die bei der Umsetzung von EFM entstehen können. Darüber hinaus gibt es keine strukturierte Vorgehensweise, um bereits bewertete Produktionsrisiken in die Bewertung von Energieflexibilität einfließen zu lassen. Dennoch eignen sich die genannten Ansätze als Basis für eine Weiterentwicklung der o. g. Themen.

Im Anschluss an die Vorstellung des aktuellen Stands der Technik im Bereich der Identifikation, Bewertung und Umsetzung von Energieflexibilität sowie der Risikoidentifikation und -bewertung wird nachfolgend der sich daraus ergebende Handlungsbedarf abgeleitet.

### 3.4 Handlungsbedarf

Im Verlauf des vorliegenden Kapitels 3 wurden die für diese Arbeit relevanten wissenschaftlichen Ansätze vorgestellt. Abbildung 3-6 gibt eine Übersicht der Ergebnisse der Literaturanalyse und beschreibt den inhaltlichen Fokus der jeweiligen Arbeiten. Dabei werden ausgewählte Monografien bzw. gesammelte Werke von Autoren miteinander verglichen.

### 3 Stand der Forschung und Handlungsbedarf

		Energieflexibilität					Risiko					
		Beier 2017	Graßl 2015	Kabelitz 2017	Keller 2018	Schultz 2018	Hein 2007	Klöber-Koch 2016	König 2008	Steinmetz 2007	Weig 2008	
Energieflexibilität	Identifikation	☐	☐	☐	☐	☐	○	○	○	○	○	Keine Berücksichtigung von Energieflexibilität im Bereich des Risikos
	Bewertung	☐	●	☐	☐	☐	○	○	○	○	○	
	Umsetzung	●	☐	○	●	●	○	○	○	○	○	
Risiko von Energieflexibilität		☐	☐	☐	☐	☐	○	○	○	○	○	
Risiko	Identifikation	○	○	○	○	○	●	☐	☐	☐	☐	
	Bewertung	○	○	○	○	○	☐	☐	●	●	●	
		Keine Berücksichtigung von Risiken im Bereich der Energieflexibilitätsforschung										

Abbildung 3-6: Bewertung ausgewählter Ansätze des Stands der Technik

Der sich daraus ergebende Handlungsbedarf gliedert sich nach vier Punkten auf:

- Die detaillierte Analyse der aktuellen Vorgehensweisen zur Identifikation von Energieflexibilität in Abschnitt 3.2.1 lässt eine spätere Bewertung von EFM auf der Betrachtungsebene eines Produktionssystems nur ungenügend zu. Um vorbereitende Schritte definieren zu können, ist eine Erweiterung der vorhandenen Methoden notwendig.
- Der inhaltliche Schwerpunkt vieler Ansätze im Bereich der Energieflexibilität (siehe Abschnitt 3.2) liegt auf der Umsetzung in der PPS. Die Bewertung von Energieflexibilität steht hierbei oftmals nicht im Fokus. Im Bereich der technischen und organisatorischen Bewertung von EFM liegen ein ausführlicher Ansatz zur Bewertung auf Anlagenebene und ein übergeordneter Ansatz zur mathematischen Berechnung vor. Eine Methodik zur Bewertung von Energieflexibilität von Produktionssystemen existiert aktuell nicht.
- Die analysierten Ansätze zu Produktionsrisiken in Abschnitt 3.3 zeigen Methoden zu deren Identifikation und Bewertung auf. Dabei werden die Risiken von Energieflexibilität oder im Speziellen von EFM in der Literatur zur

### 3.4 Handlungsbedarf

---

Energieflexibilität genannt. Eine systematische Untersuchung derer Einflüsse wird nicht vorgenommen. Darüber hinaus wird der Einfluss von Produktionsrisiken auf Energieflexibilität nicht betrachtet.

- Bei der Betrachtung des Abschnitts 3.2 fällt zusätzlich auf, dass in der Literatur kein durchgängiges Vorgehen zur Unterstützung von produzierenden Unternehmen zur Vermarktungsentscheidung von Energieflexibilität existiert. Eine Informationsaufbereitung für die Managementebene findet dementsprechend nicht statt.

Zusammenfassend gilt es folglich, eine Methodik zu entwickeln, die über die Identifikation und Bewertung von Energieflexibilität bis hin zur Informationsbereitstellung bezüglich einer Vermarktungsentscheidung ein fortlaufendes Vorgehen zur Verfügung stellt. Dabei steht die Bewertung der technischen und organisatorischen Energieflexibilität im Fokus. Zudem muss insbesondere die Veränderung der Risikosituation des produzierenden Unternehmens durch die Kombination eines retrograden und progressiven Risikobewertungsansatzes berücksichtigt werden. Um derartige Wechselwirkungen innerhalb des Produktionssystems zu erfassen, ist es erforderlich, die Betrachtungsebene des Ansatzes auf der entsprechenden Höhe zu wählen.

# 4 Leitgedanke, Anforderungen und Vorgehen der Methodik

## 4.1 Allgemeines

Kapitel 4 gibt eine Übersicht über die Methodik zur risikoorientierten Bewertung von Energieflexibilität von Produktionssystemen. Zusätzlich werden der Leitgedanke und die Anforderungen der Methodik beschrieben sowie deren einzelne Bestandteile in den Kapitel 5 und 6 detailliert hergeleitet.

Basierend auf der in Abschnitt 1.1 dargestellten aktuellen Situation produzierender Unternehmen verfolgt die Methodik das Ziel, eine Vorgehensweise zur Bewertung von Energieflexibilität und eine darauf aufbauende Vermarktungsentscheidung für EFM gemäß der Anforderungen des Energiemarkts (siehe Abschnitt 2.4.2) und unter Berücksichtigung der Zielgrößen der PPS (siehe Abschnitt 2.2.6) vorzugeben. Aufbauend auf dem aktuellen Stand der Technik und dem daraus abgeleiteten Handlungsbedarf setzt sich die Methodik aus den in Abbildung 4-1 dargestellten Bestandteilen der technischen und organisatorischen Bewertung sowie der Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung von Energieflexibilität zusammen.

Die technische Bewertung erfolgt unter Berücksichtigung der technischen Eigenschaften von Produktionsstationen, wie z. B. der Dauer eines Anfahrvorgangs aus dem Standby-Betrieb. Die organisatorische Bewertung integriert die Rahmenbedingungen der Aufbau- und Ablauforganisation in die Analyse, bspw. die Dauer eines Umplanungsprozesses. Beide Bereiche bilden die Grundlage der Bewertung in Kapitel 5. Die Abschnitte 5.2, 5.3 und 5.4 erläutern die für die Aufnahme von Energieflexibilität notwendigen Formalisierungen von Daten und die Schritte zur Erstellung eines EFM-Katalogs. Abschnitt 5.5 beschreibt die darauf aufbauenden Strategien zur Bewertung von einzelnen EFM und deren möglichen Kombinationen. Indem mehrere miteinander verknüpfte Produktionsstationen miteinbezogen werden, gelingt der Wechsel des Betrachtungshorizonts von der Anlagenebene auf die Produktionssystemebene. Der bewertete EFM-Katalog wird im Anschluss in Abschnitt 6.2 und 6.3 einer Risikobewertung von Energieflexibilität mit dem Ziel einer detaillierteren Bewertung unterzogen. Dies gelingt unter dem erneuten Einbezug der technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen. Im Unterschied zu Kapitel 5 werden dabei nur Einflüsse betrachtet, die mit einer Eintritts-

## 4.2 Leitgedanke der Methodik

wahrscheinlichkeit verbunden sind, die kleiner als 100 % ist. Abschnitt 6.4 beschreibt die Erlösbewertung des Maßnahmenkatalogs durch die Betrachtung der einzelnen Möglichkeiten auf dem Energiemarkt. Anschließend wird in Abschnitt 6.5 ein Vorgehen zur Vermarktungsentscheidung der Energieflexibilität aufgezeigt.

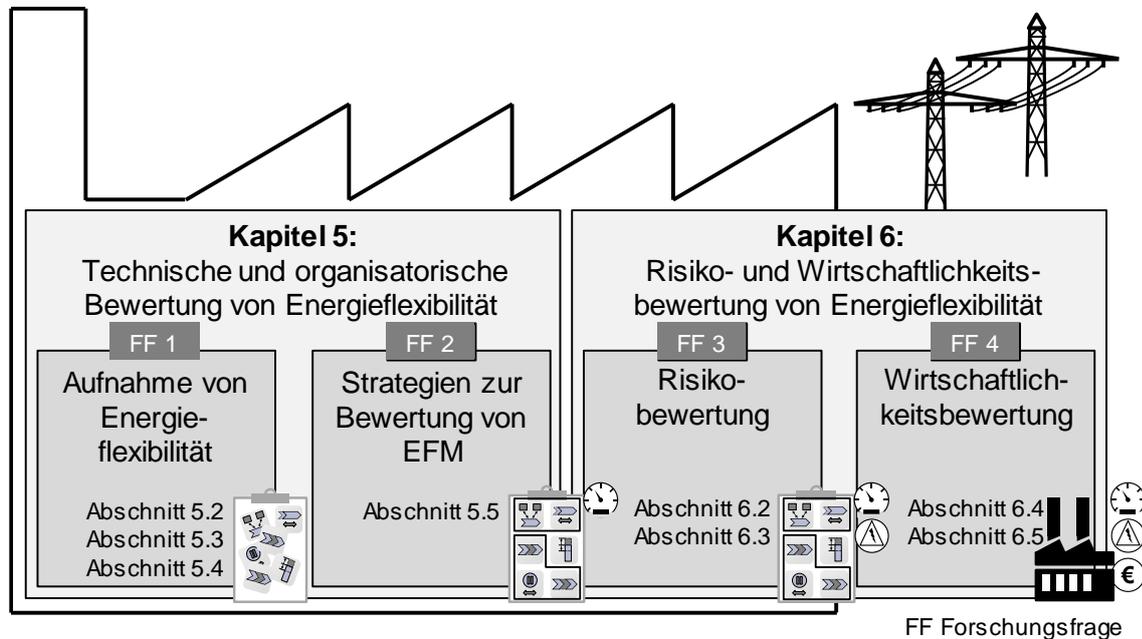


Abbildung 4-1: Aufbau der Methodik

## 4.2 Leitgedanke der Methodik

Der für die Methodik zugrundeliegende Leitgedanke besteht darin, die zwei folgenden Gruppen als potenzielle Adressaten in einem produzierenden Unternehmen zu verstehen:

- Entscheider über die Vermarktung von Energieflexibilität (Management)
- Nutzer des Energieflexibilitätsmaßnahmenkatalogs (PPS)

Der Entscheider über die Vermarktung von Energieflexibilität ist in Unternehmen aus Gründen der Abhängigkeit zur Größe und der Organisationsform nicht eindeutig zu bestimmen. Der Personenkreis ist jedoch aufgrund notwendiger Investitionsentscheidungen (wie z. B. die Kosten einer Präqualifikation auf dem Regelleistungsmarkt) der Managementebene zuzuordnen. Je nach Aufwandshöhe und Risiko der Umsetzung von EFM können hier bspw. Werks-, Bereichs-, Hauptabteilungs-, Produktions- oder Fachabteilungsleitung (GREINER 1989) zuständig sein. Die Methodik gibt dem Management eine Vorgehensweise zur Bestimmung

aller relevanten Informationen vor, mit denen die Verantwortlichen die Entscheidung bezüglich einer Nichtvermarktung bzw. Vermarktung der Energieflexibilität und eine Auswahl bezüglich der aktuellen Märkte treffen können.

Die Nutzung bzw. Umsetzung des Energieflexibilitätsmaßnahmenkatalogs fällt in den Aufgabenbereich der PPS (siehe Abschnitt 2.2.6). Bei der Durchführung der Methodik entsteht der Maßnahmenkatalog, um eine strukturierte Bewertung der Energieflexibilität vornehmen zu können. Aus Sicht der PPS sind die gesammelten Informationen bei der Umsetzung von zentraler Bedeutung. So können diese in Optimierungsmodellen unter Berücksichtigung von Energiekosten (SCHULTZ ET AL. 2015B; KELLER ET AL. 2016B; BEIER 2017) eingesetzt werden. Diese unterscheiden sich u. a. in der häufigen Durchführung der Optimierung von der in dieser Arbeit entwickelten Methodik, da es sich dabei um eine einmalige IST-Situationsbewertung handelt. Die Optimierung erfordert einen hohen initialen Aufwand. Eine Anforderung an die einmalige Bewertung muss es folglich sein, mit geringeren Anstrengungen von Seiten des Anwenders verbunden zu sein. Aus diesen Überlegungen ergeben sich die im anschließenden Abschnitt vorgestellten formellen Anforderungen an die Methodik.

### 4.3 Anforderungen an die Methodik

Tabelle 4-1 zeigt zusammenfassend die nachfolgend beschriebenen Anforderungen, die an die Methodik der Bewertung von Energieflexibilität gestellt werden. Beginnend mit den methodischen Anforderungen werden im Anschluss Anforderungen an die Anwendbarkeit aufgezeigt.

*Tabelle 4-1: Anforderungen an die Methodik*

	Anforderungen
Methodisch	Minimierung des Aufwands für den Nutzer
	Granularität der Bewertung des Potenzials
	Berücksichtigung der aktuellen Anforderungen des Energiemarktes
	Betrachtung von Maßnahmen
Anwendbarkeit	Quantitative Bewertung
	Übertragbarkeit
	Umsetzung in einer Software

### 4.3 Anforderungen an die Methodik

---

In Abschnitt 4.2 wurden die potenziellen Nutzer der Methode aufgezeigt. Diese sind naturgemäß an einer Minimierung des an sie gestellten Aufwands bei der Durchführung der Vorgehensweise interessiert. Dies ist zum einen notwendig, um einer initialen Abschreckungsgefahr entgegenzuwirken und zum anderen dem Neuheitsgrad des hier behandelten Themas geschuldet. Unternehmen möchten ihr Flexibilitätspotenzial überprüfen, dessen Höhe jedoch unbekannt ist. Ein hoher Aufwand könnte dazu führen, dass die Methodik nicht angewandt wird, da diese eventuell einen noch zu bewertenden Nutzen übersteigen könnte.

Zusätzlich muss die Methodik höchsten Ansprüchen an die Granularität der Bewertung bzw. der Qualität der Informationen gerecht werden, um die Vermarktungsentscheidung des Managements fundiert gestalten zu können. Der Widerspruch der zwei letztgenannten Anforderungen stellt aufgrund der Komplexität, die sich aus der Kombination der zwei Wissenschaftsgebiete der Produktionstechnik und der Energiewirtschaft ergibt, die zentrale Herausforderung der Arbeit dar. Es gilt eine Vorgehensweise zu entwickeln, die das Bewertungsergebnis weder zu Grobgranular (da ansonsten keine fundierte Entscheidungsvorlage gegeben werden kann) noch zu Feingranular (da der Aufwand eventuell den zu erwartenden Nutzen übersteigt) werden lässt.

Gerade die Gegebenheiten des Energiemarkts bzw. die Vermarktungsmöglichkeiten der Flexibilität sind aktuell starken Änderungen unterlegen (BMW I 2017). Aus diesem Grund ist es einerseits notwendig, die aktuellen Gegebenheiten bei der Erstellung der Methodik zu berücksichtigen und andererseits Freiraum für die Berücksichtigung zukünftiger Änderungen auf dem Energiemarkt oder gänzlich neuer Marktmodelle zu lassen.

Die zuvor erläuterte Komplexität der Themenstellung erfordert eine strukturierte Aufnahme der Energieflexibilitätspotenziale. Um gleichzeitig Informationen zu generieren, die im Aufgabengebiet der PPS weiterverarbeitet werden können, ist die Beschreibung konkreter Maßnahmen zur Anpassung des Energiebedarfs im Produktionssystem erforderlich.

Die Vorgehensweise der Methodik zur Bewertung von Energieflexibilität muss gesammelte Daten quantitativ darstellen, um messbare Größen zu generieren und damit die Weiterverarbeitbarkeit sicherzustellen. Dadurch können Ergebnisse über die Zeit oder in Form einer Benchmarkanalyse z. B. mit anderen Unternehmen derselben Branche verglichen werden. Dies ist eine Herausforderung, da einige Einflussfaktoren, z. B. aus dem Personalbereich, qualitative Eigenschaften aufwei-

sen und damit in einem zusätzlichen Schritt quantifiziert werden müssen. Im Ergebnis empfiehlt sich aus Gründen der Übersichtlichkeit die Verwendung einer einheitlichen Größe.

Eine weitere Anforderung an die Methodik stellt die Übertragbarkeit auf verschiedene Unternehmen dar, um eine Anwendbarkeit in unterschiedlichen Branchen zu gewährleisten. Dabei müssen insbesondere die verschiedenen Produktionsprozesse in den produzierenden Unternehmen berücksichtigt werden können.

Um eine bedienerfreundliche Nutzung der Vorgehensweise der Methodik zur Bewertung zu gewährleisten, muss diese in Form eines Softwaretools umgesetzt werden können. Damit ist es möglich Berechnungen und andere Tätigkeiten, wie z. B. Suchvorgänge in Tabellen, die der Nutzer andernfalls selbst vornehmen müsste, zu automatisieren. Nachfolgend wird in Kapitel 5 die technische und organisatorische Bewertung von Energieflexibilität hergeleitet und beschrieben.



## 5 Technische und organisatorische Bewertung von Energieflexibilität

### 5.1 Übersicht

Im vorliegenden Kapitel 5 wird ein Vorgehen zur technischen und organisatorischen Bewertung von Energieflexibilität entwickelt. Aufbauend auf der in Abschnitt 1.3 vorgestellten Forschungsfrage 1 lassen sich verschiedene Zielsetzungen für dieses Kapitel ableiten, die sich wiederum den zwei Adressaten und einem bestimmten Nutzen für diese zuordnen lassen. Abbildung 5-1 verdeutlicht die Zusammenhänge.

Ziele	Adressat	Nutzen
<i>Abschnitt 5.2:</i> Identifikation und Charakterisierung von EFM	PPS	Auflistung der EFM, welche bei der Umsetzung der Energieflexibilität zur Verfügung stehen
<i>Abschnitt 5.3:</i> Generisches Wirkgefüge der Energieflexibilität innerhalb eines Produktionssystems	PPS	Nachvollziehbarkeit der Wirkung von Änderungen im Produktionssystem durch die Einflussfaktoren der Energieflexibilität
<i>Abschnitt 5.4:</i> Kategorisierung von EFM	PPS	Kenntnis zu möglichen Einsatzszenarien der Energieflexibilität

FF Forschungsfrage

Abbildung 5-1: Ziele, Adressaten und Nutzen der Forschungsfrage 1

Abbildung 5-2 beschreibt Ziele, Adressaten und deren ableitbaren Nutzen bezüglich der Forschungsfrage 2. Im Fokus steht dabei die Entwicklung von Bewertungsstrategien der Energieflexibilität auf Produktionssystemebene und die damit verbundene Informationsbeschaffung.

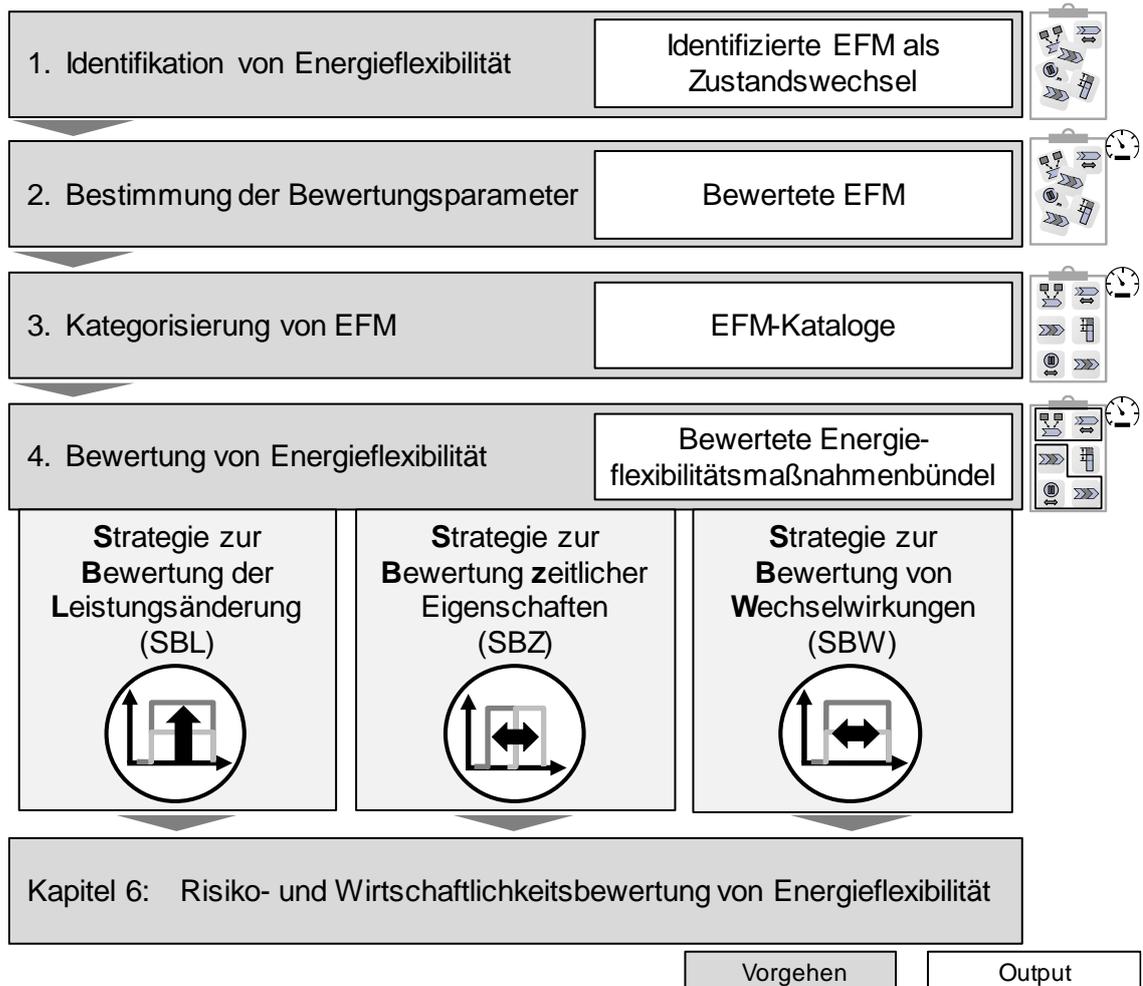
## 5.1 Übersicht

Ziele	Adressat	Nutzen
Abschnitt 5.5: Ableitung von Strategien zur Bewertung von Energieflexibilität auf Produktionssystemebene	PPS	Kenntnis zu Nebenbedingungen der Optimierung beim Einsatz der EFM
	Management	Kenntnis über technische und organisatorische Potenziale des Produktionssystems

FF Forschungsfrage

Abbildung 5-2: Ziele, Adressaten und Nutzen der Forschungsfrage 2

Zur Erreichung der dargestellten Ziele der Forschungsfragen 1 und 2 wird die in Abbildung 5-3 illustrierte Vorgehensweise verfolgt. Der erste Schritt der technischen und organisatorischen Bewertung ist die Identifikation von Energieflexibilität der zu betrachtenden Produktionsstationen. Dieser Schritt ist erforderlich, da auf der einen Seite eine Abschaltung eines kompletten Produktionssystems aufgrund erheblicher Auswirkungen auf die logistischen Zielgrößen nur sehr selten rentabel ist und auf der anderen Seite die Betrachtung von Kleinstverbrauchern, wie z. B. eine Handbohrmaschine, aufgrund des geringen Energieverbrauchs in den seltensten Fällen relevant ist. Das Ergebnis stellt die Identifikation denkbarer EFM dar. Hierbei wurde aufbauend auf die Arbeit von Graßl (2015) das in Abschnitt 3.2.1 vorgestellte Verfahren im Sinne einer möglichen Verwendung für die Bewertung auf Produktionssystemebene weiterentwickelt. Im zweiten Schritt werden die relevanten Bewertungsparameter bestimmt und ein Vorgehen zur Bewertung der EFM entwickelt. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird im nächsten Schritt eine Kategorisierung der EFM in sog. Maßnahmenkataloge vorgenommen. Der vierte Schritt greift diese auf, um die EFM aus den einzelnen Katalogen sinnvoll miteinander zu kombinieren. Er erfolgt zur besseren Erfüllung der in Schritt zwei hergeleiteten Voraussetzungen an EFM. Die Bündel der EFM werden durch das Durchlaufen von drei Strategien gebildet und anschließend bewertet. Nach Abschluss einer Strategie ist das Durchlaufen der jeweils nächsten Strategie als optional anzusehen. Kapitel 5 bildet im Anschluss die Basis für die Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung in Kapitel 6.



*Abbildung 5-3: Vorgehen der technischen und organisatorischen Bewertung von Energieflexibilität*

## 5.2 Identifikation von Energieflexibilität

### 5.2.1 Auswahl von Produktionsstationen

Der Betrachtungshorizont liegt, wie bereits in Kapitel 1 erläutert und in der Abbildung 1-3 dargestellt, auf dem Produktionssystem. Hierin sind mehrere Produktionsstationen und Puffer im Materialfluss miteinander verknüpft. Im ersten Schritt erfolgt daher die Auswahl der im Kontext der Energieflexibilität zu betrachtenden Produktionsstationen eines Produktionssystems. Hierbei werden von GRÄBL (2015) die zwei Eigenschaften des Leistungsbedarfs und des Anteils am Gesamtenergiebedarf einer Produktionsstation vorgeschlagen, um im Anschluss die Energieflexibilität dieser Produktionsstation zu bewerten. Da im Rahmen dieser Arbeit

## 5.2 Identifikation von Energieflexibilität

---

die Energieflexibilität auf Produktionssystemebene untersucht wird, ist eine Ergänzung mit dem Faktor der Auslastung der betrachteten Produktionsstation notwendig, um die Verfügbarkeit von einer EFM bei einer späteren Betrachtung der Auswirkungen derer im Materialfluss zu berücksichtigen. Dies ist zudem relevant, da eine anzustrebende Leistungsänderung in positiver (z. B. das Zuschalten einer Produktionsstation) und negativer Richtung (z. B. das Abschalten einer Produktionsstation) als Energieflexibilitätpotenzial aufgenommen werden kann. Damit ist einerseits eine Produktionsstation mit hoher Auslastung öfter verfügbar, um einen Lastabwurf vorzunehmen. Beispielhaft kann hier eine fast vollaugelastete Papiermaschine genannt werden, welche die Reihenfolge der zu produzierenden Papiersorten wechselt. Dabei werden die unterschiedlichen Energiebedarfe genutzt. Andererseits ist eine Produktionsstation mit einer niedrigen Auslastung öfter verfügbar, um eine Lasterhöhung vorzunehmen. Dies ist z. B. bei Testanlagen in der Hochfrequenztechnik der Fall, die nur wenige Male im Monat zum Einsatz kommen und deren hoher Energiebedarf entsprechend eingesetzt werden kann. Allerdings ist zusätzlich festzustellen, dass eine zu hohe Auslastung ebenfalls negativ einzustufen ist, da hierbei oftmals die Erreichung von logistischen Zielen im Widerspruch zum Einsatz für die Energieflexibilität steht. Ebenfalls lässt eine extrem niedrige Auslastung darauf schließen, dass eine Produktionsstation kaum benutzt wird und daher sehr selten zum Einsatz zur Verfügung steht.

Die Bewertung auf Produktionssystemebene beinhaltet des Weiteren naturgemäß eine Analyse von mehreren Produktionsstationen. Hierbei stellt die Empfehlung einer Reihenfolge, in der diese zu untersuchen sind, einen Mehrwert für den Anwender dar. Der Grund hierfür ist die deutliche Aufwandsreduzierung, die dadurch gelingt, dass ab einer beliebigen Stelle das Vorgehen abgebrochen werden kann, da die vielversprechendsten Produktionsstationen untersucht wurden. Um den Ansprüchen einer Auswahl von Produktionsstationen auf Produktionssystemebene zu genügen, wird im Weiteren ein Vorgehen hierzu vorgestellt, das den Leistungsbedarf und die Auslastung berücksichtigt. Der Anteil am Gesamtenergiebedarf wird dabei nicht betrachtet, da hierbei die Verfügbarkeit einer EFM nicht genau genug erfasst werden kann.

Zu Beginn wird der maximale Wert der Leistungsbedarfe der Produktionsstationen, der häufig der Betriebsanleitung entnommen werden kann, in mehrere Korridore unterteilt. Deren Anzahl ist abhängig von der Anzahl der Produktionsstationen und ist dabei so zu wählen, dass sich diese nur im Falle ähnlicher Leistungsbedarfe im selben Korridor befinden. Bspw. kann überprüft werden, ob sich der Leistungsbedarf von Produktionsstationen im selben Korridor nicht mehr als 10 %

unterscheiden. Je höher der zugeordnete Korridor einer Produktionsstation ist, desto höher ist dessen Priorität. Befinden sich mehrere Produktionsstationen im selben Korridor, so entscheidet nicht der höhere Leistungsbedarf über die Priorisierung, da dieser nur marginal ist, sondern die Höhe der Auslastung der Produktionsstation  $A^{Sta}$ . Eine niedrige bzw. hohe Auslastung ist aus o. g. Gründen positiv zu beurteilen (siehe Verdunklungen in Abbildung 5-4). Jedoch ist eine hundert- bzw. nullprozentige Auslastung als negativ anzusehen, da eine Verwertung von Zustandswechseln hier nur in seltenen Fällen durchgeführt werden kann. Aus diesem Grund müssen bei der Betrachtung des Parameters minimale und maximale Werte eingeführt werden, wie z. B. 3 % und 97 %.

Unter den o. g. Voraussetzungen würde eine auszuwählende Produktionsstation folglich unter Berücksichtigung des in Formel (1) beschriebenen Zusammenhangs ausgewählt werden.

$$Produktionsstation = \max(|100 - A^{Sta}|, |0 - A^{Sta}|) \quad (1)$$

Abbildung 5-4 stellt das Vorgehen grafisch am Beispiel von fünf betrachteten Produktionsstationen dar.

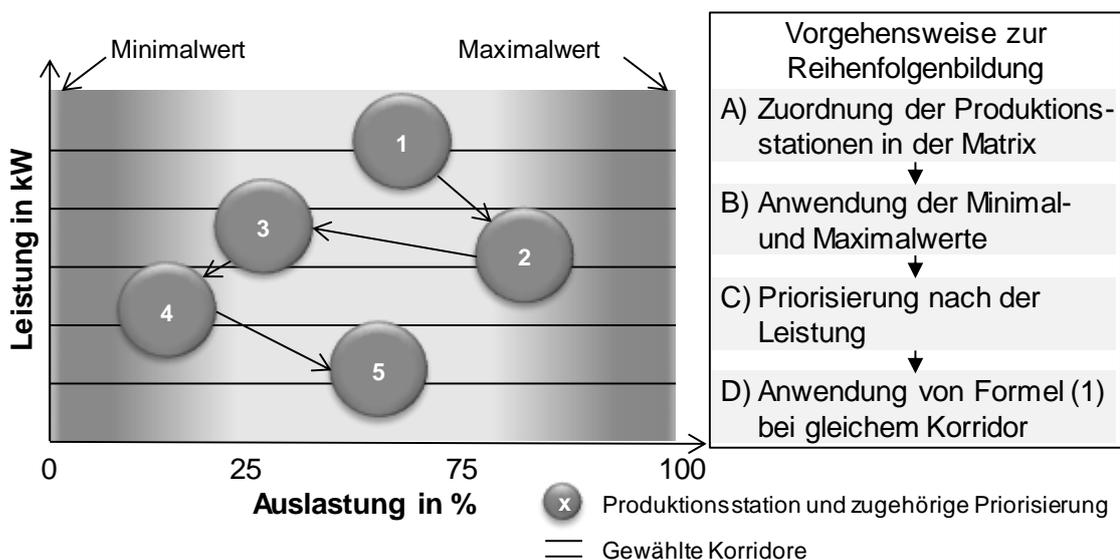


Abbildung 5-4: Vorgehensweise zur Reihenfolgenbildung von Produktionsstationen

### 5.2.2 Identifikation von Energieflexibilitätsmaßnahmen

Nach der Aufstellung einer Reihenfolge der zu untersuchenden Produktionsstationen ist die detaillierte Analyse derer mit dem Ziel einer Identifikation von EFM zu

## 5.2 Identifikation von Energieflexibilität

verfolgen. Hierzu werden Anlagensteckbriefe vorgeschlagen, um mögliche Zustandswechsel (siehe Abschnitt 3.2) beschreiben zu können. Abbildung 10-1 im Anhang zeigt eine mögliche Gestaltung eines Anlagensteckbriefs am Beispiel einer Papiermaschine. Relevante Daten sind dabei u. a.:

- Name und Hauptfunktion der Anlage sowie Verantwortlicher,
- Anschlussleistung, Betriebsstunden und Jahresleistung,
- Bezeichnung der Zustände der Produktionsstation,
- Betriebsstunden und Leistungsniveau je Zustand.

Diese Daten sind oftmals experimentell anhand von Messungen über einen bestimmten Zeitraum zu erheben (REINHARDT 2013). Dabei ist es von Bedeutung, einen repräsentativen Betrachtungszeitraum zu wählen, der trotz der vergangenheitsorientierten Eigenschaft der Daten Schlüsse auf das zukünftige Verhalten des Systems zulässt. Eine Alternative zur Leistungsmessung an allen Produktionsstationen im Produktionssystem könnte die bisher lediglich auf Haushaltsebene angewandte NILM (Non-intrusive load monitoring)-Technologie bieten, die es erlaubt, durch intelligente Messtechnik und maschinelles Lernen aggregierte Leistungsbedarfe auf einzelne Verbraucher aufzuschlüsseln (HART 1992; BATRA ET AL. 2014; GEBBE ET AL. 2017).

Damit können die bereits in Abbildung 3-2 aufgezeigten Zustände von Produktionsstationen detailliert beschrieben werden. Jeder mögliche Wechsel zwischen den ermittelten Zuständen stellt, wie in Abbildung 5-5 illustriert, eine EFM dar. Die Typisierung dieser wurde bereits in Tabelle 3-1 vorgestellt.

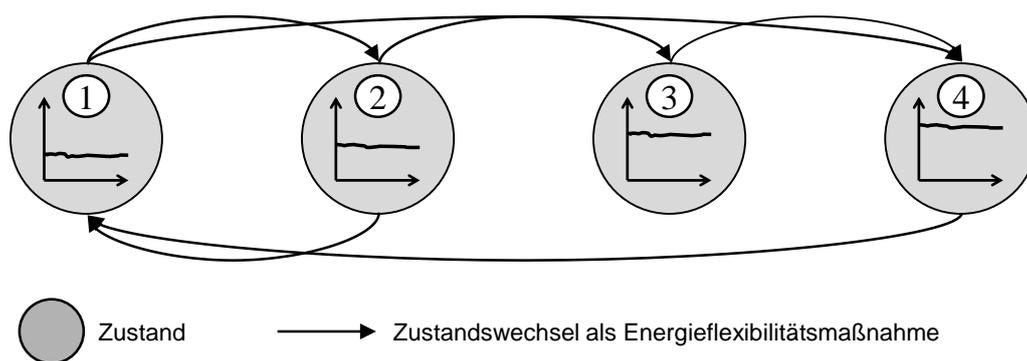


Abbildung 5-5: Zustandswechsel als Energieflexibilitätsmaßnahme in Anlehnung an GRAßL (2015)

Im Weiteren werden die grundlegenden Formalisierungen für die beschriebene Methodik gelegt. Dabei sind insbesondere die Eigenschaften einer EFM nach GRAßL (2015) zu beschreiben.

### 5.2.3 Eigenschaften von Energieflexibilitätsmaßnahmen

Als erste Eigenschaft ist die *Leistungsänderung*  $\Delta P^{EFM}$  zu nennen. Diese ergibt sich aus dem Betrag der Differenz des Leistungsbedarfs  $P$  im Ausgangszustand  $g$  und des Zielzustands  $h$  einer EFM bzw. der betroffenen Produktionsstation und ist in Formel (2) dargestellt.

$$\Delta P^{EFM} = p^h - p^g \quad (2)$$

Des Weiteren werden vier zeitliche Eigenschaften beschrieben. Die *Aktivierungszeit*  $t_{akt}^{EFM}$  gibt die Zeit an, die von dem Moment des Ausführens erster Tätigkeiten zur Nutzung einer EFM bis zum Eintreten des gewünschten Zustands der Produktionsstation vergeht. Die Zeitdauer, die vom Moment der Entscheidung zur Deaktivierung bis zur Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands vergeht, wird als die *Deaktivierungszeit*  $t_{deakt}^{EFM}$  bezeichnet. Die Zeit, die zwischen der Aktivierung und der Deaktivierung einer EFM liegt, ist deren *Verweildauer*. Die *minimale Verweildauer*  $t_{min}^{EFM}$  beschreibt dabei, wie lange eine EFM mindestens aufrechterhalten werden muss. Die *maximale Verweildauer*  $t_{max}^{EFM}$  dagegen gibt an, wie lange maximal im Zielzustand verweilt werden kann.

Ergänzend zu den Eigenschaften nach GRAßL (2015) beschreibt SCHELLMANN (2012) bezüglich allgemeinen Flexibilitätsmaßnahmen eine gewisse Zeitspanne, die sog. *Regenerationszeit*, bis eine Maßnahme nach ihrer Nutzung wieder aktiviert werden kann. SIMON ET AL. (2016B) ergänzen daher in Bezug auf die Energieflexibilität die *Vorbereitungsdauer*  $t_{vo}^{EFM}$ , welche die Zeit beschreibt, die vorbereitende Tätigkeiten, wie z. B. die verstärkte Befüllung eines Puffers, zur Erreichung des Ausgangszustands in Anspruch nehmen. Im Anschluss an die Deaktivierungsdauer ist eine *Nachbereitungsdauer*  $t_{na}^{EFM}$  vorzusehen, die benötigt wird, um den Normalzustand des Produktionssystems wiederherzustellen.

Mithilfe der Formel (3) und unter der Berücksichtigung aller beschriebenen zeitlichen Eigenschaften und der durchschnittlichen Verweildauer einer EFM  $t_{verweil,\emptyset}^{EFM}$  kann die Anzahl der möglichen Wiederholungen einer EFM berechnet werden.

$$\text{Wiederholungen} = \frac{\text{Betriebsstunden im Betrachtungszeitraum} \times 60}{t_{vo}^{EFM} + t_{akt}^{EFM} + t_{verweil,\emptyset}^{EFM} + t_{deakt}^{EFM} + t_{na}^{EFM}} \quad (3)$$

Abbildung 5-6 zeigt beispielhaft die Lastveränderung, die durch das Ausführen einer EFM hervorgerufen wird. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Lastveränderung plötzlich auftritt, da bei der Stromabrechnung vieler Industrien aktuell ein Mittelwert über 15 Minuten gebildet wird (DENA 2010).

## 5.3 Bestimmung der Bewertungsparameter auf Produktionssystemebene

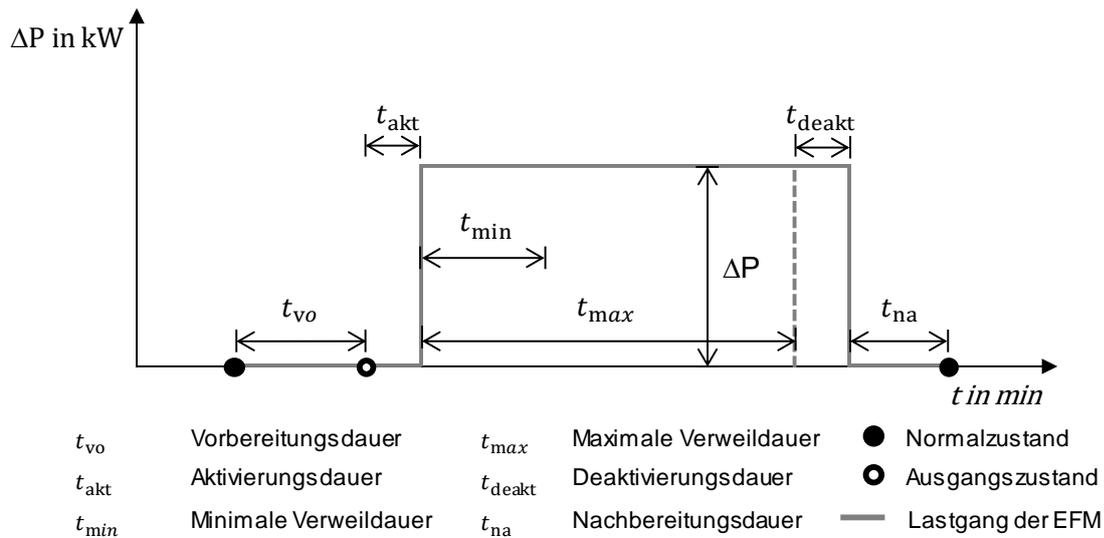


Abbildung 5-6: Eigenschaften einer Energieflexibilitätsmaßnahme nach SIMON ET AL. (2016B)

Zusätzlich wird die Verfügbarkeit von Produktionsstationen bzw. deren EFM als weitere Eigenschaft genannt (DENA 2010; FERNANDEZ ET AL. 2013; GRABL 2015). Die Verfügbarkeit einer EFM entspricht der Verfügbarkeit des Ausgangszustands der Produktionsstation, aus dem diese aktiviert werden kann (GRABL 2015).

## 5.3 Bestimmung der Bewertungsparameter auf Produktionssystemebene

### 5.3.1 Auswahl von geeigneten Ansätzen zur Beschreibung von Wirkzusammenhängen innerhalb eines Produktionssystems

Nach der Beschreibung des Vorgehens zur Identifikation und der Vorstellung der Charakterisierung von EFM werden nachfolgend die Einflüsse der PPS auf diese in einem Wirkgefüge aufgezeigt. Dabei werden die Stellgrößen der PPS, externe und interne Einflüsse sowie die Einflussfaktoren der Energieflexibilität benannt, um die Bewertungsparameter auf Produktionssystemebene und eine Übersicht des komplexen Wirkzusammenhangs zu erstellen.

Vor der Beschreibung der relevanten Wirkgrößen werden geeignete Ansätze zur Erläuterung der Wirkzusammenhänge vorgestellt (siehe Tabelle 5-1). Nach der Auswahl eines Ansatzes wird die Vorgehensweise zur Erstellung des Wirkgefüges von Energieflexibilität innerhalb eines Produktionssystems beschrieben.

## 5 Technische und organisatorische Bewertung von Energieflexibilität

*Tabelle 5-1: Bewertung von geeigneten Ansätzen zur Beschreibung von Wirkzusammenhängen innerhalb eines Produktionssystems*

	Betrachtung von Wirkbeziehungen	Identifizierung von Einflussfaktoren und Zielgrößen	Berücksichtigung endogener und exogener Größen	Betrachtung von Energieeffizienz	Betrachtung von Energieflexibilität
○ Nicht behandelt					
◐ Nicht im Fokus					
● Im Fokus					
Winkler 2007	●	●	○	○	○
Peter 2009	●	●	○	○	○
Jondral 2013	●	◐	○	○	○
Aull 2013	●	◐	○	○	○
Schnellbach 2016	●	●	●	●	○

WINKLER (2007) beschreibt eine Modellierung vernetzter Wirkbeziehungen im Produktionsanlauf. Der Autor erstellt dabei ein Prognosemodell unter Berücksichtigung der Zielgrößen von Anlaufprojekten und generiert mithilfe verschiedener Simulationen geeignete Lösungen der Optimierung. PETER (2009) verfolgt einen Ansatz zur Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in der Kleinserienfertigung und stellt ein Wirkgefüge der zuvor identifizierten Einflussfaktoren und Zielgrößen auf. Darauf aufbauend entwickelt JONDRALE (2013) eine simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung von Lean-Methodeneinsätzen, die das systematische Verhalten eines Produktionssystems in diesem Zusammenhang mithilfe von Materialflusssimulationen untersucht. AULL (2013) entwickelt ein generisches System-Dynamics-Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden. In allen genannten Ansätzen werden Wirkbeziehungen von Größen innerhalb eines Produktionssystems betrachtet. Dabei steht die Identifizierung von Einflussfaktoren und Zielgrößen in unterschiedlichem Ausmaß im Fokus. SCHNELLBACH (2016) erweitert in seiner Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung unter Berücksichtigung von Zielgrößen ganzheitlicher Produktionssysteme die betrachteten Größen um endogene und exogene Faktoren. Im Weiteren stellt die Arbeit des Autors das Themengebiet der Energieeffizienz in den Fokus.

Aufgrund der Berücksichtigung zusätzlicher Größen und im Speziellen der gegebenen Themenverwandschaft der Arbeit von SCHNELLBACH (2016) mit dem Fokus

### 5.3 Bestimmung der Bewertungsparameter auf Produktionssystemebene

auf energetische Untersuchungen innerhalb eines Produktionssystems stellt diese Methodik eine geeignete Basis für die hier vorliegende Arbeit dar. Aufbauend auf den Überlegungen zur Energieeffizienz wird nachfolgend die Weiterentwicklung des Ansatzes zu einem Wirkgefüge von Energieflexibilität beschrieben. Hierbei wird auf den Bewertungsgrößen des genannten Autors aufgebaut und an den notwendigen Stellen neue eingeführt (siehe Abbildung 5-7). Zusätzlich wird die Kategorie der Einflussfaktoren um die der Energieflexibilität ergänzt, um eine Übersicht der identifizierten Einflüsse zu geben. Dadurch gelingt es, die Komplexität der Wirkbeziehungen zu verringern (SIMON ET AL. 2018A).

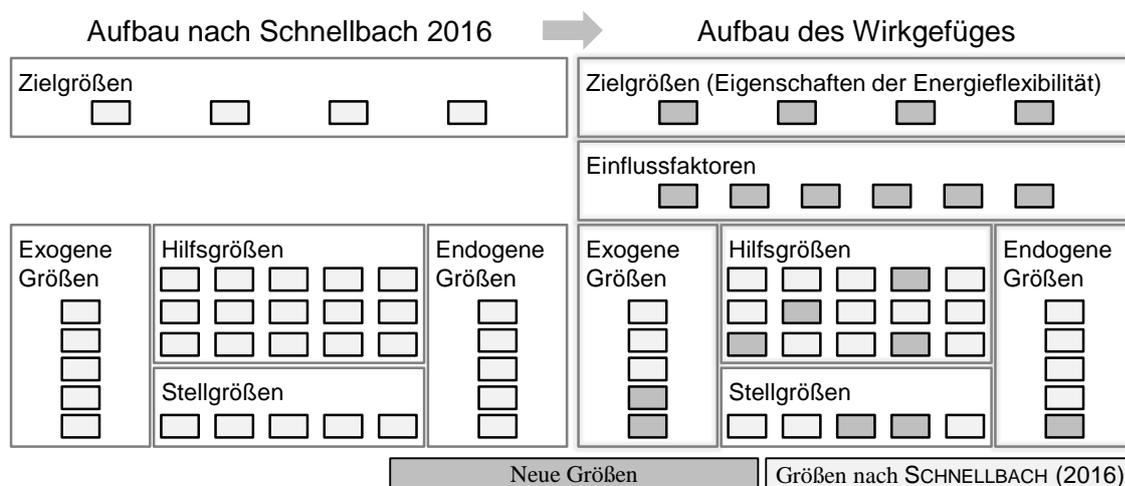


Abbildung 5-7: Kategorien der Größen des Wirkgefüges der vorliegenden Arbeit im Vergleich zu SCHNELLBACH (2016) nach SIMON ET AL. (2018A)

Zur Darstellung der Wirkbeziehungen wird wie bei SCHNELLBACH (2016) der empirische Modellansatz nach WINKLER (2007) gewählt, der aus vernetzten Wirkbeziehungen besteht, durch die Ursachen und Wirkungen besser nachvollziehbar sind. Dabei werden gleichgerichtete (z. B. je höher, desto höher) oder gegenläufige Wirkungen (z. B. je höher, desto niedriger) betrachtet. Damit zusätzlich zu diesen kausalen Zusammenhängen nicht-mathematisch beschreibbare Zusammenhänge dargestellt werden können, wird die dritte Beziehungsart des generellen Zusammenhangs eingeführt (siehe Abbildung 5-10).

#### 5.3.2 Zielgrößen der Bewertung von Energieflexibilität

Im Anschluss werden die Zielgrößen der Bewertung von Energieflexibilität und dessen Einflussfaktoren innerhalb eines Produktionssystems bestimmt. Vorab wird eine übergeordnete Restriktion eingeführt.

Unternehmen verfolgen die Tätigkeiten im Bereich Energieflexibilität überwiegend aus ökonomischen Gründen. Daher ist bei der Bewertung von Energieflexibilität zu beachten, dass Unternehmen eine Lastanpassung nur dann vornehmen werden, wenn andere Ziele, wie z. B. die pünktliche Erfüllung eines Liefertermins, nicht gefährdet sind. Dabei ist eine temporäre Abweichung von logistischen Zielgrößen, wie die Abweichung vom geplanten Durchsatz, denkbar. Allerdings werden in der Literatur häufig Elemente mit einer abschwächenden finalen Wirkung, bspw. Puffer im Materialfluss, genannt (POPP ET AL. 2017). Bei der Bestimmung der konkreten Werte für die Eigenschaften der einzelnen EFM muss diese Restriktion folglich beachtet werden. Beispielhaft kann in den meisten Fällen eine Produktionsstation nur so lange abgeschaltet werden, bis der Auslieferungstermin für ein Endprodukt trotzdem erreicht werden kann bzw. bis die Opportunitätskosten die Energiekosteneinsparungen nicht überschreiten.

GRABL (2015) beschreibt Energieflexibilität mithilfe von sechs Energieflexibilitätsaxiomen und deren drei Flexibilitätsdimensionen (siehe Abschnitt 3.2.2). Diese können, wie in Abbildung 5-8 dargestellt, verschiedenen Ebenen der Bewertung zugeordnet werden. Die Axiome Anzahl und Verteilung der Zustände sind der Zustandsebene zuzuordnen. Alle weiteren Axiome beschreiben direkt einzelne EFM. Dabei fällt auf, dass die Anzahl und Verteilung der Zustände in den meisten Fällen nur durch Veränderung der Produktionsstation, z. B. durch technologische Innovationen und damit mit Investitionen verbunden, geändert werden können. Da die hier vorliegende Bewertung eine Ist-Situationsanalyse vorstellt, ist es folglich nicht möglich, diese zu betrachten. Im Weiteren können einige Axiome, die der Maßnahmenebene zugeordnet sind, ebenfalls durch Investitionen, wie z. B. die Fähigkeit zur Veränderung von Prozessparametern, beeinflusst werden. Jedoch ist auch ohne diese eine Beeinflussung der Energieflexibilität im Sinne der Axiome durch die PPS denkbar. So können durch eine energieorientierte Planung und Steuerung (siehe Abschnitt 3.2.3) die Verweildauern und die Geschwindigkeit der Zustandswechsel beeinflusst werden. Dies geht wiederum durch den Einsatz von EFM vonstatten. Dabei ist auch der kombinierte Einsatz, d. h. die Beeinflussung mehrerer Produktionsstationen, üblich. Beispielhaft kann unter gewissen Voraussetzungen durch den aufeinanderfolgenden Einsatz von EFM die maximale Verweildauer in Summe erhöht werden. Dabei gilt es folglich, die EFM mehrerer Produktionsstationen gleichzeitig bzw. innerhalb eines gewissen Zeitraums zu betrachten. Die Bewertungsebene verschiebt sich dadurch auf die des Produktionssystems. Darüber hinaus gilt, dass sich durch eine solche kombinierte Betrachtung von EFM der Wechsel der Zustände in einem System nicht teurer bzw. günstiger

### 5.3 Bestimmung der Bewertungsparameter auf Produktionssystemebene

gestalten lassen kann. Zusammenfassend müssen folglich alle Energieflexibilitätsaxiome der zeitlichen Dimension bei einer Bewertung der Ist-Situation von Produktionssystemen eingehend analysiert werden (siehe Abbildung 5-8).

Im Weiteren nennt GRABL (2015) die Leistungsänderung als eine zentrale Zielgröße der Bewertung von Energieflexibilität. Da diese ebenfalls direkt EFM zugeordnet werden kann und eine Veränderung der Bewertung auf Produktionssystemebene bei einer kombinierten Betrachtung von EFM bzw. Produktionsstationen vorliegt, wird sie ebenfalls als Zielgröße mit aufgenommen.

Allgemeingültig stellen Zielgrößen der Ist-Situationsbewertung damit Größen dar, die von Seiten des produzierenden Unternehmens und von Seiten des Energiemarktes bewertet und miteinander verglichen werden können. So ist z. B. im Rahmen einer Teilnahme in der Minutenreserveleistung eine maximale Aktivierungsdauer von 15 Minuten (siehe *Tabelle 2-1*) gefordert, die im Anschluss mit der Dauer eines Zustandswechsels verglichen werden kann.

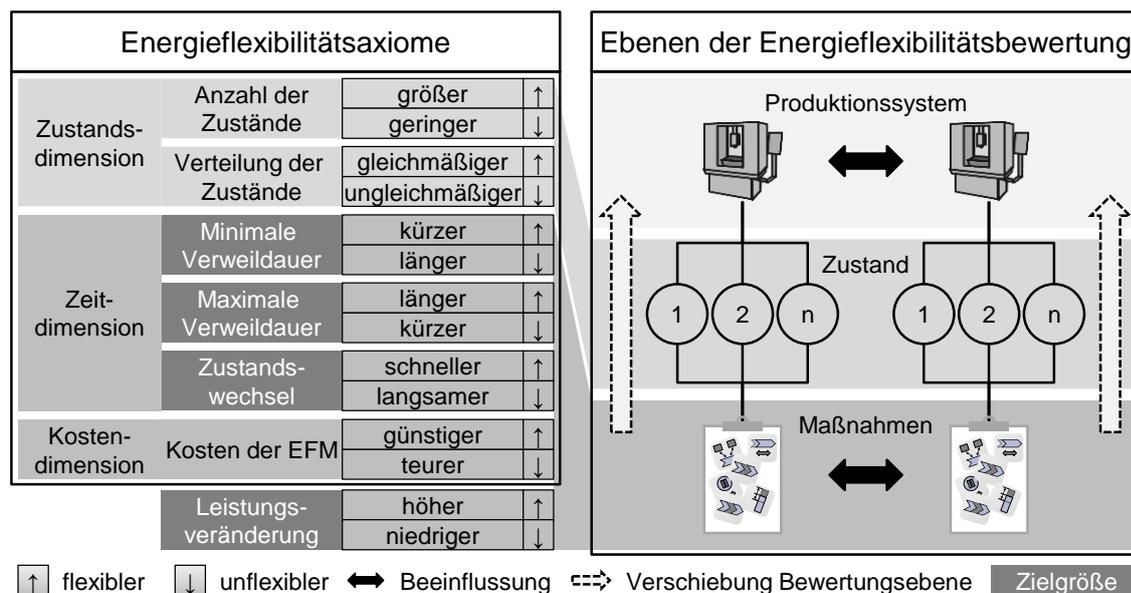


Abbildung 5-8: Ableitung der Zielgrößen der Bewertung von Energieflexibilität auf Produktionssystemebene

Um die Komplexität, die von einem Produktionssystem und der Verknüpfungen der einzelnen darin enthaltenen Größen ausgehen, zu kontrollieren, müssen diese im nächsten Schritt kategorisiert werden. Dies ist erforderlich, um aufbauend darauf die Einflussfaktoren der Energieflexibilität identifizieren zu können.

### 5.3.3 Größen zur Beschreibung des Wirkzusammenhangs

Nachfolgend werden die Größen des Wirkgefüges vorgestellt, die größtenteils auf dem von FORRESTER (1961) eingeführten System Dynamics Ansatz zur Modellierung und Simulation von komplexen dynamischen Systemen beruhen. Dabei können exogene, endogene, Stell- und Hilfsgrößen unterschieden werden.

#### Exogene Größen

Exogene Größen haben zwar von außen einen Einfluss auf das System, werden von diesem jedoch nicht selbst beeinflusst. Dabei sind über längere Zeit konstante Einflüsse genauso beinhaltet wie häufig wechselnde Einflüsse. Da gerade in Bezug auf die Vermarktung von Energieflexibilität die gesetzlichen Rahmenbedingungen große Hindernisse aufweisen (BMWi 2017), werden diese von den Unternehmen als exogener Einfluss wahrgenommen. Sie können in Auflagen bezüglich *Umweltgrenzwerte* und *Arbeitszeitgesetz* unterschieden werden. Im Weiteren sind *vertragliche Regelungen mit dem Energieversorger* zu nennen. Zusätzlich sind in dieser Kategorie Anforderungen aus *Lieferantenverträgen* oder die *Anforderungen der Kunden an Produkte oder Liefertermine* (SCHNELLBACH 2016) hinzuzunehmen (siehe Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2: Exogene Größen des Wirkgefüges

	Wirkgrößen
Exogene Größen	Umweltrecht, Arbeitszeitgesetz, vertragliche Bindung der Energieabnahme, Lieferantenverträge, Kundenverträge

#### Endogene Größen

Die Gruppe der endogenen Größen beschreibt Größen, die innerhalb des Systems vorkommen, jedoch nur indirekt beeinflussbar sind und damit nicht als Stellgröße fungieren (STERMAN 2000). Es handelt sich dabei um jede Art von ungeplanten Unterbrechungszeiten durch *Ausschuss- und Nacharbeitszeiten*, *Kurzstillstands- und Langsamlaufzeiten*, sowie *technische und organisatorische Störungen*. Exogene und endogene Größen sorgen folglich für Unsicherheiten im System (SCHNELLBACH 2016). Zusätzlich ist der *Anfangsbestand* von Lagern und Puffern zu betrachten, da dieser von Handlungen in der Vergangenheit abhängt und von der PPS nur indirekt beeinflusst werden kann.

### 5.3 Bestimmung der Bewertungsparameter auf Produktionssystemebene

Sowohl auf endogene Größen als auch auf exogene Größen können produzierende Unternehmen nur bedingt Einfluss nehmen. Nachfolgend werden die Stellgrößen erläutert, die den Unternehmen zur Beeinflussung zur Verfügung stehen. Eine Übersicht der endogenen Größen ist in Tabelle 5-3 zu finden.

Tabelle 5-3: Endogene Größen des Wirkgefüges

	Wirkgrößen
Endogene Größen	Ausschuss- und Nacharbeitszeit, Kurzstillstand- und Langsamlaufzeit, technische und organisatorische Störzeit, Anfangsbestand

#### Stellgrößen

Stellgrößen sind direkt beeinflussbar, haben unmittelbare Auswirkungen auf das System und sind nicht weiter untergliederbar (PETER 2009). Da der Betrachtungshorizont durch ein Produktionssystem beschrieben ist, werden hier Größen eingeführt, die von der PPS beeinflusst werden können. Alle Größen, die die o. g. Bedingungen erfüllen, sind den Stellgrößen zuzuordnen. Da im Kontext des hier vorliegenden Wirkgefüges die Beeinflussung der Energieflexibilität dargestellt wird, muss folglich jede Stellgröße mit mindestens einer EFM-Art in Verbindung stehen. Tabelle 5-4 kennzeichnet die jeweils möglichen Verbindungen. Einerseits können Stellgrößen die Eigenschaften von EFM beeinflussen, wie bspw. bei der Beeinflussung der maximalen Verweildauer der Anpassung von Prozessparametern durch den aktuellen Bestand des Puffers. Dieser wird wiederum über die Bearbeitungszeit des vor- und nachgelagerten Prozessschrittes bestimmt. Andererseits zeigt die Tabelle auch den Einfluss von EFM auf Stellgrößen auf, wie z. B. durch das Unterbrechen eines Prozesses auf die Bearbeitungszeit pro Stück. Nachfolgend werden die einzelnen Stellgrößen erläutert und jeweils ein kurzes Beispiel für den Zusammenhang mit EFM genannt.

Im Rahmen der Termin- und Kapazitätsplanung erfolgt die Ermittlung des Personalkapazitätsangebots. Je nach geplanter Produktionslaufzeit können hierfür die *Schichtzeiten* an die Nachfrage angeglichen werden (HACKSTEIN 1989). Unter der Berücksichtigung des Arbeitszeitgesetzes (siehe exogene Faktoren) sind unterschiedliche Zeitmodelle anwendbar. Dabei erfordert z. B. die mittelfristige Anpassung von Prozessstarts, wenn diese nicht in die vorgesehenen Schichtzeiten fallen, eine Adaptierung der Zeiten. Zusätzlich umfasst die Kapazitätssteuerung die *Pausenregelung*, die ebenfalls unter Beachtung des Arbeitszeitgesetzes herangezogen werden kann, um die Betriebszeit der Produktion anzupassen (LÖDDING 2016). So

können bspw. die Pausenzeiten die minimale und maximale Verweildauer einer Prozessunterbrechung bestimmen, da Prozesse, die nicht ohne Anwesenheit eines Mitarbeiters weiterlaufen können, währenddessen unterbrochen sind.

Die Stellgröße *Rüstdauer* ist die Vorgabezeit für das Rüsten einer Maschine (SCHNELLBACH 2016). Falls eine Anpassung von Prozessparametern einen zusätzlichen Rüstvorgang erfordert, entsteht dabei eine Abhängigkeit. Als weitere Stellgröße wird die *Wartungszeit* vorgestellt. Diese definiert die Zeit, die für Maßnahmen der Instandhaltung benötigt wird. Im Rahmen der Kapazitätssteuerung lässt sich die Betriebsmittelkapazität u. a. durch das Verschieben von Wartungsarbeiten bzw. das Anpassen von Wartungszeiten flexibilisieren (LÖDDING 2016). Das Unterbrechen von Prozessen kann im Rahmen einer EFM für Wartungsarbeiten genutzt werden. Dabei kann ein Prozess u. U. aus wirtschaftlichen Gründen nur unterbrochen bleiben, solange die Arbeiten anhalten. Als zusätzliche Stellgröße wird die *Bearbeitungszeit* von Produkten bzw. Werkstücken genannt. Diese ist definiert als die Zeit, in welcher eine Produktionsstation wertschöpfend tätig ist (SCHNELLBACH 2016). Einer Anpassung der Maschinenbelegung als EFM folgen unterschiedliche Bearbeitungszeiten, da je nach Anlage unterschiedliche Durchführungszeiten für die Bearbeitungsschritte erforderlich sein können. In diesem Beispiel verändert die Maßnahme folglich die Summe der Bearbeitungszeit einer Produktionsstation. Die Stellgröße *Anlaufzeit* beschreibt die Zeit für den Hochfahrprozess einer Produktionsstation, bis diese für die Produktion bereit ist. Die zusätzlich benötigte Zeit für das Anlaufen muss in der Produktionsplanung berücksichtigt werden, da erst nach der *Anlaufzeit* mit dem eigentlichen Produktionsprozess begonnen werden kann (SCHNELLBACH 2016). So kann bspw. in Abhängigkeit dieser ein Prozess kurzfristig unterbrochen werden. Je kürzer die *Anlaufzeit* ist, desto schneller kann ein Prozess nach einer Unterbrechung wieder hochgefahren werden.

Die Stellgröße *Tagesbedarf* beschreibt die Menge an Produkten, die in einem definierten Zeitraum zu fertigen sind (SCHNELLBACH 2016). Ausgehend von den erteilten Aufträgen, z. B. Kundenaufträge, und den prognostizierten Aufträgen, z. B. Prognoserechnungen durch Marktbeobachtungen, wird im Rahmen der Produktionsprogrammplanung die Art und Menge der zu produzierenden Erzeugnisse festgelegt. Darauf aufbauend wird die herzustellende Menge möglichst gleichmäßig auf die einzelnen Arbeitstage verteilt, woraus sich anschließend der Tagesbedarf ergibt (HACKSTEIN 1989). Beispielfhaft können die kurzfristige und die mittelfristige Anpassung von Prozessstarts und deren Auswirkungen auf den Tagesbedarf

### 5.3 Bestimmung der Bewertungsparameter auf Produktionssystemebene

genannt werden, da ein frühzeitiger bzw. verzögerter Produktionsbeginn gegenüber dem Planprozess zu einer höheren bzw. niedrigeren Menge an produzierten Teilen führt. Die Stellgröße *Anzahl an Varianten* beschreibt die Anzahl an unterschiedlichen Produkten, die in einer Prozesskette bearbeitet werden. Da in der Produktionsprogrammplanung die Grobplanung der zu fertigenden Aufträge erfolgt, wird hier bereits festgelegt, welche Art von Produkten produziert wird (HACKSTEIN 1989). Die Anpassung der Auftragsreihenfolge als EFM muss innerhalb des Auftrags unterschiedliche Varianten erhalten. Je nach Variante benötigt die Anlage einen abweichenden Energiebedarf.

Tabelle 5-4: Beziehungen zwischen Stellgrößen und EFM

EFM		Stellgrößen							
		Schichtzeiten	Pausenzeiten	Rüstdauer	Wartungszeit	Bearbeitungszeit	Anlaufzeit	Tagesbedarf	Anzahl Varianten
	Mittelfristige Anpassung von Prozessstarts								
	Kurzfristige Anpassung von Prozessstarts								
	Anpassung der Maschinenbelegung								
	Anpassung der Auftragsreihenfolge								
	Anpassung von Pausenzeiten								
	Anpassung von Schichtzeiten								
	Unterbrechung von Prozessen								
	Anpassung von Prozessparametern								

Maßnahme beeinflusst Stellgröße
  Stellgröße beeinflusst Eigenschaft der EFM
  Beides

#### Hilfsgrößen

Die Gruppe der Hilfsgrößen kann durch exogene, endogene und Stellgrößen beeinflusst werden. Durch die weitere Untergliederung der Größen trägt diese Kategorie zur vereinfachten Darstellung des komplexen Wirkverlaufs und damit zur

Übersichtlichkeit des dargestellten Systems bei, bspw. spiegeln sich die Abhängigkeiten der Rüst-, Wartungs-, und Bearbeitungszeit in der Zykluszeit wider (PETER 2009). Eine Übersicht der entsprechenden Größen ist in Tabelle 5-5 dargestellt.

Tabelle 5-5: *Hilfsgrößen des Wirkgefüges*

	Wirkgrößen
Hilfsgrößen	Tägliche Arbeitszeit, Konzentration, Umlaufbestand, Produktionskapazität, Qualitätsgrad, Rüstzeit, ungeplante Betriebsstörzeiten, geplante Produktionszeit, Betriebszeit, Leistungsgrad, tägliche Produktionslaufzeit, Zykluszeit, produzierte Teile, nutzbare Betriebszeit, Produktivzeit

### 5.3.4 Einflussfaktoren der Zielgrößen für die Bewertung von Energieflexibilität

Zusätzlich zu den im letzten Abschnitt beschriebenen Größen des System Dynamics-Ansatzes wird die Kategorie der Einflussfaktoren von Energieflexibilität eingeführt (siehe Tabelle 5-6). Diese fasst die Wirkung aller bisher genannten Größen noch einmal zusammen, um ein generisches Bild der Einflüsse der Energieflexibilität von Produktionssystemen zu generieren. Neben dem im nächsten Abschnitt beschriebenen Wirkgefüge stellt dies folglich das zentrale Ergebnis der Analyse dar.

#### Qualität

Der Begriff Qualität wird nach DIN 55350 als „*die Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen*“ definiert. Eine Einheit kann dabei nach Wendehals (2000) „*eine Tätigkeit, ein Prozess oder ein materielles oder immaterielles Produkt*“ sein. Ziel der Produktqualität ist es, den Ansprüchen der Kunden bezüglich der Produkteigenschaften zu entsprechen (HOPP UND SPEARMAN 2001). Die Auswirkungen von Zustandsänderungen auf die Qualität des End- oder Zwischenproduktes sind ein häufig wiederkehrender Faktor des Flexibilitätpotenzials. So kann ein Bearbeitungsprozess bspw. nur dann unterbrochen werden, wenn dies ohne negative Auswirkungen auf die Produktqualität bleibt (LANGROCK ET AL. 2015).

## **5.3 Bestimmung der Bewertungsparameter auf Produktionssystemebene**

---

### **Lagerbestand**

Nach SCHUH (2007) werden Lagerbestände vorgehalten, um eventuelle Bedarfschwankungen des Abnehmers kompensieren zu können bzw. um nicht auf die Termintreue des Lieferanten angewiesen zu sein. Im Rahmen der Energieflexibilität können diese Bestände genutzt werden, um auf lang- und mittelfristige Anpassungen der Produktion auf schwankende Energiepreise zu reagieren. Beispielhaft beschreiben SIMON UND DATZMANN (2016) die Energiekostenreduzierung durch eine saisonale Lastverschiebung von Graphitierungsöfen zur Nutzung der Preisunterschiede von elektrischem Strom im Winter und im Sommer. Dabei wird im Sommer die Produktion und damit der Lagerbestand erhöht und im Winter – bei hohen Energiepreisen – reduziert.

### **Pufferbestand**

Einem Lager kommt eine Pufferfunktion zu, sobald eine zeitliche Überbrückung zwischen der Warenverfügbarkeit und dem Bedarf stattfindet (EHRMANN 2005). Nach dem Begriffsverständnis dieser Arbeit befinden sich die Puffer zwischen den Produktionsstationen eines Produktionssystems. Lager sind dagegen vor und nach den Produktionssystemen positioniert. Der Pufferbestand hängt im Wesentlichen vom Umlaufbestand ab, der die Summe aus den Pufferbeständen und den aktuell in der Anlage befindlichen Teilen darstellt (LÖDDING 2016). Im Rahmen der Nutzung von EFM stellen Pufferbestände oftmals die zentralen Voraussetzungen für die Entkopplung des Materialflusses dar. Um z. B. eine Produktionsstation abschalten zu können, müssen ausreichende Pufferbestände eine weitere Beeinflussung anderer Produktionsstationen häufig verhindern (REINHART UND SCHULTZ 2014).

### **Kapazitätsauslastung**

Die Kapazitätsauslastung beschreibt die tatsächliche Produktionsmenge eines Produktionssystems im Verhältnis zur erreichbaren Produktionsmenge bei maximaler Auslastung und damit den Spielraum der Kapazitätssteuerung, die Menge an produzierten Teilen zu variieren (BREITHAUPT 2001; DYCKHOFF UND SPENGLER 2010). Viele EFM sind an freie Kapazitäten gebunden, so kann bspw. bei ausreichenden Spielräumen der Startzeitpunkt eines Auftrags verschoben werden, um kurzfristig steigende Energiepreise zu vermeiden (REINHART ET AL. 2012).

### **Personalkapazität**

Neben der Kapazitätsauslastung erlauben die Personalkapazitäten ein mengenflexibles Verhalten von Produktionssystemen (SETHI UND SETHI 1990). Die Flexibilität der Personalkapazitäten setzt sich aus vier Komponenten zusammen: der Arbeitszeitflexibilität, der Flexibilität der Arbeitsgeschwindigkeit, der Flexibilität bei der Einstellung bzw. Entlassung von Mitarbeitern sowie der Mehrfachqualifizierung. Die Arbeitszeit wird im Wesentlichen durch die geplanten Schichtzeiten festgelegt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Schichtzeiten nicht gegen das Arbeitszeitgesetz verstoßen. Von der Flexibilität der Arbeitsgeschwindigkeit wird meist abgesehen, da eine mögliche Überlastung von Mitarbeitern negative Auswirkungen auf die Qualität der Produkte haben kann. Über die Einstellung und Entlassung wird die Anzahl an Mitarbeitern bestimmt. Durch die Mehrfachqualifizierung von Mitarbeitern können diese unterschiedliche Tätigkeiten ausüben und so z. B. verschiedene Maschinen bedienen (LÖDDING 2016). Diese Flexibilitäten sind oftmals die Befähiger bspw. für die Änderungen der Maschinenbelegung im Rahmen einer EFM (GRAßL 2015), da eine ausreichende Kapazität der entsprechend geschulten Mitarbeiter vorhanden sein muss.

### **Sicherheit**

Die Sicherheit von Produktionssystemen umfasst grundsätzlich die Richtlinien zur Arbeitssicherheit und zum Gesundheitsschutz. Durch sicheres Gestalten von Anlagen, Einrichtungen und Arbeitsbedingungen wird ein unfallfreies und gesundes Arbeiten erzielt (CONRAD 2016). Im Zusammenhang mit Energieflexibilität sind bestimmte EFM nur dann auszuführen, wenn die Sicherheit der Änderung im Produktionsablauf gewährleistet ist. REINHART ET AL. (2012) beschreiben z. B. die Beeinflussung des Lastgangs eines Schweißprozesses, welche die zeitgleiche Steuerung der zugehörigen Absauganlage erfordert, um einer Gefährdung der Mitarbeiter durch schädliche Dämpfe vorzubeugen.

### **Verträge und Gesetze**

Der Einflussfaktor Verträge und Gesetze fasst alle Einflüsse, die aus Verträgen mit Kunden und Lieferanten und im Speziellen mit Energieversorgern sowie Gesetzen aus Bereichen wie dem Umweltrecht und Arbeitszeitgesetzen entstehen, zusammen. Beide Bereiche setzen oftmals Grenzen bei der Ausübung vorhandener Flexibilität. Zu beachten ist dabei, dass Verträge von kurzfristigerer Natur sind, da diese mittelfristig direkt über die Verhandlung mit dem jeweiligen Partner beeinflusst werden können.

## 5.3 Bestimmung der Bewertungsparameter auf Produktionssystemebene

Tabelle 5-6: Einflussfaktoren der Zielgrößen von Energieflexibilität

	Wirkgrößen
Einflussfaktoren der Zielgrößen von Energieflexibilität	Qualität, Lagerbestand, Pufferbestand, Kapazitätsauslastung, Personalkapazität, Sicherheit, Verträge und Gesetze

Nach der Beschreibung aller Größen des Wirkgefüges wird dieses nachfolgend erläutert.

### 5.3.5 Wirkgefüge der Energieflexibilität innerhalb eines Produktionssystems

Ziel des Wirkgefüges<sup>6</sup> ist es, dem Anwender eine Übersicht über die Auswirkungen von Änderungen im Arbeitsbereich der PPS bezüglich der Energieflexibilität eines Produktionssystems zu geben. Hierzu werden die vorgestellten endogenen, exogenen Faktoren und Stellgrößen miteinander verbunden und deren Wirkung über Hilfsgrößen und Einflussfaktoren auf die Energieflexibilität beschrieben. Beispielhaft werden in Abbildung 5-9 die Wirkzusammenhänge des Einflussfaktors Personalkapazität beschrieben. Das vollständige Wirkgefüge ist im Anschluss in Abbildung 5-10 dargestellt.

Im Beispiel wird die Personalkapazität von den zwei Stellgrößen Schicht- und Pausenzeit gleichgerichtet bzw. entgegengerichtet beeinflusst. Die Rahmenbedingungen für die Gestaltung der Stellgrößen durch die PPS sind durch das am jeweiligen Standort des Unternehmens gültige Arbeitszeitgesetz gegeben. Durch eine Verlängerung der Schichtzeit und einer daraus folgenden Erhöhung der Personalkapazität kann es zu einer möglichen Verlängerung der maximalen Verweildauer einer EFM kommen. Falls die betrachtete EFM in ihrer Durchführung von der Abwesenheit von Personal abhängig und beschränkt war, kann diese nun länger ausgeführt werden. Gleichzeitig kann eine Erhöhung der Personalkapazität zu einer Verminderung der Aktivierungs- bzw. Deaktivierungsdauer führen, da die mit der Aktivie-

---

<sup>6</sup> Zur Erstellung des Wirkgefüges wurden in Untersuchungen mit mehreren Industrieunternehmen die entsprechenden Größen der jeweiligen Produktion aufgenommen. Anschließend gelang es in einem gemeinsamen Workshop, die spezifischen Einflüsse in allgemeingültige Formulierungen zu überführen und damit Dopplungen zu minimieren sowie eine Kategorisierung der Ergebnisse vorzunehmen. Mithilfe einer parallel stattfindenden Literaturanalyse konnten diese Ergebnisse validiert und anschließend in das Wirkgefüge überführt werden.

## 5 Technische und organisatorische Bewertung von Energieflexibilität

rung oder Deaktivierung der EFM verbundenen Tätigkeiten evtl. schneller ausgeführt werden. Das Wirkgefüge zeigt damit dem Nutzer die Information über mögliche Änderungen der Energieflexibilität bei einer Änderung der betroffenen Stellgrößen an. Dieser kann anschließend die entsprechenden Konsequenzen daraus ziehen.

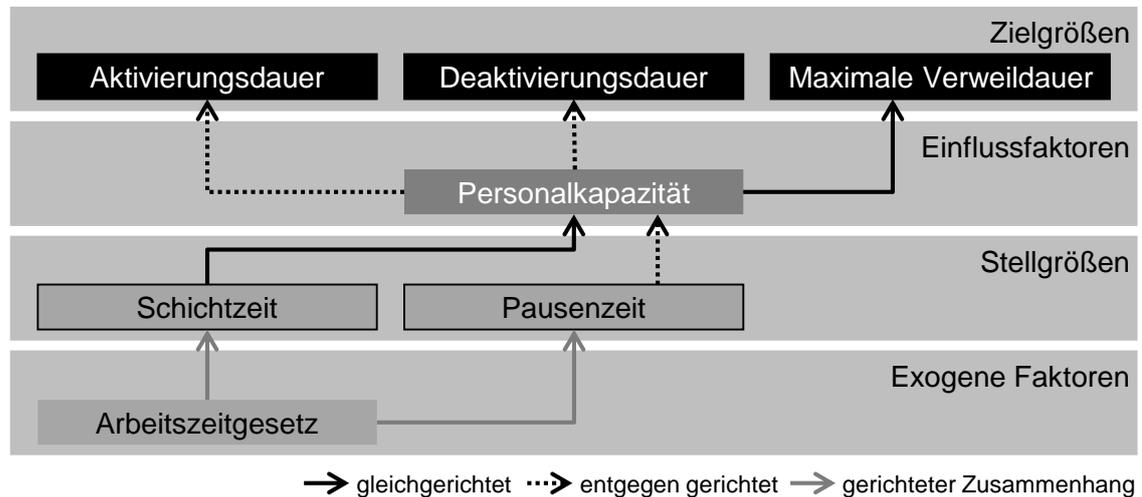


Abbildung 5-9: Wirkzusammenhänge der Stellgröße Personalkapazität

Nachfolgend ist das Wirkgefüge der Energieflexibilität innerhalb eines Produktionssystems in Abbildung 5-10 dargestellt. Dabei werden als Zusammenfassung des Abschnitts 5.3 und speziell bei Betrachtung der Zielgrößen und deren Beeinflussung drei Punkte ersichtlich:

- Die Leistungsveränderung hebt sich deutlich von allen anderen Zielgrößen ab und muss aus diesem Grund bei der Bewertung separat betrachtet werden.
- Die restlichen Zielgrößen lassen sich als zeitliche Eigenschaften von EFM zusammenfassen und können mit einem ähnlichen Vorgehen bewertet werden.
- Die Zusammenhänge der Wirkgrößen zeigen die komplexen Abhängigkeiten innerhalb eines Produktionssystems auf und führen zu der Notwendigkeit einer kombinierten Betrachtung von Produktionsstationen bzw. EFM.

### 5.3 Bestimmung der Bewertungsparameter auf Produktionssystemebene

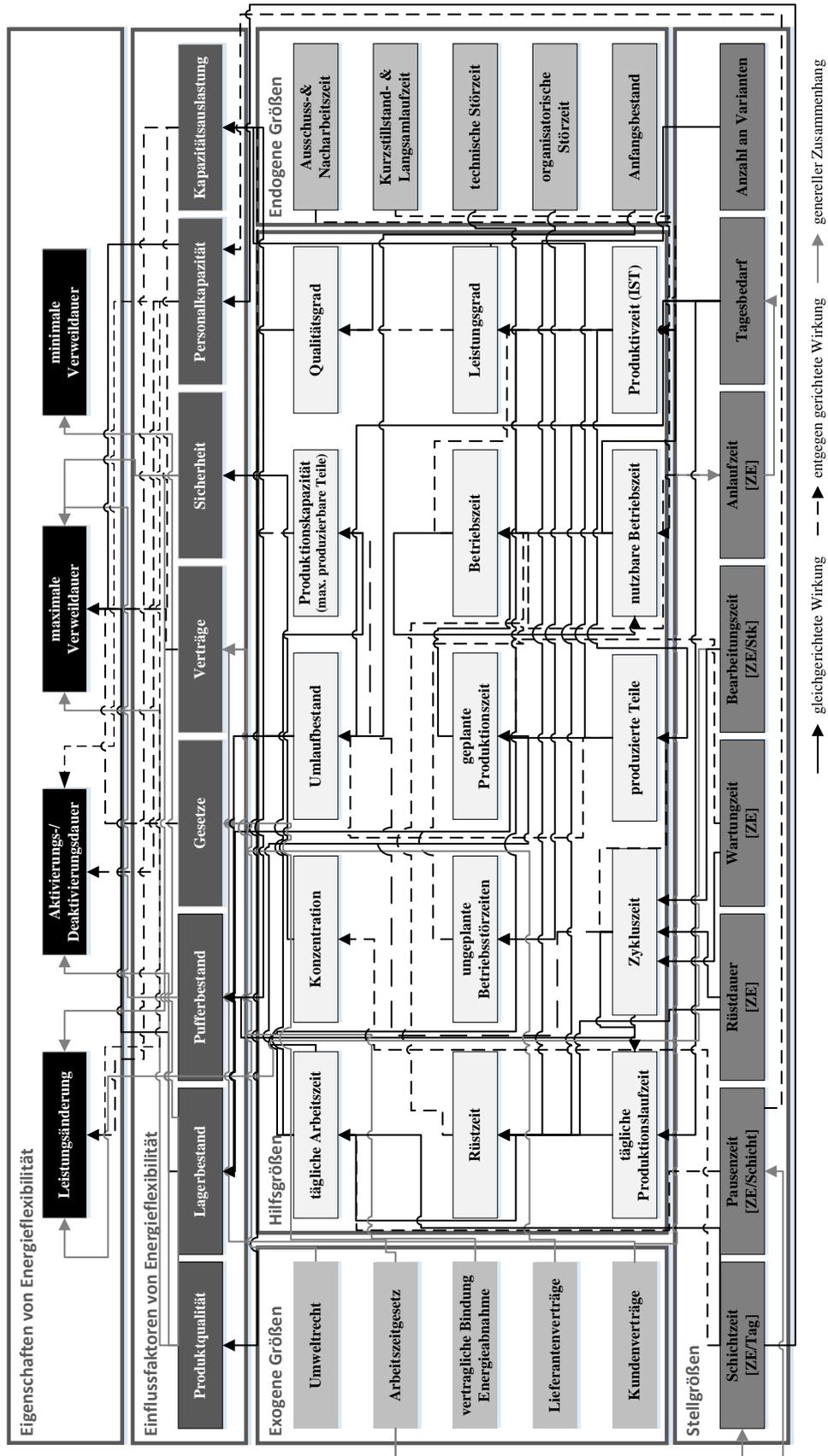


Abbildung 5-10: Wirkgefüge der Energieflexibilität von Produktionssystemen (SI-MON ET AL. 2018A)

## 5.4 Kategorisierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen

### 5.4.1 Parallele und sequenzielle Energieflexibilitätsmaßnahmenbündel (EFMB)

Die Ausführungen in Abschnitt 5.3 haben gezeigt, dass für eine Bewertung von Energieflexibilität auf Produktionssystemebene eine kombinierte Betrachtung von Produktionsstationen unumgänglich ist. Da Energieflexibilität in der Umsetzung auf konkreten EFM beruht, hat dies eine kombinierte Betrachtung von EFM zur Folge und wird daher im Weiteren als Energieflexibilitätsmaßnahmenbündel (EFMB) bezeichnet.

Ein EFMB besteht aus mindestens zwei EFM. Die Durchführung erfolgt durch die Abstimmung der Zustände der betroffenen Produktionsstationen aufeinander (SIMON ET AL. 2016B; SIMON ET AL. 2017A). Dabei müssen die einzelnen EFM unterschiedlichen Produktionsstationen zugeordnet sein, da bei einer betrachteten Produktionsstation zu einem bestimmten Zeitpunkt grundsätzlich nur ein Zustandswechsel durchgeführt werden kann. In Abbildung 5-11 wird beispielhaft die Bildung eines EFMB und damit die Abstimmung der Zustände von zwei Produktionsstationen aufeinander dargestellt.

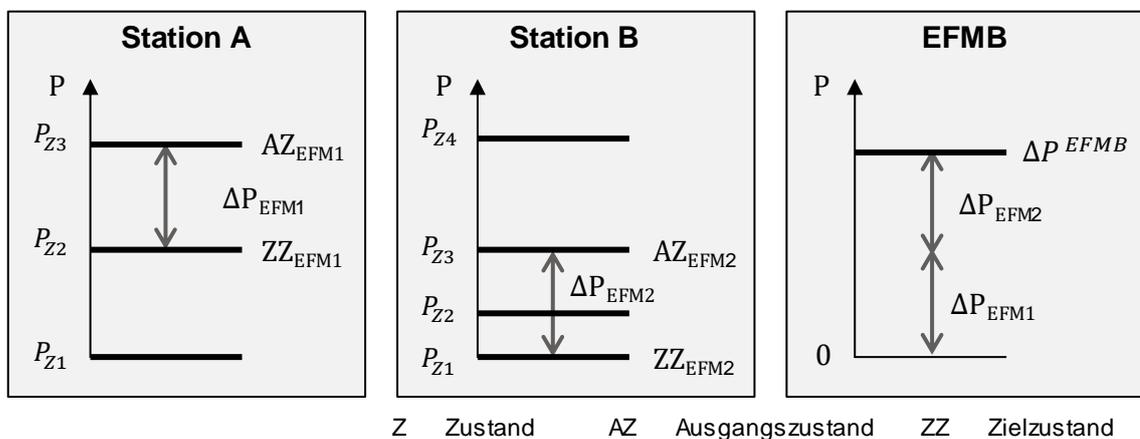


Abbildung 5-11: Leistungsänderung von zwei EFM und dem daraus hervorgehenden EFMB nach SIMON ET AL. (2016a)

Bei Produktionsstation A wurden in diesem Beispiel drei Zustände und bei Produktionsstation B vier Zustände identifiziert, die mit ihrem jeweiligen Leistungsniveau in den Diagrammen dargestellt sind. Zusätzlich sind dabei die Leistungsänderungen einer EFM pro Produktionsstation aufgezeigt. Diese ergibt sich aus der Differenz des Ausgangszustands und des Zielzustands der jeweiligen EFM.

## 5.4 Kategorisierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen

Das dritte Diagramm spiegelt das Leistungsniveau des EFMB wider. In diesem Beispiel ergibt sich dieses aus der Summe der Leistungsänderungen der beiden EFM (SIMON ET AL. 2016A).

In dem Beispiel zur Einführung von EFMB liegt eine parallele Überschneidung der Leistungsänderungen vor, weshalb dieses als paralleles EFMB bezeichnet wird. Es ist jedoch auch eine sequenzielle Ausführung der EFM denkbar. In einem sequenziellen EFMB überschneiden sich die EFM zeitlich lediglich in den Aktivierungs- oder Deaktivierungsphasen. Daraus ergeben sich die zwei in Abbildung 5-12 dargestellten Kategorien von EFMB.

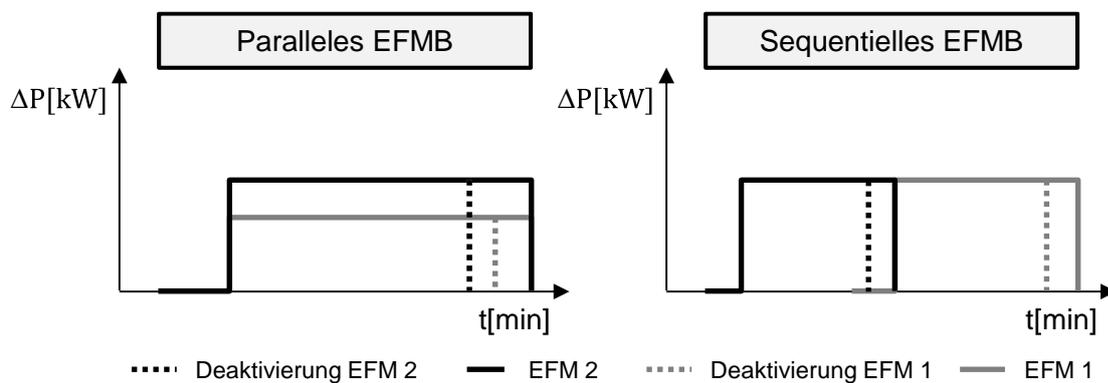


Abbildung 5-12: Beispiel eines parallelen und sequenziellen EFMB nach SIMON ET AL. (2016a)

EFMB werden in dieser Form durch die PPS in Fabriken umgesetzt. Daher ist es bereits in einer frühen Phase erforderlich, diese mit in die Bewertung heranzuziehen. Dabei ist es aufgrund der in Abbildung 5-10 aufgezeigten Komplexität mit hohem Aufwand für den Anwender verbunden, alle theoretisch möglichen EFMB zu betrachten. Vielmehr muss ein strukturiertes Vorgehen aufgezeigt werden, diese zu identifizieren und zu bewerten, um ausgewählte EFMB zur Anwendung durch die PPS empfehlen zu können. Eine Vorgehensweise zur Bündelung von EFM muss folglich die Ausrichtung auf die Vermarktung dieser sicherstellen. Dadurch gelingt eine Priorisierung der Tätigkeiten des Anwenders.

Durch die nahezu zeitgleiche Ausführung mehrerer EFM sind parallele EFMB dazu geeignet, die Leistungsänderung zu erhöhen. Da in einigen Marktmodellen Mindestwerte für den Zugang zu Produkten des Energiemarkts vorgegeben sind (siehe z. B. Tabelle 2-1), können durch eine solche Verknüpfung EFM zu einer Vermarktung befähigt bzw. bezüglich der zu reduzierenden Energiekosten aufgrund des direkten Zusammenhangs zur Leistungsänderung verbessert werden. Ein ähnlicher Zusammenhang ergibt sich bezüglich der zeitlichen Eigenschaften

von EFM bzw. EFMB. Dabei ist festzustellen, dass grundsätzlich für die Zeiten der Zustandswechsel und der minimalen Verweildauer kürzere Zeiten von Vorteil sind und für die maximale Verweildauer hingegen längere Zeiten. Zusammenfassend ergeben sich somit sowohl für EFM als auch für EFMB externe Vorgaben, die den jeweiligen Eigenschaften gegenüberstehen.

Die externen Grenzwerte können vom Anwender der Methode frei gewählt werden, je nachdem welche Energiemarktprodukte im Fokus stehen sollen. Die variable Gestaltung dieser Werte ist ebenfalls aus Sicht der häufigen Änderung der Produkte auf dem Energiemarkt sinnvoll, da nur dadurch eine Anpassung der Methodik an aktuelle Entwicklungen möglich wird.

### 5.4.2 Verfügbarkeit von Energieflexibilitätsmaßnahmenbündeln

Der Verfügbarkeit von EFMB (siehe Abschnitt 5.2.3) kann keine externe Vorgabe zugeteilt werden, da diese aktuell in keinem Produkt des Energiemarktes gefordert wird. Da zur Bewertung der Eigenschaft von EFM grundsätzlich ein solcher Wert als Normwert von Nöten ist, kann die Verfügbarkeit nicht den Zielgrößen der Energieflexibilität zugeordnet werden. Um dennoch die praktische Anforderung einer möglichst hohen Verfügbarkeit einer EFMB zu erfüllen, wird ein interner Grenzwert eingeführt, der durch den Anwender frei gewählt werden kann. Dieser überprüft, ob sich die betrachtete Produktionsstation ausreichend lange im gewünschten Ausgangszustand befindet. Je höher der Wert gewählt wird, desto mehr EFM fließen in die Bewertung mit ein, da jede EFM mit einem niedrigeren Wert als dem Grenzwert noch vor der Bündelung ausgeschlossen wird.

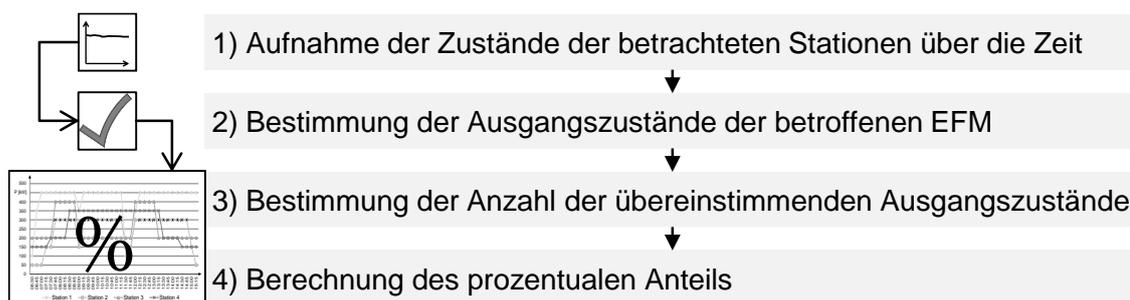


Abbildung 5-13: Vorgehen zur Ermittlung der Verfügbarkeit von EFMB

Die Berechnung des Werts eines EFMB gelingt anhand der in Abschnitt 5.2.2 bereits beschriebenen Betrachtung von Zuständen der jeweiligen Produktionsstation über die Zeit. Hierzu wird der gesamte Messzeitraum in möglichst viele Abschnitte

## 5.4 Kategorisierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen

gleicher Größe, z. B. 15 Minuten, unterteilt. Dabei entsteht ein wert- und zeitdiskretes Leistungsprofil. Im nächsten Schritt erfolgt die Auswahl der betroffenen Ausgangszustände der EFM, die anschließend bezüglich ihrer Anzahl der zeitlichen Übereinstimmungen überprüft werden. Daraus wird anschließend der prozentuale Anteil der Verfügbarkeit berechnet (siehe Abbildung 5-13).

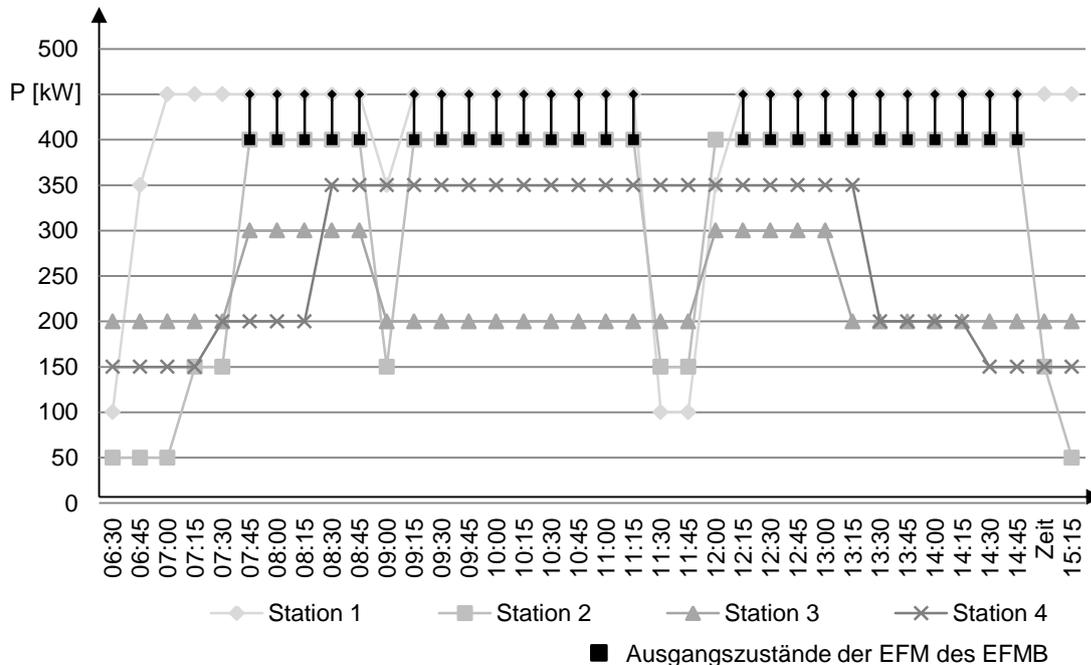


Abbildung 5-14: Beispielhafte Darstellung der Zustände von vier Produktionsstationen zur Ermittlung der Verfügbarkeit eines parallelen EFMB

Abbildung 5-14 verdeutlicht den Zusammenhang an einem vereinfachten Beispiel von vier Produktionsstationen, die jeweils mehrere Zustände einnehmen können. Einem EFMB bestehend aus einer EFM der Produktionsstation 1 mit dem Ausgangszustand von 450 kW und einer EFM der Produktionsstation 2 mit dem Ausgangszustand von 400 kW würde damit im beispielhaften Betrachtungszeitraum einer Schicht eine Verfügbarkeit des EFMB von 69,44 % zugeordnet werden, da sich diese in genannter Häufigkeit überschneiden. Die dazugehörigen Zustände sind schwarz markiert. Die Berechnung der Verfügbarkeit eines sequenziellen EFMB erfolgt durch Berechnung der zeitlich nicht übereinstimmenden Ausgangszustände.

### 5.4.3 Energieflexibilitätsmaßnahmenkataloge

Wie bereits erläutert, ist es aus Gründen eines übermäßigen Aufwands für den Anwender der Methode wenig zielführend, alle möglichen EFM eines Produktionssystems zu identifizieren und auf eine mögliche Bündelbildung zu überprüfen. Daher werden nachfolgend zwei Kategorien von EFM vorgestellt, um darauf aufbauend eine Priorisierung der Tätigkeiten des Anwenders zu ermöglichen.

Die erste Kategorie stellen die EFM dar, die dem *Basismaßnahmenkatalog* zugeordnet werden. Dieser besteht aus EFM, die bis auf definierte Ausnahmen die externen Grenzwerte erfüllen. Zur Identifizierung dieser wird nun wie im Abschnitt 5.2 erläutert vorgegangen und die EFM der Produktionsstation mit der höchsten Priorität ausgewählt. Im Anschluss an die in Abschnitt 5.3 beschriebene Bewertung der EFM können die Werte mit den externen Grenzwerten<sup>7</sup>  $\Delta P^{ext}$ ,  $t_{akt}^{ext}$ ,  $t_{deakt}^{ext}$ ,  $t_{min}^{ext}$ ,  $t_{max}^{ext}$  abgeglichen werden. Zunächst ist dabei die Leistungsänderung  $\Delta P^{EFM}$  zu überprüfen. Hierbei ist jedoch eine anwenderspezifisch zu definierende Toleranz  $\varphi$  zu berücksichtigen, um leicht abweichende Werte nicht grundsätzlich auszuschließen. Der Vergleich erfolgt gemäß den Formeln (4) und (5). Dabei ist eine Fallunterscheidung notwendig, da die Größe einen positiven oder negativen Wert annehmen kann.

$$\Delta P^{EFM} \geq (1 - \varphi)\Delta P^{ext}; \Delta P^{ext} \geq 0 \quad (4)$$

$$\Delta P^{EFM} \leq (1 - \varphi)\Delta P^{ext}; \Delta P^{ext} \leq 0 \quad (5)$$

Im Weiteren sind die vier zeitlichen Größen gemäß den Formeln (6), (7), (8) und (9) zu prüfen.

$$t_{akt}^{EFM} \leq t_{akt}^{ext} \quad (6)$$

$$t_{deakt}^{EFM} \leq t_{deakt}^{ext} \quad (7)$$

$$t_{min}^{EFM} \leq t_{min}^{ext} \quad (8)$$

$$t_{max}^{EFM} \geq t_{max}^{ext} \quad (9)$$

Anschließend werden alle EFM in den Basismaßnahmenkatalog aufgenommen, die die jeweiligen Kriterien bezüglich der Leistungsänderung und zeitlichen Eigenschaften erfüllen. Zusätzlich werden diejenigen EFM mit aufgenommen, die

---

<sup>7</sup> Externe Grenzwerte stammen von Vorgaben der Produkte des Energiemarktes. Beispielhaft sind solche Werte der Tabelle 2-1 zu entnehmen.

## 5.4 Kategorisierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen

---

maximal eine der geforderten Eigenschaften nicht erfüllen, um im Anschluss eine mögliche Erfüllung in Kombination mit weiteren EFM zu prüfen.

Zur Kombination von EFM zu einem EFMB vor dem Hintergrund einer Verbesserung derer Eigenschaften werden weitere EFM einem *Kombinationsmaßnahmenkatalog* zugeordnet. Grundsätzlich sind diesem Katalog alle EFM zuzuordnen, die nicht in den Basismaßnahmenkatalog aufgenommen wurden. Das Bewertungsvorgehen muss dabei zur Reduzierung des Aufwands sicherstellen, dass nicht jede mögliche Kombination vollzogen wird. Zusätzlich werden in dem Vorgehen weitere EFM von zusätzlichen Produktionsstationen identifiziert, um die Chance einer Bündelbildung, die alle nötigen Kriterien erfüllt, zu erhöhen. Alle ausreichend bewerteten EFM und EFMB werden dem *finalen Maßnahmenkatalog* zugeordnet, dieser wird anschließend im Kapitel 5.5 aufgegriffen. Anschließend wird die Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung durchgeführt.

Bevor diese Bewertungsvorgehen und die dabei notwendigen Kriterien erläutert werden, gilt es nachfolgend, die Eigenschaften von Wechselwirkungen zu beschreiben.

### 5.4.4 Wechselwirkungen von Energieflexibilitätsmaßnahmen

Wunsch (2000) stellt in seiner Arbeit zu den Grundlagen der Prozesstheorie und dabei insbesondere der Struktur und dem Verhalten dynamischer Systeme in Technik und Naturwissenschaft fest, dass bei der Betrachtung von Verhaltensklassifizierungen dynamischer Systeme – und damit von Produktionssystemen (siehe Abschnitt 2.2) – Wechselwirkungen auftreten. Diese gehören zu den fundamentalen Eigenschaften eines Prozesses und können mithilfe von temporalen (inneren) und kooperativen (äußeren) Wechselwirkungseigenschaften charakterisiert werden (DÄUBLER 2005). In Abbildung 1-3 wird der Betrachtungsrahmen der Arbeit auf den des Produktionssystems begrenzt, sodass äußere kooperative Wechselwirkungen in dieser Arbeit nicht betrachtet werden. Der Fokus liegt vielmehr auf den inneren temporalen Wechselwirkungen und damit auf dem Zusammenhang zwischen Prozessvergangenheit und -zukunft (WUNSCH 2000). Innerhalb des in Abbildung 5-10 dargestellten Wirkgefüges sind diese bezüglich der in der Vergangenheit festgelegten Wirkungszusammenhänge, der in der Gegenwart ausgeführten Änderung der Stellgröße und der zukünftigen Auswirkungen auf die Zielgrößen erkennbar.



## 5.4 Kategorisierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen

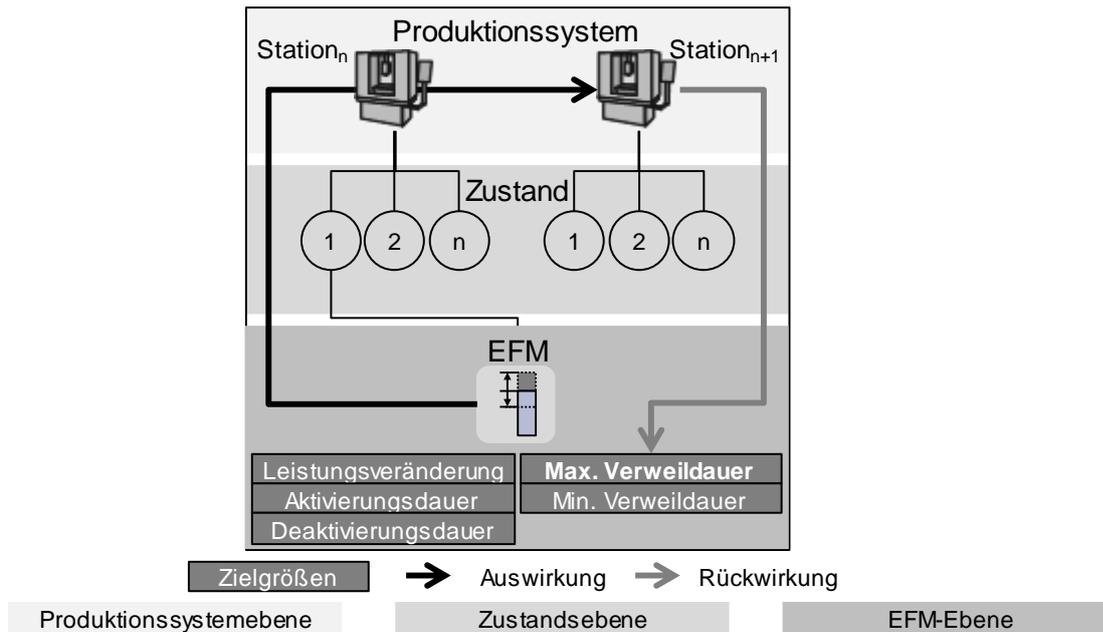


Abbildung 5-16: Auswirkung und Rückwirkung einer EFM im Materialfluss auf den verschiedenen Ebenen der Bewertung von Energieflexibilität

Nach Graßl (2015) sind Wechselwirkungen

*„Einschränkungen der Energieflexibilität einer Produktionsstation aufgrund von im Produktionsprozess vor- oder nachgelagerten Produktionsstationen.“*

Auswirkungen stellen daher im Kontext der vorliegenden Arbeit

*Änderungen des Durchsatzes dar, die zur Unterversorgung von Produktionsstationen bzw. zum Erreichen der maximalen Kapazität von Puffern führen können.*

Rückwirkungen sind in Folge dessen, die

*Limitierung der maximalen Verweildauer einer EFM aufgrund der im Produktionsprozess vor- oder nachgelagerten Produktionsstationen.*

Wird der ermittelte Wert für die maximale Verweildauer mit den externen Grenzwerten verglichen, so können EFM danach kategorisiert werden, ob Wechselwirkungen die Energieflexibilität beeinflussen oder irrelevant sind, da die Grenzwerte nicht überschritten werden.

### 5.5 Strategien zur technischen und organisatorischen Bewertung

#### 5.5.1 Übersicht

Im bisherigen Verlauf des Kapitels 5 konnten die potenzielle Leistungsänderung, die in einem Produktionssystem erbracht werden kann, und die zeitlichen Eigenschaften (siehe Abbildung 5-6), mit denen die Veränderung vonstattengeht, als Zielgrößen der Bewertung von Energieflexibilität auf Produktionssystemebene identifiziert werden (siehe Abbildung 5-8). Des Weiteren wird in Abschnitt 5.3.5 deutlich, dass in einem Produktionssystem und insbesondere bei der Betrachtung kombinierter Beeinflussungen der darin enthaltenen Produktionsstationen eine gegenseitige Einflussnahme dieser im Rahmen der Bewertung berücksichtigt werden muss.

Basierend auf den zwei identifizierten Arten von Zielgrößen der Leistungsveränderung und den zeitlichen Eigenschaften von EFM und den Wechselwirkungen zwischen Produktionsstationen werden nachfolgend die drei Strategien zur Bewertung von Energieflexibilität auf Produktionssystemebene (SIMON ET AL. 2017A) vorgeschlagen:

- Strategie zur **Bewertung der Leistungsänderung (SBL)**
- Strategie zur **Bewertung Zeitlicher Eigenschaften (SBZ)**
- Strategie zur **Bewertung von Wechselwirkungen (SBW)**

In Abschnitt 5.4.3 wird der Basismaßnahmenkatalog eingeführt. Dieser enthält alle im Sinne der erläuterten Kriterien positiv bewerteten EFM der vom Anwender frei gewählten Anzahl von Produktionsstationen unter Einhaltung der festgelegten Priorisierung der Produktionsstationen (siehe Abschnitt 5.2.1). Wie in Abbildung 5-17 und den darin enthaltenen Fallunterscheidungen A, B, C, D, E, und F deutlich wird, sind einige EFM direkt dem finalen Maßnahmenkatalog zuzuordnen. Sie erfüllen bereits alle Kriterien und sind direkt anwendbar (A). EFM, die den geforderten Wert der Leistungsänderung nicht erfüllen, werden innerhalb der SBL auf eine mögliche Bündelbildung und einer damit in Summe verbesserten Bewertung überprüft (C und D). Die EFM, die aufgrund einer zeitlichen Eigenschaft überprüft werden, sind der SBZ zugeführt (E und F). Stellt der begrenzende Faktor die maximale Verweildauer dar, die aufgrund von Wechselwirkungen negativ beeinflusst wird, so wird diese der SBW zugeordnet (B). Dabei können auch in der SBL und SBZ bereits gebildete EFMB die Strategie durchlaufen (C und E).

## 5.5 Strategien zur technischen und organisatorischen Bewertung

Den beiden erstgenannten Strategien wird dabei der Kombinationsmaßnahmenkatalog zugeordnet. In diesem sind EFM vorhanden, die teilweise bereits identifiziert sind, jedoch nicht dem Basismaßnahmenkatalog zugeordnet wurden. Teilweise werden beim Durchlaufen der einzelnen Strategien jedoch zusätzlich EFM weiterer Produktionsstationen identifiziert. Dabei wird diejenige EFM ausgewählt, die bisher nicht betrachtet wurde und bezüglich der Priorisierung den höchsten Rang aufweist. Der Strategie zur Bewertung von Wechselwirkungen wird kein Maßnahmenkatalog zugeordnet, da die zu betrachtenden EFM zur Maßnahmenbündelbildung nicht den zu priorisierenden Produktionsstationen zu entnehmen sind. Vielmehr sind diese aufgrund der starken Beeinflussung durch den Materialfluss (siehe Abschnitt 5.4.4) den vor- und nachgelagerten Produktionsstationen zu entnehmen. Nach Durchlaufen der einzelnen Strategien werden alle gebildeten EFMB dem finalen Maßnahmenkatalog zugeordnet, der folglich aus EFM und EFMB bestehen kann.

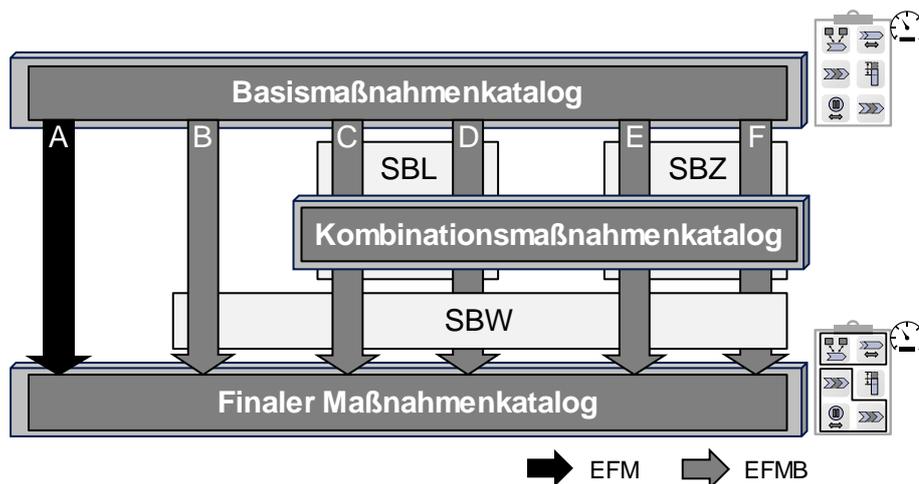


Abbildung 5-17: Vorgehen zur Bildung des finalen Maßnahmenkatalogs

Zur Bildung der EFMB werden die einzelnen Strategien durchlaufen. Kern derer stellt die Überprüfung geeigneter EFM anhand der vorgestellten Kriterien zur Kombination dar (siehe Abbildung 5-24). Die Abschnitte 5.5.2, 5.5.3 und 5.5.4 erläutern die Vorgehensweise der einzelnen Strategien.

### 5.5.2 Strategie zur Bewertung der Leistungsänderung (SBL)

Das Ziel der SBL ist die Verbesserung der Leistungsänderung von mehreren EFM durch die Bildung von parallelen EFMB mit weiteren EFM zur Erfüllung der externen Anforderung und einer damit verbundenen Erhöhung der Granularität der Bewertung des technischen und organisatorischen Potenzials. Abbildung 5-18

stellt die SBL als Blackbox dar. Neben den Maßnahmenkatalogen sind dabei die internen und externen Grenzwerte anzugeben sowie der Aufbau des Produktionssystems im Sinne des Materialflusses. Zusätzlicher Input während des Prozesses können zusätzliche EFM sein, die durch den Miteinbezug weiterer Produktionsstationen dem Kombinationsmaßnahmenkatalog zugeordnet werden.

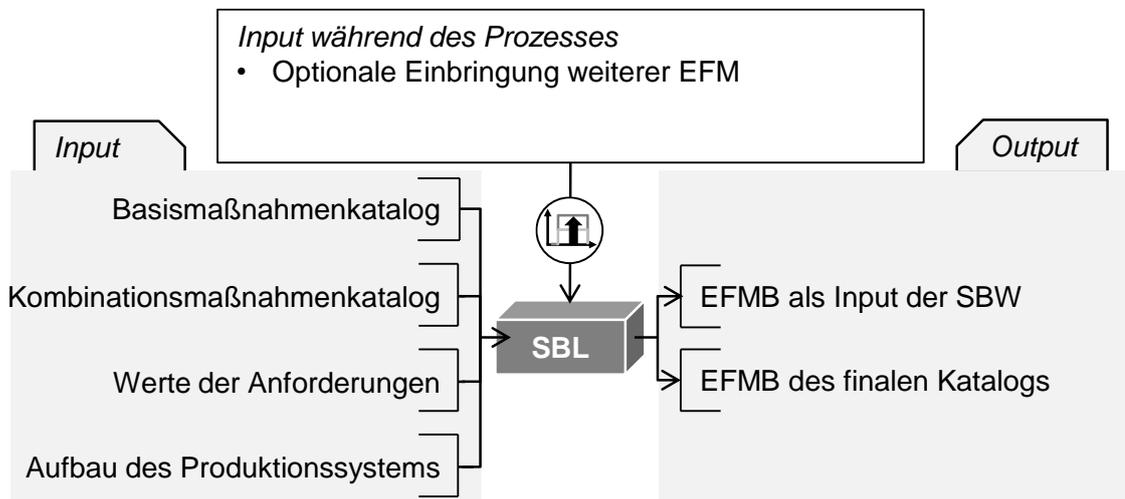


Abbildung 5-18: Input und Output der SBL

Beginnend werden dem Basismaßnahmenkatalog die EFM mit einer im Vergleich zu den externen Anforderungen  $\Delta P^{ext}$  zu niedriger Leistungsänderung  $\Delta P^{EFM}$  entnommen (siehe Formel (10)).

$$\Delta P^{EFM} < \Delta P^{ext} \quad (10)$$

Nachfolgend wird der systematische Suchprozess einer EFM, die in Kombination mit der betrachteten EFM zur Erreichung dieses externen Grenzwerts führt, beschrieben. Abbildung 5-19 zeigt den beispielhaften Leistungsverlauf eines solchen EFMB. Hierzu werden zunächst alle weiteren EFM im Basismaßnahmenkatalog geprüft, da die Daten bereits vorhanden sind und keinen zusätzlichen Aufwand, z. B. durch eine empirische Erhebung, hervorrufen. Führt dies zu keinem Ergebnis, so können vom Anwender weitere Produktionsstationen unter Berücksichtigung der Priorisierung auf EFM analysiert und dem Kombinationsmaßnahmenkatalog zugeordnet werden.

## 5.5 Strategien zur technischen und organisatorischen Bewertung

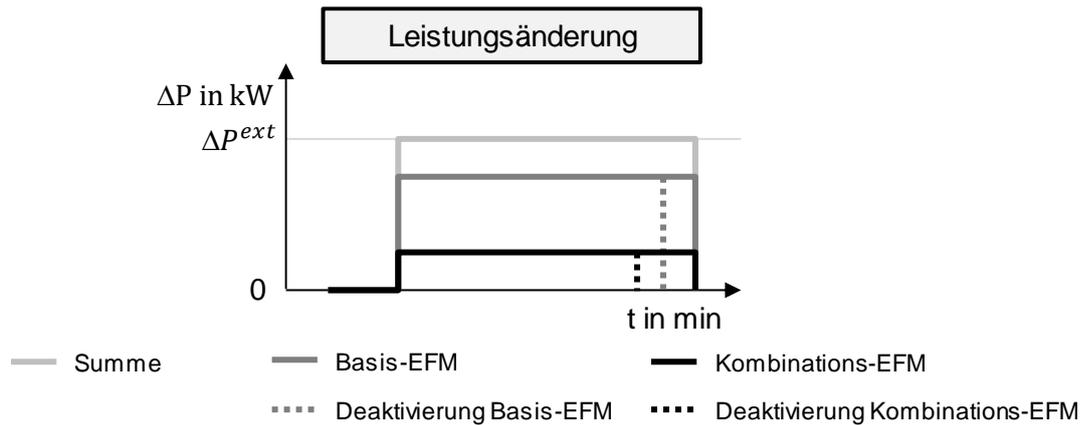


Abbildung 5-19: Leistungsverlauf eines EFMB und dessen EFM

Im weiteren Verlauf des Prüfvorgangs der Kombinations-EFM wird dabei die Verfügbarkeit des potenziellen EFMB anhand des im Abschnitt 5.4.2 erläuterten Vorgehens analysiert. Wie bereits erwähnt, steht der Verfügbarkeit der Kombinations-EFM  $\beta^K$  dabei kein externer Grenzwert, sondern ein frei vom Anwender – intern – gewählter Wert  $\beta^{int}$  gegenüber. Formel (11) beschreibt den Zusammenhang.

$$\beta^K \geq \beta^{int} \quad (11)$$

Anschließend ist die Leistungsänderung der Kombinations-EFM  $\Delta P_m^K$  zu prüfen. Grundsätzlich ist im Rahmen der Strategie die Bündelung von mehreren EFM  $m$  denkbar, daher gilt es in diesem Zusammenhang, die Summe der jeweiligen Leistungsveränderung der EFM  $\Delta P^{EFM}$  (siehe Formeln (12) und (13)) zu prüfen.

$$\Delta P^{EFM} + \sum_{m=1}^M \Delta P_m^K \geq (1 + \varphi) \Delta P^{ext} ; \Delta P^{ext} \geq 0 \quad (12)$$

$$\Delta P^{EFM} + \sum_{m=1}^M \Delta P_m^K \leq (1 + \varphi) \Delta P^{ext} ; \Delta P^{ext} < 0 \quad (13)$$

Erreicht das EFMB die geforderte Leistungsänderung, so werden die zeitlichen Eigenschaften gemäß den Formeln (6), (7), (8) und (9) überprüft und bei einer positiven Beurteilung zur Prüfung der Wechselwirkungen der SBW zugeordnet. Erreicht das Bündel die geforderte Leistungsänderung hingegen nicht, ist zu prüfen, ob dieses durch zusätzliche EFM erweitert werden kann, um die geforderte Leistungsänderung zu erreichen. In diesem Fall ist die aktuelle Kombinations-EFM dem EFMB hinzuzufügen und der Bündelungsprozess anschließend erneut durchzuführen.

### 5.5.3 Strategie zur Bewertung zeitlicher Eigenschaften (SBZ)

Ziel der SBZ ist die Verbesserung einer zeitlichen Eigenschaft von mehreren EFM durch die Bildung von sequenziellen EFMB mit jeweils einer weiteren EFM zur Erfüllung von externen Grenzwerten und einer damit verbundenen Erhöhung der Granularität der Bewertung des technischen und organisatorischen Potenzials. Abbildung 5-20 stellt die SBZ als Blackbox dar. Dabei stellen beide Maßnahmenkataloge und die internen wie externen Grenzwerte den Input des Prozesses dar. Zusätzlich können weitere EFM identifiziert und dem Kombinationsmaßnahmenkatalog zugeordnet werden.

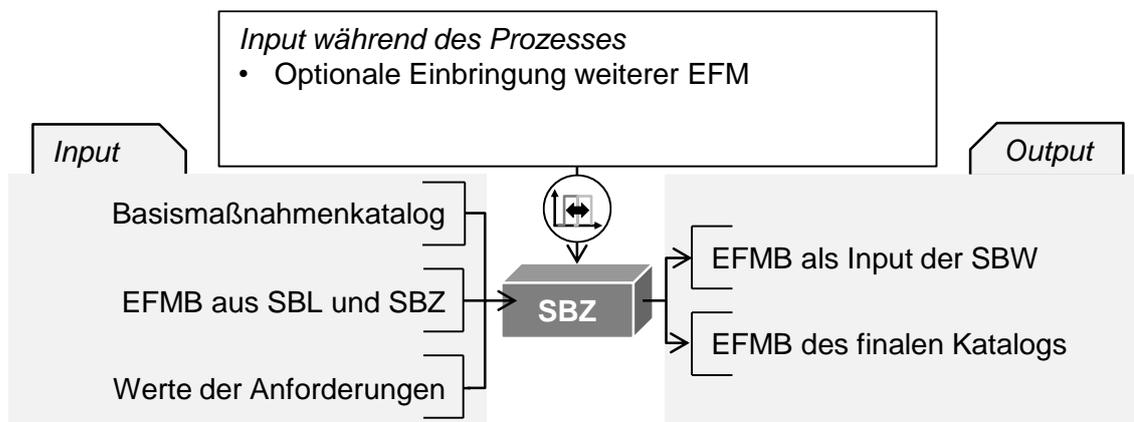


Abbildung 5-20: Input und Output der SBZ

Im ersten Schritt der Strategie werden die EFM des Basismaßnahmenkatalogs nach ihren jeweils zu verbessernden zeitlichen Eigenschaften der Aktivierungs-, der Deaktivierungs-, der minimalen Verweil- und der maximalen Verweildauer sortiert. Letztere muss dahingehend unterschieden werden, ob sie aufgrund technischer bzw. organisatorischer Restriktionen oder aufgrund der vor- bzw. nachgelagerten Puffer, d. h. aufgrund von Wechselwirkungen (siehe Abschnitt 5.4.4), die extern geforderten Werte nicht erfüllt. Im zweiten Fall wird die EFM direkt der SBW zugeordnet.

Abbildung 5-21 zeigt anhand von mehreren Beispielen eine mögliche Verbesserung der jeweiligen zeitlichen Eigenschaften. Darin ist eine EFM aus dem Basismaßnahmenkatalog dargestellt, deren Aktivierungsdauer  $t_{akt}^{EFM}$  die externe Anforderung  $t_{akt}^{ext}$  nicht erfüllt. Hierzu wird nun eine EFM gesucht, die die zeitliche Anforderung erfüllt und der EFM in einem sequenziellen EFMB zuvor geschaltet werden kann. Das Ziel ist dabei die Modellierung einer neuen Leistungskurve, die in Summe allen Grenzwerten entspricht. In der Praxis finden sich hierbei oftmals Anwendungsbeispiele bei baugleichen oder ähnlichen Produktionsstationen, die

## 5.5 Strategien zur technischen und organisatorischen Bewertung

mehrfach im Produktionssystem vorhanden sind. Bezüglich der Deaktivierungsdauer ist das Vorgehen grundsätzlich ähnlich. Der entscheidende Unterschied findet sich darin, dass die Leistungsänderung der Kombinations-EFM in die entgegengesetzte Richtung stattfinden muss, um die Leistungsänderung in der geforderten Zeit  $t_{deakt}^{ext}$  wieder zurücknehmen zu können und damit die zulange Deaktivierungsdauer  $t_{deakt}^{EMB}$  zu egalisieren.

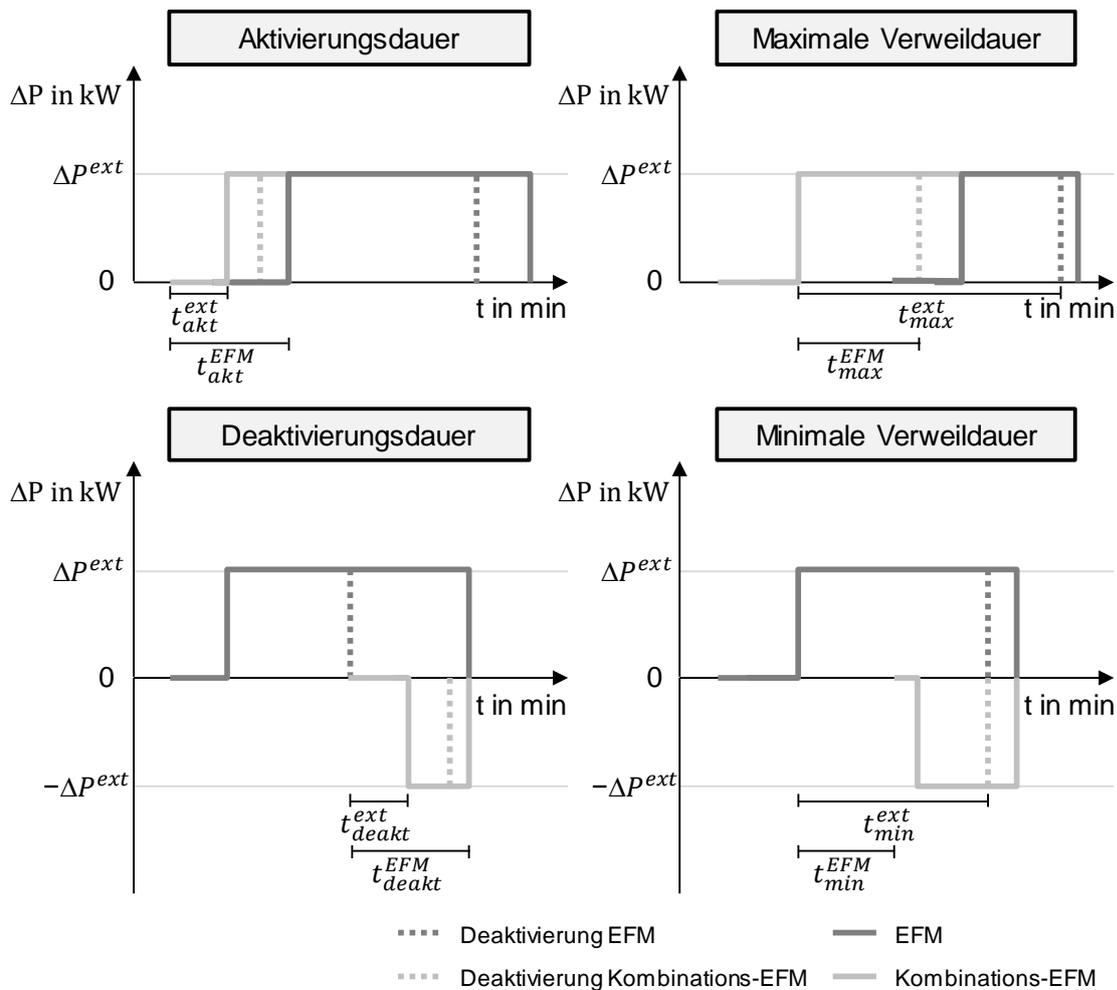


Abbildung 5-21: Beispielhafter Leistungsverlauf für die vier zeitlichen Eigenschaften der SBZ

Im Fall der maximalen Verweildauer erreicht die EFM  $t_{max}^{EFM}$  den gegebenen Wert  $t_{max}^{ext}$  nicht. In Kombination mit einer weiteren EFM wird ein EFMB generiert, die auf dem angegebenen Leistungsniveau ausreichend lange verweilen kann. Das Beispiel einer zu langen minimalen Verweildauer  $t_{min}^{EFM}$  im Vergleich zum Grenzwert  $t_{min}^{ext}$  ähnelt aufgrund des Leistungsverlaufs dem der Deaktivierungsdauer. In Summe wird wieder ein Leistungsverlauf dargestellt, der die genannte Bedingung erfüllt.

Nachfolgend wird aufgrund der hohen Relevanz in der Praxis am Beispiel der maximalen Verweildauer der Suchvorgang detailliert erläutert. Die ausführliche Beschreibung des Suchvorgangs für die Aktivierungsdauer beschreiben SIMON ET AL. (2016A). Die Formeln aller Suchvorgänge sind im Anhang jeweils der Tabelle 10-1 bis Tabelle 10-4 zu entnehmen.

Der Suchvorgang wird durchgeführt, wenn die externen Grenzwerte der maximalen Verweildauer  $t_{max}^{ext}$  die der EFM  $t_{max}^{EFM}$  überschreiten. Die Ausgangssituation ist in Formel (14) beschrieben.

$$t_{max}^{EFM} < t_{max}^{ext} \quad (14)$$

Wie in Abbildung 5-21 dargestellt, wird eine Kombinations-EFM gesucht, die nach der EFM sequenziell eingesetzt werden kann. Wie in der SBL wird zu Beginn die Verfügbarkeit (Formel (11)) des potenziellen EFMB überprüft. Im Weiteren muss das Leistungsniveau  $\Delta P^K$  der gesuchten Kombinations-EFM nach Formel (15) dem Leistungsniveau der EFM  $\Delta P^{EFM}$  entsprechen.

$$\Delta P^K = (1 \pm \varphi) \Delta P^{EFM} \quad (15)$$

Der früheste Zeitpunkt, die Entscheidung der Verlängerung einer EFM zu treffen, ist nach Ablauf der maximalen Verweildauer der EFM, d. h. mit dem Beginn der Deaktivierung. Der kritische Punkt liegt daher am Übergang zwischen den beiden EFM, dementsprechend ist es erforderlich, das Leistungsniveau hier zu halten. Formel (16) beschreibt das sich daraus ergebende erste zeitliche Prüfungskriterium. Die Aktivierungsdauer der Kombinations-EFM  $t_{akt}^K$  darf die Deaktivierungsdauer der EFM  $t_{deakt}^{EFM}$  nicht überschreiten. Dabei wird ein anwenderabhängiger Toleranzparameter bezüglich der zeitlichen Werte  $\tau$  eingeführt, um eine Verhinderung einer möglicherweise im weiteren Verlauf sehr gut bewertete Bündelbildung aufgrund von minimalen Überschreitungen des Grenzwerts zu vermeiden.

$$t_{akt}^K \leq (1 + \tau) t_{deakt}^{EFM} \quad (16)$$

Formel (17) und (18) beschreiben die Prüfkriterien der minimalen und maximalen Verweildauer. Der minimalen Verweildauer  $t_{min}^K$  ist ein maximaler Wert vorgegeben, um sicherzustellen, die Leistungsänderung nach Ablauf der extern vorgegebenen maximalen Verweildauer wieder zurücknehmen zu können. Umgekehrt muss die maximale Verweildauer der gesuchten EFM  $t_{max}^K$  mindestens der extern vorgegebenen maximalen Verweildauer  $t_{max}^{ext}$  abzüglich der maximalen Verweildauer der EFM  $t_{max}^{EFM}$  und der Aktivierungsdauer der Kombinations-EFM  $t_{akt}^K$  entsprechen.

## 5.5 Strategien zur technischen und organisatorischen Bewertung

$$t_{min}^K \leq (1 - \tau) (t_{max}^{ext} - t_{max}^{EFM} - t_{akt}^K) \quad (17)$$

$$t_{max}^K \geq (1 - \tau) (t_{max}^{ext} - t_{max}^{EFM} - t_{akt}^K) \quad (18)$$

Die Deaktivierungsdauer der gesuchten EFM  $t_{deakt}^K$  orientiert sich an der extern gegebenen Deaktivierungsdauer  $t_{deakt}^{ext}$ , um im Falle des Signals zur Rücknahme der Leistungsänderung die Anforderung einhalten zu können. Formel (19) verdeutlicht diesen Zusammenhang.

$$t_{deakt}^K \leq (1 + \tau) t_{deakt}^{ext} \quad (19)$$

Erfüllt eine Kombinations-EFM alle Kriterien, wird ein EFMB gebildet und dieses nach Prüfung der wechselwirkungsbedingten maximalen Verweildauer der SBW oder dem finalen Maßnahmenkatalog zugeordnet.

### 5.5.4 Strategie zur Bewertung von Wechselwirkungen (SBW)

Ziel der SBW ist die Verbesserung der aufgrund von Wechselwirkungen beeinträchtigten maximalen Verweildauer von mehreren EFM durch die Bildung von parallelen EFMB mit weiteren EFM zur Erfüllung der externen Anforderung und einer damit verbundenen Erhöhung der Granularität der Bewertung des technischen und organisatorischen Potenzials. Abbildung 5-22 stellt die SBW als Black-box dar.

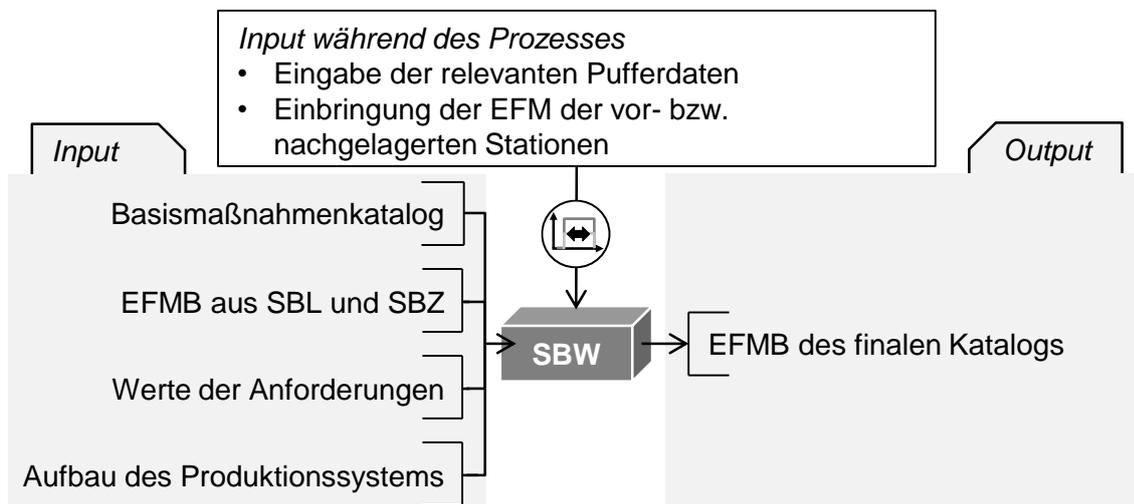


Abbildung 5-22: Input und Output der SBW

Neben dem Basismaßnahmenkatalog und den darin enthaltenen EFM sind dabei zusätzlich alle in der SBL und SBZ gebildeten EFMB zu betrachten. Zusätzlich

müssen die internen und externen Grenzwerte sowie der Aufbau des Produktionssystems angegeben werden. Zusätzlicher Input während des Prozesses können Daten bezüglich der Puffer im System und die zusätzliche Identifikation von EFM der vor- und nachgelagerten Produktionsstationen sein.

Die SBW wird nach Formel (20) für jede EFM durchgeführt, welche aufgrund von Wechselwirkungen die geforderte maximale Verweildauer  $t_{max}^{ext}$  nicht erreicht. Dabei wird jede maximale Verweildauer einer EFM  $t_{max}^{EFM}$  eines EFMB gesondert betrachtet.

$$t_{max}^{EFM} > t_{max}^{ext} \quad (20)$$

Der Ablauf der SBW ist in die zwei Schritte der Puffer- und Energieflexibilitätsmaßnahmenanalyse aufgeteilt und nachfolgend erläutert.

### Schritt 1: Pufferanalyse

Wie in Abschnitt 5.5.4 beschrieben, stellt im Kontext der Energieflexibilität die maximale Verweildauer einer EFM das Maß für Wechselwirkungen in einem Produktionssystem, in Abhängigkeit der Eigenschaften der vor- und nachgelagerten Produktionsstationen und Puffern, dar. Aus diesem Grund werden diese in der SBW detailliert untersucht. Zur Erläuterung der SBW wird nachfolgend das Beispiel der Abbildung 5-16 erneut aufgegriffen.

Ziel der Analyse ist die Identifikation von Puffern, die trotz einer Veränderung des Durchsatzes von Produktionsstationen im Rahmen der Umsetzung einer EFM vor- bzw. nachgelagerten Produktionsstationen bedienen können und damit den Materialfluss entkoppeln. Hierzu wird die zeitliche Reichweite der jeweiligen Puffer mithilfe der Formeln (21) und (22) beschrieben (GUDEHUS 2000; SCHULTZ ET AL. 2017). Dabei müssen der durchschnittliche Pufferbestand  $C^\emptyset$ , die maximale Kapazität  $C^{max}$  sowie der Input  $D^{in}$  und Output  $D^{out}$  dessen betrachtet werden.

$$Reichweite = \frac{C^\emptyset}{D^{out} - D^{in}} ; D^{out} > D^{in} \quad (21)$$

$$Reichweite = \frac{C^{max} - C^\emptyset}{|D^{in} - D^{out}|} ; D^{out} < D^{in} \quad (22)$$

Die Abbildung 5-23 zeigt das Ergebnis der beispielhaften Bewertung der Puffer. *Puffer a* und *Puffer c* sind dabei jeweils positiv bewertet. Das heißt, dass die Reichweite jeweils der extern geforderten maximalen Verweildauer entspricht. Die Puffer werden jeweils im Verlauf des Materialflusses, vor- und nachgelagert, so lange

## 5.5 Strategien zur technischen und organisatorischen Bewertung

untersucht, bis ein Puffer den entsprechenden Wert aufweist. Durch die Beeinflussung der *Anlage n-1* im Rahmen einer EFM, die den Durchsatz der Anlage annähernd gleich verändert, kann der nicht ausreichende *Puffer b* umgangen werden, da *Puffer a* und *Puffer c* den Materialfluss entkoppeln. Im nächsten Schritt muss diese EFM auf verschiedene Kriterien hin untersucht werden.

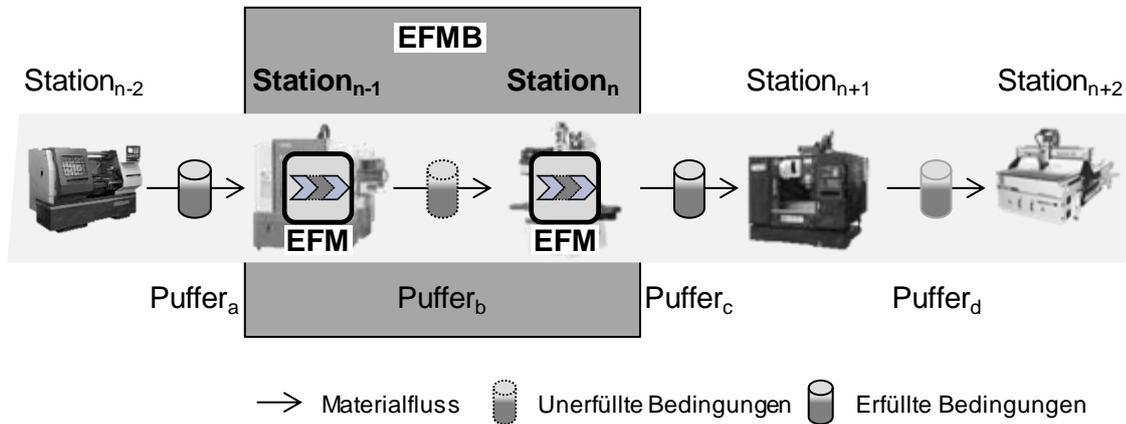


Abbildung 5-23: Beispiel in der SBW zur Bündelbildung aufgrund lokal unerfüllter und erfüllter Pufferbedingungen

### Schritt 2: Energieflexibilitätsmaßnahmenanalyse

Im zweiten Schritt werden die betroffenen Anlagen bezüglich der Existenz einer EFM, die den Durchsatz der betroffenen Anlagen derart beeinflusst, dass der Materialfluss von den anderen Puffern entkoppelt wird und somit ohne Beeinflussungen produzieren kann, untersucht. Dabei ist das erste Prüfkriterium für eine solche EFM die Veränderung des Durchsatzes. Diese muss den Durchsatz entsprechend der betrachteten EFM erhöhen oder reduzieren und dies mindestens in einem Umfang, der die neu zu berechnende Reichweite des Puffers ausreichend hoch ausfallen lässt. Im Weiteren sind wie in den vorherigen Strategien die Verfügbarkeit (Formel (11)) des EFMB und die Prüfkriterien aller weiteren zeitlichen Eigenschaften nach Formel (23), (24), (25) und (26) zu beachten.

$$t_{akt}^K \leq (1 + \tau)t_{akt}^{ext} \quad (23)$$

$$t_{deakt}^K \leq (1 + \tau)t_{deakt}^{ext} \quad (24)$$

$$t_{max}^K \geq (1 - \tau)t_{max}^{ext} \quad (25)$$

$$t_{min}^K \leq (1 + \tau)t_{min}^{ext} \quad (26)$$

Durch die in diesem Abschnitt erläuterte Vorgehensweise gelingt es, durch die gezielte Kombination von EFM mehrere Produktionsstationen vom Materialfluss zu

entkoppeln und damit die maximale Verweildauer der ursprünglich eingesetzten EFM zu verbessern. Der negative Einfluss auf die maximale Verweildauer von Wechselwirkungen wird dadurch neutralisiert. Die Rückwirkung der Anlage auf die EFM im Sinne der Abbildung 5-16 wird somit eliminiert.

### 5.5.5 Bewertung von EFMB

Die Abbildung 5-24 stellt eine Übersicht des gesamten Prüfungsverlaufs von EFM dar, bevor diese in ein EFMB überführt werden können. Im Anschluss daran erfolgt die Bewertung dieser.

	SBL	SBZ	SBW	
Bündeltyp	Parallel	Sequentiell	Parallel	
Wechselwirkung ( $t_{max}^{EFM}$ )			Grenzwert	Suchprozess für Kombinations-EFM
Stationen	Individuell	Individuell	Individuell	
Durchsatz			Grenzwert	
Verfügbarkeit	Grenzwert	Grenzwert		
Leistung EFM		Grenzwert		
Leistung EFMB	Grenzwert			
$t_{max}^{EFM}$	Grenzwert	Grenzwert	Grenzwert	
$t_{max}^{EFM}$	Grenzwert	Grenzwert	Grenzwert	
$t_{max}^{EFM}$	Grenzwert	Grenzwert	Grenzwert	
$t_{max}^{EFM}$	Grenzwert	Grenzwert	Grenzwert	

Abbildung 5-24: Übersicht zum Ablauf der Bewertungsstrategien und Überprüfungskriterien für deren Maßnahmenbündelbildung (SIMON ET AL. 2017A)

Zur Befähigung der letztendlich monetären Bewertung der EFMB bezüglich der Vermarktung auf dem Energiemarkt werden diese anhand der Eigenschaften der EFM (siehe Abschnitt 5.2.3) bewertet. Hierzu sind nach Formel (27) für die Leistungsänderung der EFMB  $\Delta P^{EFMB}$  die Leistungsänderungen der EFM  $\Delta P^{EFM}$  und der Kombinations-EFM  $\Delta P_k^K$  zu addieren. Sequenzielle EFMB schließen eine Überschneidung der Leistungsänderung per Definition aus.

## 5.6 Fazit

---

$$\Delta P^{EFMB} = \Delta P^{EFM} + \sum_{k=1}^K \Delta P_k^K \quad (27)$$

Die Bewertung der zeitlichen Eigenschaften weicht aufgrund der Prüfkriterien im Suchprozess kaum von der ursprünglichen EFM ab. Allerdings können aufgrund des eingeführten Parameters  $\tau$  Abweichungen entstehen, die, wie in den Formeln (28), (29), (30) und (31) beschrieben, berücksichtigt werden müssen. Dabei wird jeweils der maximale bzw. minimale Wert der EFM  $t_{akt}^{EFM}$ ,  $t_{deakt}^{EFM}$ ,  $t_{min}^{EFM}$ ,  $t_{max}^{EFM}$  bzw. Kombinations-EFM  $t_{akt}^K$ ,  $t_{deakt}^K$ ,  $t_{min}^K$ ,  $t_{max}^K$  verwendet, um die letztendlichen Eigenschaften der parallelen EFMB  $t_{akt}^{EFMB}$ ,  $t_{deakt}^{EFMB}$ ,  $t_{min}^{EFMB}$ ,  $t_{max}^{EFMB}$  zu berechnen.

$$t_{akt}^{EFMB} = \max_{t_{akt}}(t_{akt}^{EFM}, t_{akt,1}^K, t_{akt,2}^K, \dots, t_{akt,k}^K) \quad (28)$$

$$t_{deakt}^{EFMB} = \max_{t_{akt}}(t_{deakt}^{EFM}, t_{deakt,1}^K, t_{deakt,2}^K, \dots, t_{deakt,k}^K) \quad (29)$$

$$t_{min}^{EFMB} = \max_{t_{akt}}(t_{min}^{EFM}, t_{min,1}^K, t_{min,2}^K, \dots, t_{min,k}^K) \quad (30)$$

$$t_{max}^{EFMB} = \min_{t_{akt}}(t_{max}^{EFM}, t_{max,1}^K, t_{max,2}^K, \dots, t_{max,k}^K) \quad (31)$$

Die Berechnung der zeitlichen Eigenschaften sequenzieller EFMB ist davon stark abweichend, da sich die Suchkriterien in den Strategien unterscheiden. Das entsprechende Bewertungsvorgehen beschreiben Simon et al. (2016a). Die Formeln sind im Anhang in Tabelle 10-5 dargestellt.

## 5.6 Fazit

In diesem Kapitel wurde die technische und organisatorische Bewertung von Energieflexibilität als erstes Element der Methodik zur Bewertung von Energieflexibilität von Produktionssystemen hergeleitet und detailliert. Das dabei beschriebene Vorgehen zeigt die Identifizierung von EFM und deren Bewertung anhand von definierten Eigenschaften sowie mehrere Kategorisierungsmöglichkeiten auf. Dies stellt die Basis der Strategien zur Bewertung der Leistungsänderung, der zeitlichen Eigenschaften von EFM und von Wechselwirkungen dar. In den Strategien werden die ermittelten EFM auf mögliche Kombinationen zur Erfüllung vom Energiemarkt vorgegebener Grenzwerte untersucht. Durch die Bildung der EFMB gelingt die Bewertung auf Produktionssystemebene und eine Steigerung der Bewertungsgranularität für die Energieflexibilität.

## **5 Technische und organisatorische Bewertung von Energieflexibilität**

---

Im nachfolgenden Kapitel 6 erfolgt auf Grundlage der technischen und organisatorischen Bewertung die Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung der Energieflexibilität von Produktionssystemen. In diesem Kontext gilt es, zum einen weiter die EFM detailliert bezgl. des Risikos zu analysieren und zum anderen die Handlungsoptionen produzierender Unternehmen aufzuzeigen.



## 6 Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung von Energieflexibilität

### 6.1 Übersicht

Aufbauend auf der in Kapitel 5 vorgenommenen technischen und organisatorischen Bewertung von Energieflexibilität beschreibt das vorliegende Kapitel 6 die Entwicklung eines Vorgehens zur Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung von Energieflexibilität. Dabei werden die bereits erarbeiteten Bewertungsergebnisse einer vertieften Bewertung unter Betrachtung von Einflüssen mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit, die kleiner als 100 % ist, unterzogen. Aufbauend auf der in Abschnitt 1.3 vorgestellten Forschungsfrage 3 lassen sich die in Abbildung 6-1 dargestellten Zielsetzungen für dieses Kapitel ableiten, die sich wiederum den zwei Adressaten und einem bestimmten Nutzen für diese zuordnen lassen.

Ziele	Adressat	Nutzen
<i>Abschnitt 6.2:</i> Identifikation der relevanten Risiken im Zusammenhang mit Energieflexibilität	PPS	Wissen über vorhandene Risiken
	Management	Grundlage der allgemeinen Risikobewertung
<i>Abschnitt 6.3:</i> Bewertung der Auswirkungen von EFM als Produktionsrisiko	PPS	Wissen, über Auswirkungen von EFM als Produktionsrisiko
	Management	Grundlage für die Bewertung einzelner EFM und somit für die Vermarktungsentscheidung
<i>Abschnitt 6.3:</i> Bewertung der Auswirkungen von Produktionsrisiken auf EFM	PPS	Wissen, über Auswirkungen vorhandener Risiken
	Management	Grundlage für die Bewertung einzelner EFM und somit für die Vermarktungsentscheidung

FF Forschungsfrage

Abbildung 6-1: Ziele, Adressaten und Nutzen der Forschungsfrage 3

Abbildung 6-2 beschreibt die Zielsetzungen, die Adressaten und den Nutzen der Forschungsfrage 4. Die bisherigen Ergebnisse in Form der bewerteten EFM und

## 6.1 Übersicht

EFMB und zusätzlichen Informationen, wie z. B. zusätzlichen Risikokosten, werden dabei hinsichtlich deren Wirtschaftlichkeit untersucht.

<b>FF 4</b> Wie können Unternehmen bei der Vermarktungsentscheidung ihrer Energieflexibilität unterstützt werden? <span style="float: right;">€</span>		
Ziele	Adressat	Nutzen
<i>Abschnitt 6.4:</i> Wirtschaftlichkeits- bewertung von EFM	PPS	Input für Energieorientierte Produktion
	Management	Input für Entscheidung über einzelne Maßnahmen
<i>Abschnitt 6.5:</i> Vorgehen zur Unterstützung der Vermarktungs- entscheidung	Management	Nutzung des Vorgehens

FF Forschungsfrage

Abbildung 6-2: Ziele, Adressaten und Nutzen der Forschungsfrage 4

Die Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung basiert auf dem in Abbildung 5-3 dargestellten Vorgehen zur technischen und organisatorischen Bewertung und beginnt dementsprechend mit Schritt fünf – der Beschreibung der Risikosituation der betrachteten Unternehmung. Darin wird die allgemeine Risikosituation der Unternehmung aufgenommen und in einem Inventar der Produktionsrisiken dokumentiert (siehe Abbildung 6-3). Im Anschluss erfolgt die Bewertung von Energieflexibilität im Kontext der Risikosituation. Dabei werden zum einen die Auswirkungen einer EFM als Produktionsrisiko berücksichtigt, d. h. z. B., dass sich nach dem Abschalten eines Prozesses im Rahmen einer EFM die Wiederherstellung des Ursprungszustands der betroffenen Produktionsstation verzögert. Zum anderen werden zusätzlich die Auswirkungen der in der Produktion bereits vorhandenen Risiken auf die Verfügbarkeit und weitere zeitlichen Eigenschaften von Energieflexibilität betrachtet. Beispielhaft kann hier die Analyse der Zuverlässigkeit einer Produktionsstation und deren Einfluss auf die Verfügbarkeit genannt werden. Im siebten Schritt der Methode erfolgt die Wirtschaftlichkeitsbewertung bzw. die Berechnung der Erlöse von EFM anhand der Erkenntnisse, die in den zuvor durchlaufenen Bewertungen gewonnenen wurden. Schritt 8 beschreibt ein Vorgehen zur Verarbeitung aller gesammelten Informationen zur Vermarktungsentscheidung der Flexibilität und liefert damit Grundvoraussetzungen zur Beantwortung der Fragen, ob und auf welchem Markt die Energieflexibilität des Unternehmens vermarktet werden sollte.

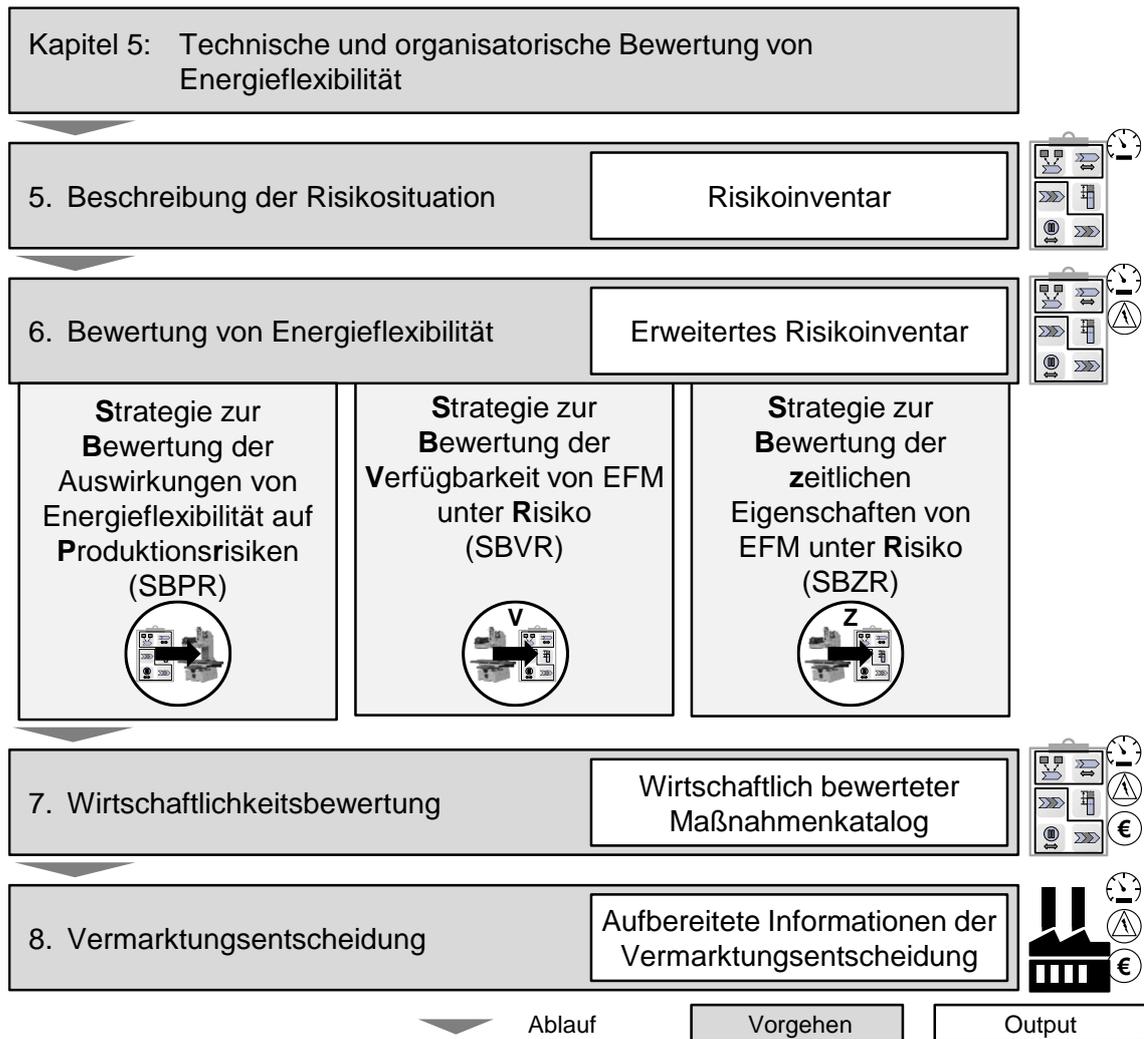


Abbildung 6-3: Vorgehen der Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung von Energieflexibilität

## 6.2 Beschreibung von Energieflexibilität im Wirkgefüge von Produktionsrisiken

### 6.2.1 Wirkrichtung von Produktionsrisiken und Energieflexibilitätsmaßnahmen

Abschnitt 2.3.2 beschreibt die Ursache-Wirkungskette von Produktionsrisiken und dabei das Phänomen, dass bestimmte Ereignisse sowohl als Ursache als auch als Wirkung auftreten bzw. interpretiert werden können. Im Kontext der Energieflexibilität können die Ereignisse der Energieflexibilität und auch Ereignisse des Pro-

## 6.2 Beschreibung von Energieflexibilität im Wirkgefüge von Produktionsrisiken

duktionsrisikos am Anfang bzw. Ende der Wirkkette stehen. Ereignisse der Energieflexibilität sind in diesem Zusammenhang mit einer EFM gleichzusetzen. Der konkrete Ort der Wirkereignisse stellt, wie in Abbildung 6-4 verdeutlicht, das betrachtete Produktionssystem dar. Siehe hierzu auch die Ausführungen von SIMON ET AL. 2017B.

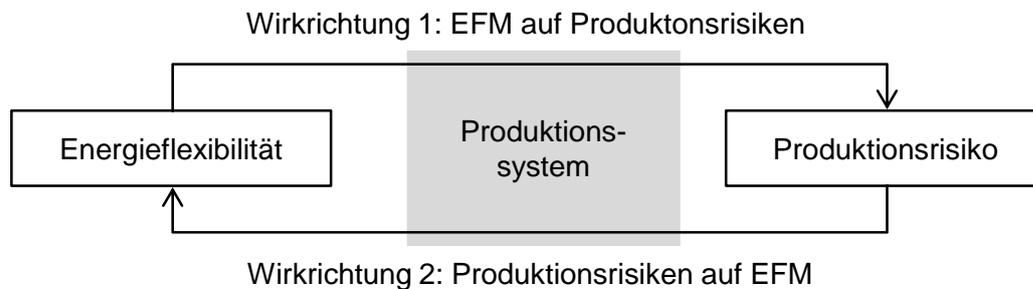


Abbildung 6-4: Wirkrichtungen von Energieflexibilität und Produktionsrisiken (SIMON ET AL. 2017B)

Die in diesem Zusammenhang entstehende Wirkungskette ist aufgrund der nicht in jedem Fall sicheren Zuordnung der Rolle eines Ereignisses komplex. Aus diesem Grund wird eine Risikohierarchie eingeführt, um den Kategorisierungsvorgang der Ereignisse methodisch zu unterstützen.

Die oberste Ebene der Hierarchie wird von den Risikoursachen eingenommen, die die Auslöser der Risikofaktoren darstellen. Ein Risikofaktor vereint folglich häufig mehrere Ursachen. Die Risikoträger setzen sich aus materiellen und immateriellen Bestandteilen des Produktionssystems zusammen und dienen als Überträger von Risiken. Das letzte Glied der Kette ist das Risikoereignis selbst, das in vielen Fällen mit seiner jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeit und dem dazugehörigen Schadensausmaß bewertet werden kann (STEINMETZ 2007; WEIG 2008).

Wie in Abbildung 6-4 gezeigt, entstehen in diesem Zusammenhang zwei Wirkrichtungen. *Wirkrichtung 1* entspricht der Wirkung von EFM auf Produktionsrisiken, ist in der Literatur häufig genannt und wird nachfolgend anhand von zwei in Abbildung 6-5 illustrierten Beispielen beschrieben sowie den Risikohierarchien zugeordnet. In *Beispiel 1* stellt die Ursache der Einflüsse auf Produktionsrisiken die erhöhte Häufigkeit eines Hochfahrprozesses (SIMON UND DATZMANN 2016) aufgrund des Einsatzes einer entsprechenden EFM dar. Der dazugehörige Risikofaktor wird hier als die Zuverlässigkeit von Produktionsstationen bezeichnet. Dadurch wird der Risikoträger Produktionsstation beeinflusst, was in der letztendlichen

Wirkung zu einer erhöhten Ausfallwahrscheinlichkeit führt, die mit einem gewissen Schadensausmaß bewertet werden kann.

Das *zweite Beispiel* der ungeplanten Abschaltung einer Produktionsstation zeigt auf, dass unterschiedliche Risikoursachen zu denselben Risikofaktoren führen können, die wiederum unterschiedliche Risikoereignisse zur Folge haben können. Aus diesem Grund ist grundsätzlich die komplette Wirkkette zu betrachten.



Abbildung 6-5: Wirkkette der Wirkrichtung 1 – Wirkung von EFM auf Produktionsrisiken

Im Weiteren wird für die *Wirkrichtung 2*, d. h. der Wirkung der Produktionsrisiken auf die Energieflexibilität bzw. deren EFM, die Wirkkette anhand von den zwei in Abbildung 6-6 dargestellten Beispielen erläutert. Risikoursache ist dabei in *Beispiel 1* der Ausfall der Fördertechnik, die zum Risikofaktor der Störung im Produktionsablauf führt. Über die betroffene Produktionsstation als Risikoträger erfolgt die Wirkung in Form einer verkürzten maximalen Verweildauer, da der Betrieb der Produktionsstation evtl. nicht so lange aufrechterhalten werden kann, wie geplant.

Im *zweiten Beispiel* wird die Wirkkette von einer schwer zu prognostizierten Produktnachfrage als Risikoursache bis zur erneuten Erhöhung der maximalen Verweildauer beschrieben. Dabei ist zu beachten, dass unterschiedliche Risikoursachen und -faktoren zu denselben Risikoereignissen führen können.

## 6.2 Beschreibung von Energieflexibilität im Wirkgefüge von Produktionsrisiken



Abbildung 6-6: Wirkkette der Wirkrichtung 2 – Wirkung von Produktionsrisiken auf EFM

### 6.2.2 Erweiterung bestehender Bewertungsmodelle für Produktionsrisiken

Wie im letzten Abschnitt aufgezeigt, findet bei der Umsetzung der Energieflexibilität ein Eingriff in den Produktionsablauf statt. Dadurch können bereits bestehende Produktionsrisiken beeinflusst werden und neue Risiken entstehen (Wirkrichtung 1). Diese haben wiederum einen Einfluss auf die Eigenschaften von EFM bzw. EFMB (Wirkrichtung 2). Wird dieser Zusammenhang nun in die in Abschnitt 2.3.2 vorgestellte Ursache-Wirkungskette integriert, so ergibt sich das in Abbildung 6-7 dargestellte Bild der Energieflexibilität in Form der EFM als Ausgangs- und Zielpunkt der Betrachtung der Risikosituation in einem produzierenden Unternehmen. Jede EFM des finalen Maßnahmenkatalogs beeinflusst dabei die bereits bestehenden oder zusätzlich zu identifizierenden Risikoursachen. Zusätzlich wird ersichtlich, dass ein EFMB bei der Risikobetrachtung in die einzelnen EFM unterschieden werden muss. Die Risikofaktoren sammeln die unterschiedlichen Einflüsse und wirken über die Risikoträger auf das Zielsystem. Diese Wirkung kann in Form eines Produktionsausfalls bzw. eines Qualitätsmangels auftreten und das Zielsystem, z. B. aufgeteilt in Qualität, Kosten und Zeit, beeinflussen. Am Ende der Wirkkette ist wiederum der finale Maßnahmenkatalog zu berücksichtigen, da jede EFM bzw. EFMB von den veränderten oder unveränderten Produktionsrisiken beeinflusst werden kann. Die einzelnen Bestandteile der in der vorliegenden Arbeit erweiterten Wirkkette werden in Abschnitt 6.2.4 erläutert.

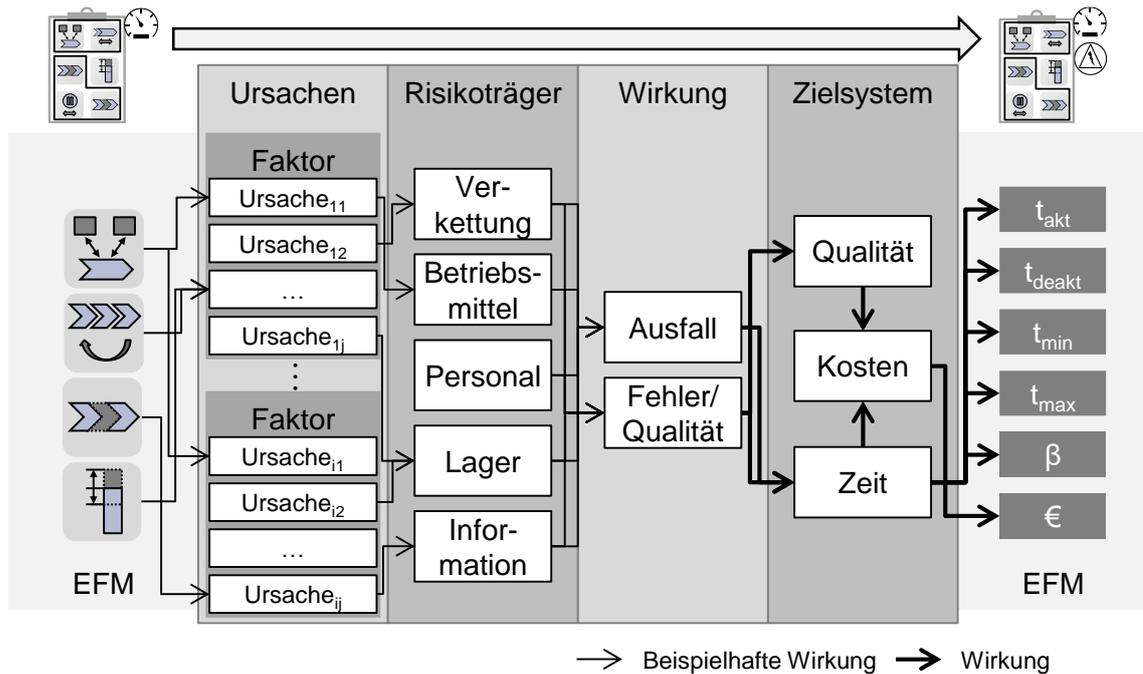


Abbildung 6-7: Erweiterung der Ursache-Wirkungskette von Produktionsrisiken nach STEINMETZ (2007) um die Betrachtung von Energieflexibilität nach SIMON ET AL. (2018B)

### 6.2.3 Bewertung von Methoden zur Identifikation und Bewertung von Risiken

Die Vorgehensweise zur Bewertung von Energieflexibilität unter Risiko greift auf einige etablierte Methoden der Identifikation und Bewertung von Produktionsrisiken zurück. In den Ausführungen im Abschnitt 6.3 werden einige Methoden beispielhaft eingesetzt. Da hierbei jedoch grundsätzlich auch andere Methoden eingesetzt werden können, wird nachfolgend eine Bewertung vorgenommen, um die Auswahl der für den jeweiligen Anwendungsfall am besten geeigneten Methode zu erleichtern.

Die Bewertungskriterien werden dabei so gewählt, dass die Risikomanagementphasen, in denen die Methode angewandt werden kann, klar bewertet werden und die Methoden den allgemeinen Anforderungen der Arbeit (siehe Abschnitt 4.3) gerecht werden. Dem Fokus der Arbeit entsprechend wird die Methode auf ihre Eignung zur Identifikation und Bewertung von Risiken untersucht. Im Anschluss sind der Aufwand und die damit verbundene Granularität der Identifikation bzw. Bewertung zu beschreiben. Um eine Eingliederung in die gesamte Vorgehens-

## 6.2 Beschreibung von Energieflexibilität im Wirkgefüge von Produktionsrisiken

weise zu ermöglichen, wird zusätzlich die Möglichkeit einer quantitativen Auswertung der Ergebnisse beurteilt. Abschließend stellt die Prüfung der Objektivität den Einfluss einzelner Individuen auf die Ergebnisse in Frage.

Tabelle 6-1 zeigt das Ergebnis der Bewertung von Methoden zur Risikoidentifikation und Bewertung. Dabei wurden die nach ROMEIKE UND HAGER (2009) für den Unternehmensbereich Produktion als geeignet beschriebenen Methoden untersucht, welche in Abschnitt 2.3.5 kurz erläutert werden. Die Methoden des Ishikawa-Diagramms und des Brainstormings sind dabei nicht bzw. nur bedingt für die Risikobewertung geeignet, stellen jedoch ein relevantes Tool für die Identifizierung dar. Die Fehlerbaumanalyse und FMEA sind Methoden, die für beide Einsatzbereiche geeignet sind. Erstere ist zusätzlich mit einer hohen Quantität und Objektivität zu beurteilen. Die Risikosimulation ist, ähnlich wie das Scoring-Modell, im Rahmen der Risikobewertung jedoch nur bedingt für die Identifikation von Risiken geeignet. Zusätzlich ist diese mit einem hohen initialen Aufwand verbunden.

Tabelle 6-1: Detaillierte Bewertung der Methoden zur Risikoidentifikation und -bewertung

	Risikoidentifikation	Risikobewertung	Aufwand	Granularität	Quantitativität	Objektivität
Ishikawa	●	○	◐	◐	○	◐
Brainstorming	●	◐	○	◐	◐	◐
Fehlerbaumanalyse	●	●	◐	◐	●	●
Fehlermöglichkeits und -einflussanalyse	●	●	◐	◐	◐	◐
Simulation	◐	●	●	●	◐	◐
Scoring-Modell	◐	●	◐	◐	●	◐

- Nicht möglich bzw. niedrig zu bewerten
- ◐ Bedingt geeignet bzw. mittel zu bewerten
- Geeignet bzw. hoch zu bewerten

Bevor die Bewertung von Energieflexibilität im Wirkgefüge von Produktionsrisiken vorgestellt werden kann, muss die Identifikation und Bewertung der bestehenden Produktionsrisiken betrachtet werden.

### 6.2.4 Aufnahme von Produktionsrisiken

Wie in Abbildung 6-7 zu erkennen ist, stellen die bereits vorhandenen Produktionsrisiken eines produzierenden Unternehmens einen zentralen Bestandteil der erweiterten Ursache- Wirkungskette dar und müssen aus diesem Grund eingehend betrachtet werden. Das Ziel dieses Schritts besteht darin, ein Risikoinventar (siehe Abbildung 6-3) aller bestehenden Risiken in einer Form aufzunehmen, die es ermöglicht, die Bewertung der Auswirkungen von EFM zu berücksichtigen. Ist dieses im Unternehmen bereits vorhanden, so entfällt die Aufnahme von Produktionsrisiken als vorbereitender Schritt, jedoch muss evtl. die Form der aufgenommenen Daten angepasst werden. Die nachfolgende Vorgehensweise beschreibt die Schritte für Unternehmen, die ihr Risikoinventar weitestgehend nicht erstellt haben. Diese unterteilen sich in die Identifikation, die Kategorisierung und die Bewertung.

#### Identifikation

Um Risiken langfristig im Rahmen der Risikosteuerung minimieren zu können, müssen diese im ersten Schritt identifiziert werden. Hierzu wird das zu untersuchende Produktionssystem zunächst modelliert, um einen Überblick über die zu untersuchenden Prozesse und Elemente der Produktion zu schaffen.

Prozessname	
Prozess-Icon	
Prozess-Nr.	Auslastung
Maschinenstundensatz	
Kurzbeschreibung des Prozesses	

Abbildung 6-8: Aufbau eines Prozesselements in Anlehnung an SCHUH (2006)

Dabei wird die von Schuh (2006) vorgestellte Methode PROPLAN (siehe Abschnitt 2.2.4) entsprechend angepasst. Dabei werden aufgrund des Fokus dieser Arbeit (siehe Abschnitt 1.2) vorrangig direkte, d. h. wertschöpfende Prozesselemente, betrachtet. Die durch Material- und Informationsflüsse verbundenen Prozesselemente werden bezüglich des strukturellen Aufbaus und den im Verlauf des Bewertungsprozesses benötigten Daten beschrieben (siehe Abbildung 6-8). Hierzu gehören eine Prozessnummer zur eindeutigen Zuordnung und eine Kurzbeschreibung des Prozesses. Darüber hinaus sind die kalkulatorischen Maschinenstunden-

## 6.2 Beschreibung von Energieflexibilität im Wirkgefüge von Produktionsrisiken

sätze für die Kostenbewertung zu ergänzen und zusätzlich die Auslastung des Prozesselements anzugeben.

Anschließend sind im Rahmen eines Risiko-Workshops die jeweiligen Risiken der Prozesselemente mithilfe von Kreativitätsmethoden, wie z. B. dem Brainstorming (siehe Abschnitt 6.2.3), zu identifizieren. Hierbei können die von KÖNIG (2008) vorgeschlagenen Objektklassen: *Betriebsmittel*, *Transporteinrichtungen*, *Personal*, *Informationssysteme* und *Lagersysteme*, die in Abbildung 6-7 bereits die Risikoträger darstellen, als Checkliste für die Analyse potenzieller Gefahren jedes Prozesselements genutzt werden.

### Kategorisierung

Table 6-2: Beschreibung der von KÖNIG (2008) genannten Auswirkungen von Risiken als Produktionsausfall oder Qualitätsmängel

Objektklasse	Beispielhafte Risiken
Betriebsmittel	Der resultierende Schaden des Ausfalls eines Betriebsmittels besteht in der ausbleibenden Produktion. Darunter wird an dieser Stelle auch die Produktion von einer niedrigeren als der geplanten Stückzahl verstanden.
	Störungen von Betriebsmitteln können zu Qualitätsmängeln im Sinne von zu geringer oder mangelhafter Qualität führen.
Transporteinrichtungen	Der resultierende Schaden des Ausfalls einer Transporteinrichtung besteht in der ausbleibenden Produktion.
	Keine Qualitätsauswirkungen.
Personal	Der resultierende Schaden des zeitweiligen oder langfristigen Ausfalls von Personal resultiert im niedrigeren Produktionsvolumen des Systems.
	Fehlbedienungen durch das Personal, können zu Qualitätsmängeln im Sinne von zu geringer oder mangelhafter Qualität führen.
Informationssysteme	Der Ausfall eines Informationssystems verursacht, dass eine für den Produktionsprozess erforderliche Information nicht zum geforderten Zeitpunkt verfügbar ist. Daraus resultiert ggf. ein Ausbleiben der Produktion.
	Falsche Informationen können bspw. durch Fehler im System entstehen und zu Qualitätsmängeln führen.
Lagersysteme	Technische Defekte können zur Verhinderung der Entnahme von eingelagertem Material und damit zum Ausfall eines automatisierten Lagersystems führen.
	Ein falscher Lagerort, falsche Bedingung/Behandlung des Lagerguts und zu lange Lagerdauer können zu Qualitätsmängeln führen.

Produktionsausfall

Qualitätsmängel

In der Literatur werden grundsätzlich die Möglichkeiten der ursachen- und wirkungsbezogenen Kategorisierung von Risiken genannt (BRAUN 1984; HÄRTERICH 1987). Vor dem Hintergrund der Bewertungsaufgabe dieser Arbeit wird hier die

Untersuchung der Auswirkungen gewählt. Dabei fällt bei der Betrachtung der genannten Auswirkungen von KÖNIG (2008) bezüglich der jeweiligen Objektklassen auf, dass sich diese über die Wirkkette hinweg oftmals in eine geringere produzierte Menge oder in Qualitätsmängeln in der Produktion unterscheiden lassen (siehe Tabelle 6-2). Dabei ist auch die bereits in Abschnitt 5.3.4 erfolgte Definition des Qualitätsbegriffs zu beachten.

Risiken können demnach in Produktionsausfall- und Qualitätsrisiko unterschieden werden. Nachfolgend wird die Vorgehensweise zur Bewertung beschrieben.

### **Bewertung**

Nach der quantitativen Risikodefinition können Risiken durch das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß beschrieben werden (siehe Abschnitt 2.3.1). Für die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit stellt die Fehlerbaumanalyse ein geeignetes Mittel dar (siehe Abschnitt 6.2.3). Diese dient zum einen der systematischen Identifizierung aller Ausfallkombinationen, die zu einem vorgegebenen unerwünschten Ereignis führen, und ermöglicht zum anderen die Ermittlung von Eintrittshäufigkeiten der Ausfallkombinationen (DIN 25424). HAUPTMANN (2013) identifiziert hierbei drei Ansätze:

- Beobachtungen während des Betriebs
- Expertenschätzungen
- Experimente im Labor

Das Schadensausmaß des Ausfallrisikos berechnet sich dabei aus der Ausfallzeit und den Ausfallkosten. Bezüglich des Qualitätsrisikos wird dies über die Anzahl der mangelhaften Werkstücke bzw. Produkte und über die Ausfallkosten berechnet. Die Höhe dessen kann ebenfalls anhand historischer Daten, basierend auf Beobachtungen während des Anlagenbetriebs oder durch Expertenschätzungen, erfasst werden. Abbildung 6-9 zeigt die aufzunehmenden Daten eines Produktionsrisikos.

Die gesammelten Ergebnisse sind abschließend in einem Risikoinventar zu dokumentieren. Dabei werden die Risiken in Produktionsausfall- und Qualitätsrisiken unterschieden, den Prozesselementen und Objektklassen zugeordnet und die Eintrittswahrscheinlichkeit beschrieben. Das Schadensausmaß des Produktionsausfalls ist dabei in Zeiteinheiten aufgenommen, während Qualitätsmängel mit der Anzahl der betroffenen Stücke beschrieben werden.

### 6.3 Bewertung von Energieflexibilität unter Berücksichtigung von Produktionsrisiken

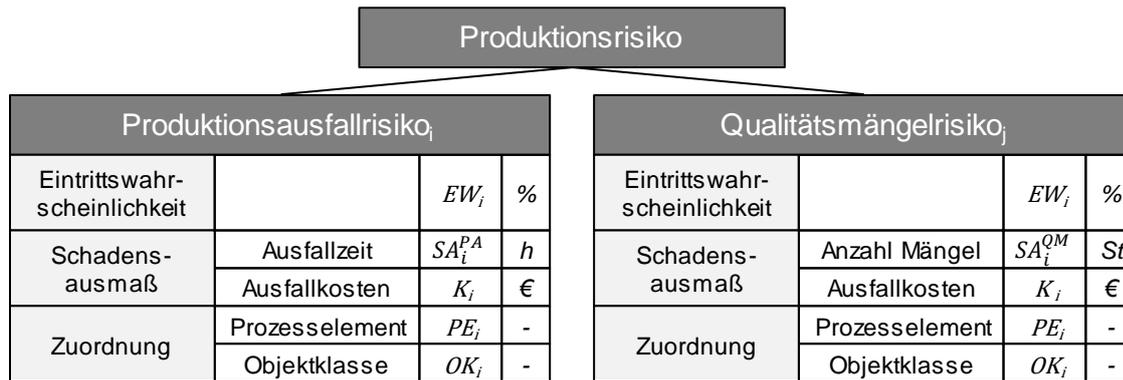


Abbildung 6-9: Wirkungsbezogene Kategorisierung und Eigenschaften von Produktionsrisiken

Basierend auf den somit beschriebenen Risiken wird nachfolgend das Vorgehen zur Bewertung von Energieflexibilität im Wirkgefüge von Produktionsrisiken vorgestellt.

### 6.3 Bewertung von Energieflexibilität unter Berücksichtigung von Produktionsrisiken

#### 6.3.1 Übersicht

Zur Bewertung von Energieflexibilität im Wirkgefüge von Produktionsrisiken müssen nach Abbildung 6-4 zwei Wirkrichtungen berücksichtigt werden. Aus Wirkrichtung 1 ergibt sich die Notwendigkeit der Bewertung von Auswirkungen der EFM auf Produktionsrisiken. Wirkrichtung 2 beschreibt die Beeinflussung der EFM und im Speziellen die der Verfügbarkeit bzw. aller weiteren zeitlichen Eigenschaften. Daraus ergeben sich die drei nachfolgend genannten Strategien zur Bewertung:

- Strategie zur **B**ewertung der Auswirkungen von Energieflexibilität auf **P**roduktionsrisiken (SBPR)
- Strategie zur **B**ewertung der **V**erfügbarkeit von EFM unter **R**isiko (SBVR)
- Strategie zur **B**ewertung der **z**eitlichen Eigenschaften von EFM unter **R**isiko (SBZR)

Im Zuge von Kapitel 5 wurde die Erstellung des finalen Maßnahmenkatalogs erläutert. Darin sind EFM und EFMB genannt und bewertet. Um diese bei der Bewertung der veränderten Risikosituation berücksichtigen zu können, müssen die EFMB in die einzelnen EFM aufgeteilt werden. Dadurch wird sichergestellt, alle Auswirkungen zu berücksichtigen. Abbildung 6-10 illustriert das Vorgehen zur Risikobewertung des finalen Maßnahmenkatalogs. Die einzelnen Strategien werden nachfolgend erläutert. Siehe hierzu auch SIMON ET AL. (2018B).

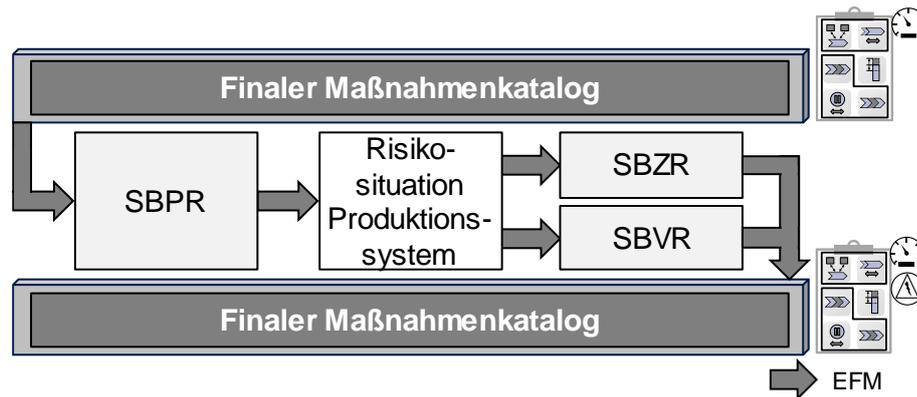


Abbildung 6-10: Vorgehen zur Risikobewertung des finalen Maßnahmenkatalogs

### 6.3.2 Strategie zur Bewertung der Auswirkungen von Energieflexibilität auf Produktionsrisiken (SBPR)

Ziel der SBPR ist die Bewertung der Auswirkungen von Energieflexibilität auf die Risikosituation eines produzierenden Unternehmens und einer damit verbundenen Erhöhung der Granularität der Bewertung des technischen und organisatorischen Potenzials. Abbildung 6-11 stellt die Strategie als Blackbox dar.

Neben dem finalen Maßnahmenkatalog sind dabei das Risikoinventar sowie die Fehlerbäume je Produktionsrisiko anzugeben. Zusätzlicher Input während des Prozesses können das Know-how erfahrenerer Mitarbeiter, historische Produktionsdaten oder Ergebnisse von Labortests sein. Die Strategie ist in die zwei Schritte der Identifikation und der Bewertung der Auswirkungen unterteilt.

## 6.3 Bewertung von Energieflexibilität unter Berücksichtigung von Produktionsrisiken

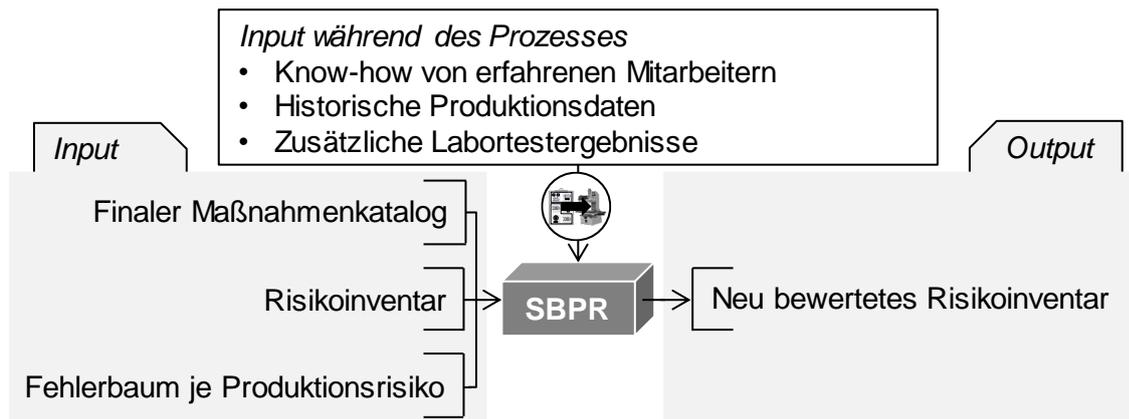


Abbildung 6-11: Input und Output der SBPR

### Identifikation

Zu Beginn sind die Einflüsse der dem finalen Maßnahmenkatalog zugeordneten EFM und EFMB auf die im Risikoinventar enthaltenen Produktionsrisiken zu identifizieren. Um den Anforderungen der Methode nach einem möglichst geringen Aufwand bei einer hohen Bewertungsgranularität gerecht zu werden, ist hierfür zunächst der Lösungsraum, der u. U. eine große Anzahl an Produktionsrisiken beinhaltet, durch eine Vorauswahl einzugrenzen. Dabei können der EFM-Art nach Tabelle 3-1 jeweils die betroffenen Prozesselemente zugeordnet werden. Da diese wiederum den Produktionsrisiken zugeordnet sind, sind nachfolgend lediglich die der betroffenen Prozesselemente zu betrachten. In Tabelle 6-3 sind die entsprechenden Zusammenhänge dargestellt.

Dabei wird deutlich, dass z. B. die Unterbrechung eines Prozesses Einfluss auf die Mehrzahl der Produktionsrisiken hat. So ist bspw. die Beeinträchtigung von Transporteinrichtungen genauso denkbar wie die Erhöhung des Risikos eines zusätzlichen Ausfalls der Produktion, da z. B. evtl. Bedienfehler beim erneuten Starten des Prozesses nach der Unterbrechung auftreten. In Abhängigkeit der identifizierten EFM müssen folglich jene Produktionsrisiken, deren Objektklasse nicht beeinflusst wird, im Weiteren nicht betrachtet werden.

Tabelle 6-3: Einfluss der verschiedenen EFM-Arten auf Produktionsrisiken

		Transport		Betriebsmittel		Personal		Lager & Puffer		Information	
		PA	---	PA	QM	PA	QM	PA	QM	PA	QM
	Mittelfristige Anpassung von Prozessstarts					●	●	●	●	●	●
	Kurzfristige Anpassung von Prozessstarts	●		●	●	●	●	●		●	●
	Anpassung der Maschinenbelegung	●		●	●	●	●	●		●	●
	Anpassung der Auftragsreihenfolge			●	●	●	●	●		●	●
	Anpassung von Pausenzeiten			●	●	●	●	●		●	●
	Anpassung von Schichtzeiten					●	●	●	●	●	●
	Unterbrechung von Prozessen	●		●	●	●	●	●		●	●
	Anpassung von Prozessparametern			●	●	●	●	●		●	●
	Speicherung von Energie	●		●	●					●	●
	Wechsel der Energiequelle	●		●	●	●	●			●	●

### Bewertung

Nachfolgend werden die EFM bezüglich ihrer Einflussnahme auf die verbleibenden Objektklassen bzw. Produktionsrisiken untersucht. Hierfür werden die bereits erstellten Fehlerbäume der Risiken herangezogen und auf mögliche Einflüsse durch EFM in einem Risikoworkshop untersucht. Bspw. könnte die EFM *Schichtzeiten anpassen* zu einer erhöhten Müdigkeit der Mitarbeiter führen, wodurch letztendlich aufgrund mangelnder Konzentration ein falsches CNC-Programm eingelesen wird. Abbildung 6-12 illustriert dieses Beispiel nach DIN 25424.

### 6.3 Bewertung von Energieflexibilität unter Berücksichtigung von Produktionsrisiken

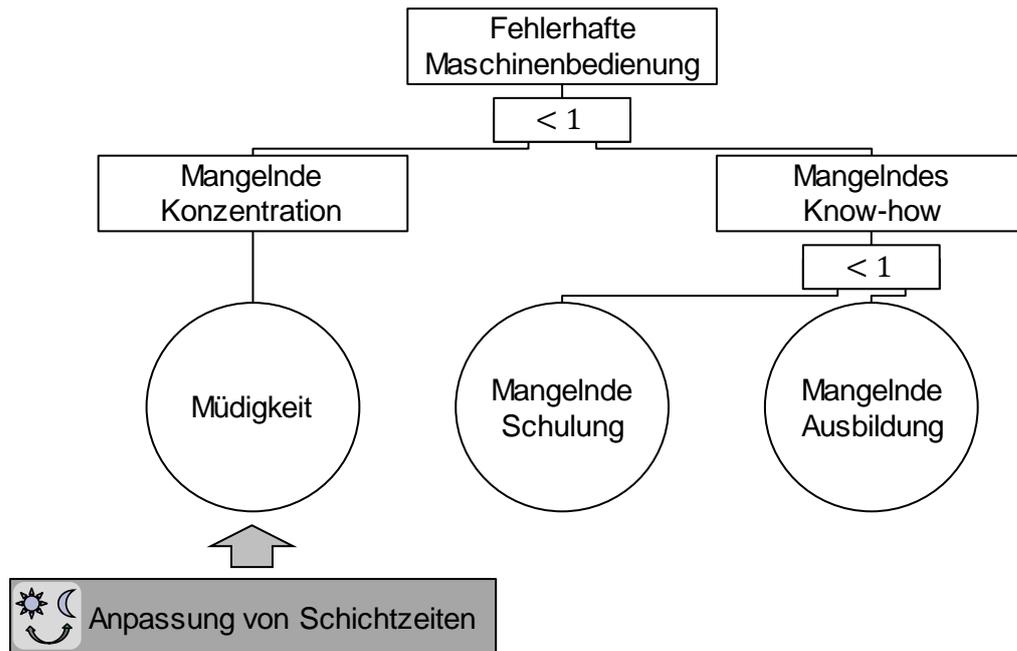


Abbildung 6-12: Beispielhafter Fehlerbaum zur Identifikation von Einflüssen von EFM/EFMB auf Produktionsrisiken

Im Anschluss an die Identifizierung der Einflüsse müssen diese nach den Anforderungen an die Methodik (siehe Abschnitt 4.3) quantifiziert werden. Da die EFM auf Ursachen von Risiken wirken und deren Eintreten immer dieselbe durch das Schadensausmaß bewertete Auswirkung hat, wird diese Größe nicht beeinflusst. Allerdings ändert sich durch den Einsatz einer EFM die Eintrittswahrscheinlichkeit der Risikoursache. Führt in einem produzierenden Unternehmen bspw. der Ausfall einer Komponente einer Produktionsstation aufgrund von Verschleiß zu einem Maschinenstillstand von durchschnittlich sechs Stunden und wird anschließend der Einfluss einer EFM auf diesen Verschleiß identifiziert, so hat das Auswirkungen auf die Eintrittswahrscheinlichkeit des Ausfalls der betrachteten Komponente. Die mittlere Reparaturdauer von sechs Stunden zur Beseitigung der Störung bleibt von der EFM jedoch unberührt.

Zur weiteren Quantifizierung des Einflusses einer EFM auf die Produktionsrisiken ist die Anzahl der durchzuführenden EFM während eines festgelegten Betrachtungszeitraums zu bestimmen. Die maximale Anzahl ist dabei anhand der Formel (3) zu berechnen. Sollte dies aus organisatorischen oder wirtschaftlichen Gründen zu hoch angesetzt sein, kann der Anwender die geschätzte Anzahl individuell anpassen.

## 6 Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung von Energieflexibilität

Zur genauen Quantifizierung der Eintrittswahrscheinlichkeit kann erneut auf die von HAUPTMANN (2013) vorgeschlagene Erhebung anhand von Expertenschätzungen, Experimenten im Labor oder Beobachtungen während des Betriebs verwiesen werden. Zusätzlich kann dabei die Durchführung einer Szenarioanalyse angestrebt werden. Dabei können durch Schätzwerte für den minimal und maximal zu erwartenden Einfluss von EFM auf die Eintrittswahrscheinlichkeit von Risiken Best- und Worst-Case Szenarien erstellt werden.

Das Ergebnis wird im erweiterten Risikoinventar, in Form einer erhöhten Eintrittswahrscheinlichkeit eines Risikos aufgrund einer bestimmten EFM, festgehalten. Abbildung 6-13 illustriert dies beispielhaft.

i	m	Kurzbeschreibung veränderter Risiken	$PE_i$	$OK_i$	$EW_i$	$EW_{m,i}^{NEU}$	$SA_i^{PA}$	$SA_i^{QM}$
			[-]	[-]	[%]	[%]	[h]	[St]
1	1	Fehlerhafte Maschinenbedienung	3	PQM	4	7		200
3	2	Gefährdung Sicherheitsbestands	8	LPA	3	8	150	
...								
j	m	Kurzbeschreibung neu identifizierter Risiken	$PE_j$	$OK_j$	$EW_j$	$SA_j^{PA}$	$SA_j^{QM}$	
			[-]	[-]	[%]	[h]	[St]	
2	2	Erhöhter Verschleiß	5	BQM	8		100	
3	7	Gefährdung Sicherheitsbestands	4	LPA	6	100		
...								

PE	Produktionselement	TPA	Transport (Produktionsausfall)	PQM	Personal (Qualitätsmängel)
OK	Objektklasse	TQM	Transport (Qualitätsmängel)	LPA	Lager (Produktionsausfall)
EW	Eintrittswahrscheinlichkeit	BPA	Betriebsmittel (Produktionsausfall)	LQM	Lager (Qualitätsmängel)
SA	Schadensausmaß	BQM	Betriebsmittel (Qualitätsmängel)	IPA	Information (Produktionsausfall)
		PPA	Personal (Produktionsausfall)	IQM	Information (Qualitätsmängel)

Abbildung 6-13: Beispielhaftes erweitertes Risikoinventar

Nachdem im vorliegenden Abschnitt eine Vorgehensweise zur Bewertung der Wirkrichtung 1 und damit der Einfluss von EFM auf Produktionsrisiken entwickelt und vorgestellt wurde, liegt der Fokus der folgenden Abschnitte auf Wirkrichtung 2. Um den Einfluss von Produktionsrisiken auf EFM detailliert zu betrachten, werden zwei Strategien entwickelt. Abschnitt 6.3.3 beschreibt den Einfluss auf die Verfügbarkeit einer EFM. Zudem beschreibt Abschnitt 6.3.4 die Bewertung der zeitlichen Eigenschaften von EFM.

## 6.3 Bewertung von Energieflexibilität unter Berücksichtigung von Produktionsrisiken

### 6.3.3 Strategie zur Bewertung der Verfügbarkeit von EFM unter Risiko (SBVR)

Ziel der SBVR ist die Bewertung der Auswirkungen der Risikosituation eines produzierenden Unternehmens auf die Energieflexibilität und im Speziellen der Verfügbarkeit von EFM und einer damit verbundenen Erhöhung der Granularität der Bewertung des technischen und organisatorischen Potenzials. Die Abbildung 6-14 illustriert die Strategie als Blackbox.

Dabei wird neben dem finalen Maßnahmenkatalog das erweiterte Risikoinventar der SBPR benötigt. Das Ergebnis stellt die Neubewertung der Verfügbarkeit aller EFM und damit der EFMB des finalen Maßnahmenkatalogs dar.

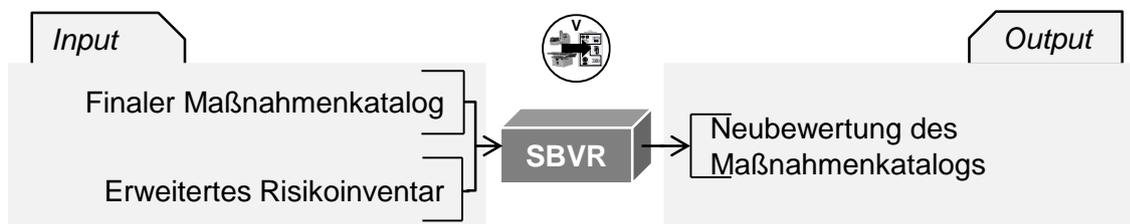


Abbildung 6-14: Input und Output der SBVR

Die Durchführung einer EFM kann nur erfolgen, wenn sich die betroffene Produktionsstation im geforderten Ausgangszustand befindet. Diese Eigenschaft wird als Verfügbarkeit der EFM beschrieben und kann durch die Erhöhung oder das Auftreten von zusätzlichen Risiken negativ beeinflusst, d. h. reduziert, werden. Dabei beeinflussen die identifizierten potenziellen Produktionsausfälle die Verteilung der Zustände und damit den zeitlichen Anteil des Ausgangszustands von Energieflexibilitätsmaßnahmen.

In Abbildung 6-15 ist beispielhaft der zeitliche Anteil von vier Zuständen einer Produktionsstation und deren Leistungsniveaus dargestellt. Dabei wird durch die Erhöhung des Anteils des Zustands Stillstand der des Zustands Normalbetrieb verringert, sodass eine EFM, die diesen Ausgangszustand benötigt, weniger oft zur Verfügung steht.

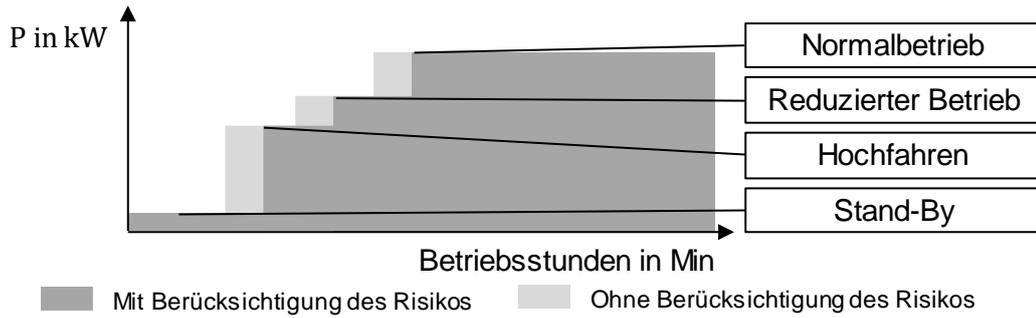


Abbildung 6-15: Auswirkungen der Zunahme des Produktionsausfallrisikos auf die Zustände einer Produktionsstation

Um die zeitlichen Auswirkungen der Risiken auf eine EFM  $t_m^{PA}$  quantifizieren zu können, muss die verfügbare Zeitdauer einer EFM  $t_V$  um die durch die veränderten oder zusätzlich eintretenden Risiken beeinflusste Zeit reduziert werden. Die Höhe der Reduktion wird durch das Schadensausmaß des Produktionsausfallrisikos in den Zeiteinheiten  $SA_i^{PA}$  bzw.  $SA_j^{PA}$ , der Eintrittswahrscheinlichkeit vorhandener Risiken ohne Betrachtung von Energieflexibilität  $EW_{m,i}$ , der Eintrittswahrscheinlichkeit vorhandener Risiken mit Betrachtung von Energieflexibilität  $EW_{m,i}^{Neu}$  und der Eintrittswahrscheinlichkeit evtl. neu entstehender Risiken  $EW_{m,j}$  bestimmt. Dabei dürfen ausschließlich Produktionsrisiken betrachtet werden, die dem Ausgangszustand der EFM zugeordnet werden können. Da sich das Schadensausmaß jeweils auf einen Arbeitstag bezieht, muss die Betriebsdauer pro Arbeitstag  $t_{AT}$  ebenfalls berücksichtigt werden. Formel (32) beschreibt die entsprechende Berechnungsvorschrift.

$$t_m^{PA} = t_V - \left( \sum_{i=1}^I \left( (EW_{m,i}^{Neu} - EW_{m,i}) \times SA_i^{PA} \right) + \sum_{j=1}^J (EW_{m,j} \times SA_j^{PA}) \right) \times \frac{t_V}{t_{AT}} \quad (32)$$

Im Anschluss kann die Verfügbarkeit der EFM unter Berücksichtigung der Risikosituation  $\beta_m^{PA}$  und der Zeitdauer des Betrachtungszeitraums  $t_B$  (z. B. eine Woche) berechnet werden (siehe Formel (33)).

$$\beta_m^{PA} = \frac{t_m^{PA}}{t_B} \quad (33)$$

Nach der Vorstellung der Vorgehensweise zur Bewertung der Auswirkungen von Produktionsausfällen auf die Verfügbarkeit von EFM werden nachfolgend die Auswirkungen von Produktionsausfällen auf die zeitlichen Eigenschaften von EFM beschrieben. Der Betrachtungsrahmen ist dabei weiterhin die Wirkrichtung 2.

## 6.3 Bewertung von Energieflexibilität unter Berücksichtigung von Produktionsrisiken

### 6.3.4 Strategie zur Bewertung der zeitlichen Eigenschaften von EFM unter Risiko (SBZR)

Ziel der SBZR ist die Bewertung der Auswirkungen der Risikosituation eines produzierenden Unternehmens auf die Energieflexibilität und im Speziellen der zeitlichen Eigenschaften von EFM und einer damit verbundenen Erhöhung der Granularität der Bewertung des technischen und organisatorischen Potenzials. Siehe hierzu auch SIMON ET AL. (2017B). Abbildung 6-16 stellt die Strategie als Black-box dar. Hierbei sind neben dem finalen Maßnahmenkatalog auch das erweiterte Risikoinventar der SBPR, der Aufbau des Produktionssystems und die Durchsätze der Produktionsstationen von Nöten. Das Ergebnis stellt die Neubewertung der zeitlichen Eigenschaften aller EFM und damit der EFMB des finalen Maßnahmenkatalogs dar.

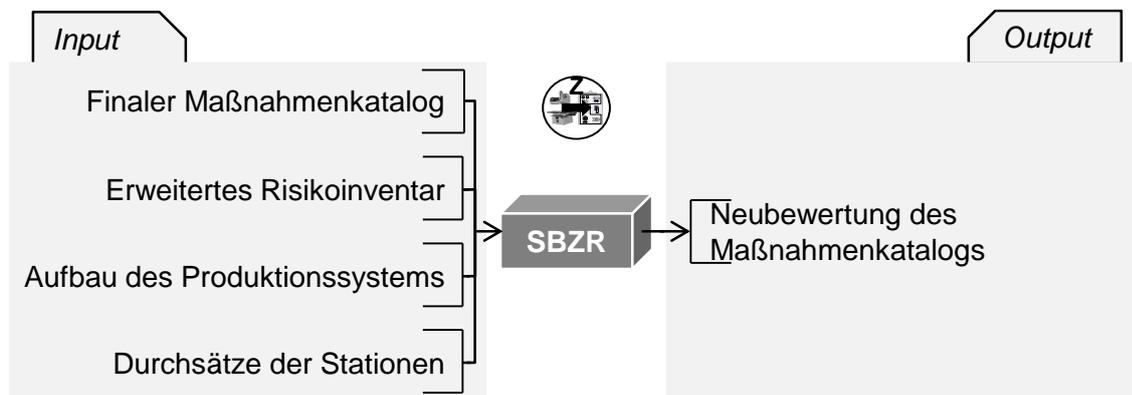


Abbildung 6-16: Input und Output der SBZR

Die in Abschnitt 5.2.3 vorgestellten zeitlichen Eigenschaften von EFM können in die Aktivierungsdauer, die Deaktivierungsdauer und die minimale und maximale Verweildauer unterschieden werden. Nachfolgend wird jeweils die Bewertung der Einflüsse der Risikosituation beschrieben. Dabei beeinflussen die identifizierten potenziellen Produktionsausfälle in Form einer Störung, d. h. ein Wechsel in den Zustand Standby-Betrieb oder Aus, die in Kapitel 5 aufgenommen Werte der technischen und organisatorischen Bewertung negativ. Qualitätsmängel haben hingegen keinen Einfluss auf die zeitlichen Eigenschaften, da der Lastverlauf dadurch nicht beeinträchtigt wird.

### Aktivierungsdauer

Die Aktivierungsdauer einer EFM kann sich durch das Auftreten einer Störung einer Produktionsstation verlängern, falls diese während der Aktivierung der Maßnahme auftritt. Abbildung 6-17 illustriert dabei, dass sich diese zum einen um die zusätzliche Dauer der aufgetretenen Störung verlängert und zum anderen in vielen Fällen angenommen werden muss, dass die Aktivierung nach einer Störung erneut aufgenommen wird. Aus diesem Grund verlängert sich die Aktivierungsdauer zudem um den Teil der Aktivierung, der vor Eintreten einer Störung bereits vergangen ist.

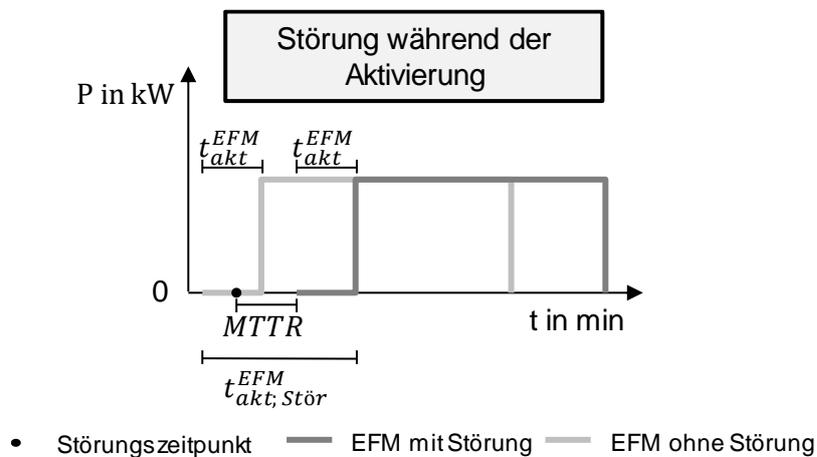


Abbildung 6-17: Auswirkung einer Störung auf die Aktivierungsdauer einer EFM

Zusätzlich gilt es, den Zeitpunkt des Auftretens einer Störung zu berücksichtigen. So ist es bspw. möglich, dass eine Produktionsstation vermehrt zu Beginn der Aktivierung die Störung aufweist, da z. B. der Hochfahrprozess hier besonders kritisch ist. Zur Berücksichtigung dieses Umstands wird der Faktor  $\rho_{akt}$  eingeführt. Dieser kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen und entspricht dabei dem Anteil der durchschnittlichen störungsfreien Aktivierungsdauer an der gesamten Aktivierungsdauer bei Auftreten einer Störung.

Auf Basis dieser Überlegungen kann die Aktivierungsdauer im Falle einer auftretenden Störung  $t_{akt,Stör}^{EFM}$  nach Formel (34) berechnet werden.  $MTTR$  ist dabei die mittlere Stördauer der betrachteten Produktionsstation (siehe Abschnitt 2.3.5).

$$t_{akt,Stör}^{EFM} = (1 + \rho_{akt}) \times t_{akt}^{EFM} + MTTR \quad (34)$$

Auf Basis dieses Werts kann im nächsten Schritt die Aktivierungsdauer der EFM unter Risiko  $t_{akt,Risiko}^{EFM}$  durch Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit in

### 6.3 Bewertung von Energieflexibilität unter Berücksichtigung von Produktionsrisiken

---

Form der Zuverlässigkeit der betrachteten Produktionsstation  $\eta^{Sta}$  berechnet werden. Diese kann durch Aufnahme der Erfahrungswerte von Mitarbeitern oder mithilfe von historischen Produktionsdaten ermittelt werden. Formel (35) beschreibt den Zusammenhang.

$$t_{akt,Risiko}^{EFM} = \eta^{Sta} \times t_{akt}^{EFM} + (1 - \eta^{Sta}) \times t_{akt,Stö}^{EFM} \quad (35)$$

#### Deaktivierungsdauer

Eine Störung, die während der Deaktivierung einer EFM stattfindet, führt dazu, dass die betroffene Produktionsstation nicht in den Ausgangszustand zurückkehren kann. Da zu diesem Zeitpunkt des Verlaufs der EFM diese bereits vollständig durchgeführt wurde, ist kein Einfluss auf die Erbringung der Leistungsveränderung festzustellen. Dies ist der Fall, da diese bereits erbracht ist. Aus diesem Grund wird eine Störung während der Deaktivierungsdauer an dieser Stelle nicht betrachtet. Zusätzlich ist zu beachten, dass die Auswirkungen auf den geänderten Zustand der Produktionsstation bereits in Abschnitt 6.3.3 bezüglich der Bewertung der Verfügbarkeit berücksichtigt wurden.

#### Minimale Verweildauer

Im Weiteren wird die minimale Verweildauer betrachtet. Diese entspricht der Zeitdauer vom Erreichen des Zielzustands bis zu dem Zeitpunkt, an dem ein Zustandswechsel der Produktionsstation zurück in den Ausgangszustand möglich ist. Tritt währenddessen eine Produktionsstörung auf, so ist der Zustandswechsel nicht durchführbar. Abbildung 6-18 illustriert das Beispiel der temporären Abschaltung einer Produktionsstation im Rahmen einer EFM und einer auftretenden Produktionsstörung während der minimalen Verweildauer.

Das Auftreten der Produktionsstörung verlängert die bis dahin vergangene minimale Verweildauer  $t_{min}^{EFM}$  um die mittlere Stördauer. Formel (36) gibt diesem Zusammenhang und damit die minimale Verweildauer einer EFM im Falle einer Störung  $t_{min,Stö}^{EFM}$  wieder. Hierbei beschreibt  $\rho_{min}$  den bis zur Störung durchschnittlich vergangenen Anteil der minimalen Verweildauer. Ist die mittlere Stördauer kürzer als der Anteil der minimalen Verweildauer, der nach dem Zeitpunkt des Auftretens einer Störung vergeht, bleibt diese unverändert.

$$t_{min,Stö}^{EFM} = \begin{cases} t_{min}^{EFM} & \text{für } MTTR < (1 - \rho_{min}) \times t_{min}^{EFM} \\ \rho_{min} \times t_{min}^{EFM} + MTTR & \text{für } MTTR > (1 - \rho_{min}) \times t_{min}^{EFM} \end{cases} \quad (36)$$

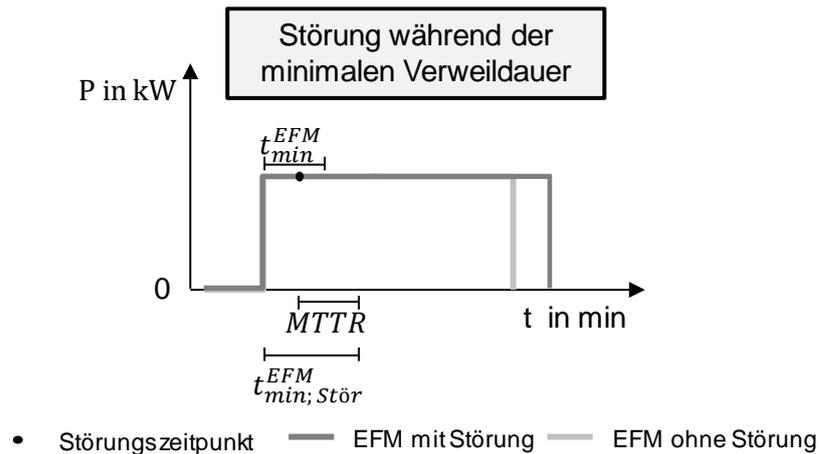


Abbildung 6-18: Auswirkung einer Störung auf die minimale Verweildauer einer EFM

Zur Berechnung der minimalen Verweildauer wird in Formel (37) erneut die Zuverlässigkeit der betrachteten Produktionsstationen  $\eta^{Sta}$  herangezogen (SIMON ET AL. 2017B).

$$t_{min,Risiko}^{EFM} = \eta^{Sta} \times t_{min}^{EFM} + (1 - \eta^{Sta}) \times t_{min,Stö}^{EFM} \quad (37)$$

Das Beispiel macht zusätzlich deutlich, dass diese Überlegungen nur für EFM gültig sind, die als Zielzustand einen störungsähnlichen Zustand aufweisen. Alle anderen EFM werden durch die Störung vollständig abgebrochen, sodass eine Berücksichtigung in der Bewertung der zeitlichen Eigenschaften folglich nicht zulässig ist.

### Maximale Verweildauer

Im Folgendem wird die maximale Verweildauer untersucht. Grundsätzlich sind dabei die Überlegungen zur minimalen Verweildauer ebenso gültig, da sich die Verweildauer im gleichen Umfang verlängern würde. Allerdings ist laut den in Abbildung 5-8 dargestellten Energieflexibilitätsaxiomen die Verlängerung der maximalen Verweildauer als positiv zu betrachten und kann damit keine negative Auswirkung im Sinne der Risikobetrachtung zur Folge haben. Aus diesem Grund finden diese Überlegungen keine Berücksichtigung in der Bewertung dieser Größe.

Bei der detaillierten Betrachtung der maximalen Verweildauer als Maß für Wechselwirkungen (siehe Abschnitt 5.4.4) fällt auf, dass Auswirkungen von Störungen im Materialfluss zu Änderungen der Pufferbestände führen können und damit die verfügbare maximale Verweildauer beschränken. Dieser Zusammenhang wird

### 6.3 Bewertung von Energieflexibilität unter Berücksichtigung von Produktionsrisiken

nachfolgend kurz erläutert. Eine detaillierte Beschreibung der Berechnungsvorschriften und ausführliche Beispiele liefern SIMON ET AL. (2017B) in ihrer Arbeit zur Bewertung von Wechselwirkungen.

Zur Erläuterung wird dabei erneut auf das Beispiel des in Abbildung 5-23 dargestellten Materialflusses zurückgegriffen. Dabei ist ersichtlich, dass der Bestand der vor- und nachgelagerten Puffer von Störungen der vor- und nachgelagerten Produktionsstationen beeinflusst wird und damit vom Ort der Störung abhängig ist. Zusätzlich ist der Zeitpunkt des Auftretens der Störung zu berücksichtigen, da bereits vor dem Beginn einer EFM negative Einflüsse auf die Pufferbestände und damit auf die maximale Verweildauer bestehen können. Die Beeinflussung während der Durchführung einer EFM ist ebenfalls möglich. Dadurch ergeben sich die in Abbildung 6-19 dargestellten verschiedenen Fallunterscheidungen, die im Rahmen der Bewertung berücksichtigt werden müssen.

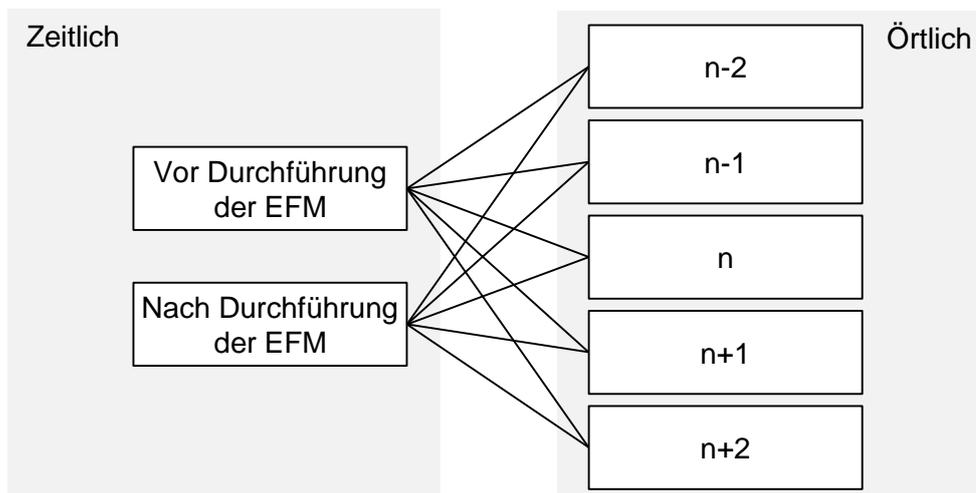


Abbildung 6-19: Fallunterscheidungen im Rahmen der Bewertung der maximalen Verweildauer

Im Weiteren gilt es, für jeden der auftretenden Fälle die maximale Verweildauer zu berechnen. Beispielhaft sind hier die Berechnungsvorschriften für die maximale Verweildauer als Auswirkung eines vorgelagerten Puffers im Falle einer Störung vor der Durchführung einer EFM  $t_{max,Stö}^{EFM,vor,n-1}$  in Formel (38) dargestellt. Diese werden mithilfe der maximalen Kapazität des betrachteten Puffers  $C^{max}$ , dem Sicherheitsbestand des betrachteten Puffers  $C^{min}$ , dem Bestand des Puffers nach der Störung  $C^{Stö}$ , der Mean Time To Repair der vorgelagerten Produktionsstation  $MTTR_{n-1}$ , dem Durchsatz der betrachteten Produktionsstation  $\lambda_n^{Sta}$ , dem Durchsatz der vorgelagerten Produktionsstation  $\lambda_{n-1}^{Sta}$  und dem Durchsatz der Produktionsstation während der EFM  $\lambda_n^{EFM}$  berechnet.

Ist der Durchsatz der vorgelagerten Produktionsstation niedriger als der Durchsatz der betrachteten Produktionsstation während der Durchführung der EFM, wird ein dazwischen positionierter Puffer nach einer bestimmten Zeit alle Bestände bis zum Sicherheitsbestand aufbrauchen. Die noch zur Verfügung stehende maximale Verweildauer basiert folglich auf der nach einer möglichen Störung weiterhin verfügbaren Pufferkapazität. Unter Berücksichtigung der Höhe der Durchsätze kann anschließend die Verweildauer unter Risiko berechnet werden. Falls der Durchsatz der vorgelagerten Produktionsstation höher ist als der Durchsatz der betrachteten Produktionsstation während der Durchführung der EFM, muss die Formel leicht modifiziert werden.

$$t_{max,Stö}^{EFM,vor,n-1} = \begin{cases} \frac{C^{max} - C^{Stö} + MTTR_{n-1} \times \lambda_n^{Sta}}{\lambda_{n-1}^{Sta} - \lambda_n^{EFM}} & \text{für } \lambda_{n-1}^{Sta} < \lambda_n^{EFM} \\ \frac{C^{Stö} - MTTR_{n-1} \times \lambda_n^{Sta} - C^{min}}{\lambda_n^{EFM} - \lambda_{n-1}^{Sta}} & \text{für } \lambda_{n-1}^{Sta} > \lambda_n^{EFM} \end{cases} \quad (38)$$

Zur Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit kann nach Simon et al. (2017b) auf einen Wahrscheinlichkeitsbaum der einzelnen Fälle zurückgegriffen werden. Durch die Gewichtung der einzelnen Fälle mit den jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten  $\rho_{Fall}$  gelingt nach Formel (39) die Berechnung der maximalen Verweildauer unter Risiko  $t_{max,Risiko}^{EFM}$ .

$$t_{max,Risiko}^{EFM} = \sum_{i=0}^I \rho_{Fall} \times t_{max,Stö}^{EFM} \quad (39)$$

Nach Betrachtung der Einflüsse von Produktionsrisiken auf die zeitlichen Eigenschaften von EFM werden nachfolgend deren Auswirkungen auf die Kosten einzelner EFM betrachtet.

## 6.4 Wirtschaftlichkeitsbewertung von Energieflexibilität

### 6.4.1 Erlöse von Energieflexibilitätsmaßnahmen

Zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von Energieflexibilität werden im vorliegenden Abschnitt 6.4 die Erlöse und Kosten, die direkt einzelnen EFM zugeordnet werden können, betrachtet. Die Kosten werden dabei hinsichtlich ihrer tatsächlichen Entstehung im Betrieb und Risikokosten, die mit einer gewissen Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden sind, unterschieden. Abschnitt 6.5 beschreibt anschließend mit

## 6.4 Wirtschaftlichkeitsbewertung von Energieflexibilität

der Vermarktung der EFM verbundene Investitionskosten, fasst die Ausführungen schließlich in der Phase der Informationsaufbereitung zusammen und bildet damit die Basis für eine Vermarktungsentscheidung von Energieflexibilität.

Bei der Betrachtung von EFM wird dabei zunächst festgestellt, dass nicht jede Maßnahme bezüglich aller bestehenden Vermarktungsmöglichkeiten der Nachfrageflexibilität eingesetzt werden kann. Tabelle 6-4 gibt eine Übersicht der jeweiligen Zuordnung der EFM und den zeitbasierten Tarifen, die in lang- und kurzfristige Tarife<sup>8</sup> unterschieden werden und anreizbasierte Programme, die in positive und negative Leistungserbringung differenziert werden.

Tabelle 6-4: Zuordnung von EFM zu den Kategorien der Vermarktungsmöglichkeit von Nachfrageflexibilität

	Zeitbasierte Tarife		Anreizbasierte Programme	
	Langfristig	Kurzfristig	Positiv	Negativ
 Mittelfristige Anpassung von Prozessstarts	●		●	●
 Kurzfristige Anpassung von Prozessstarts		●	●	●
 Anpassung der Maschinenbelegung	●	●	●	●
 Anpassung der Auftragsreihenfolge	●	●	●	●
 Anpassung von Pausenzeiten	●	●	●	●
 Anpassung von Schichtzeiten	●			
 Unterbrechung von Prozessen	●	●		●
 Anpassung von Prozessparametern	●	●	●	●
 Speicherung von Energie	●	●	●	●
 Wechsel der Energiequelle	●	●	●	●

<sup>8</sup> Alle EFM mit Tätigkeiten der Produktionsplanung sind dabei tendenziell den langfristigen Tarifen zuzuordnen. Kurzfristige Tätigkeiten sind im Bereich der Produktionssteuerung angeordnet (siehe hierzu auch KELLER (2017)).

Im Anschluss können für alle möglichen EFM mithilfe der detaillierten Bewertungen der Eigenschaften von EFM, die in den Abschnitten 5.5 und 6.3 beschrieben sind, und dem Abgleich der jeweiligen spezifischen Grenzwerte eines beliebigen Marktes zum einen die grundsätzliche Möglichkeit einer Teilnahme an der Vermarktungsmöglichkeit und zum anderen die spezifische Erlösberechnung erfolgen. Da der Fokus dieser Arbeit im Bereich der Produktionstechnik und damit auf der technischen und organisatorischen Bewertung von Energieflexibilität liegt und die betriebswirtschaftliche Betrachtung des Forschungsgebiets nur tangiert, wird hierfür auf einschlägige Literatur, wie z. B. FRIDGEN ET AL. (2017), verwiesen. Um dennoch ein vereinfachtes Vorgehen vorstellen zu können, wird nachfolgend die Erlösberechnung für EFM jeweils bezüglich zeitbasierter Tarife und anreizbasierter Programme in Anlehnung an GRAßL (2015) unterschieden und beschrieben.

### Zeitbasierte Tarife

Den Strompreismodellen der zeitbasierten Tarife kann ein aktueller mittlerer Strompreis zugeordnet werden. Produzierende Unternehmen werden nur im Fall einer ausreichend hohen Abweichung des Strompreises eine Anpassung des Strombedarfs vornehmen. Diese erfolgt in Abhängigkeit der Schwankungsbreite und -dauer der Strompreise sowie der Renditeforderung des Unternehmens. Die durchschnittliche Einsparung je kW bzw. MW erfolgt daher unter Einbezug der durchschnittlichen Zeitdauer eines Strompreisniveaus bzw. eines Events  $t^E$ , dem mittleren Strompreis  $e^{ZT}$  und der individuellen Preisschranke von Unternehmen zur Nutzung der Energieflexibilität  $\delta^E$  innerhalb eines bestimmten Betrachtungszeitraums.

Um darauf aufbauend die Erlöse einer EFM  $E_m^{EFM,ZT}$  zu berechnen, muss deren Leistungsänderung  $\Delta P_m^{EFM}$  berücksichtigt werden. Formel (40) zeigt den Zusammenhang zur Berechnung des Erlöses bei Anwendung eines zeitbasierten Tarifs:

$$E_m^{EFM,ZT} = \Delta P_m^{EFM} \times (t^E \times e^{ZT} \times \delta^E) \quad (40)$$

### Anreizbasierte Programme

Die Erlösberechnung bei anreizbasierten Programmen orientiert sich bezüglich der Erlösmöglichkeiten nicht am durchschnittlichen Strompreisniveau, sondern an den Vergütungen, die für das Anpassen und Vorhalten von Leistungsänderungen in Form eines Leistungspreises und Arbeitspreises gezahlt werden. Dabei wird zum einen der durchschnittlich gezahlte Leistungspreis  $e^{LP}$  des anreizbasierten Programms und die Leistungsveränderung der EFM  $\Delta P_m^{EFM}$  und zum anderen der

## 6.4 Wirtschaftlichkeitsbewertung von Energieflexibilität

---

durchschnittlich gezahlte Arbeitspreis  $e^{AP}$  berücksichtigt. Der Arbeitspreis ist zudem vom Mittelwert der Haltungsdauer einer EFM  $\phi t_{verweil,m}^{EFM}$  abhängig (siehe Formel (41)).

$$E_m^{EFM,AP} = (\Delta P_m^{EFM} \times e^{LP}) + (\Delta P_m^{EFM} \times e^{AP} \times \phi t_{verweil,m}^{EFM}) \quad (41)$$

Neben den Energiekosteneinsparungen von EFM muss eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zusätzlich die Kosten berücksichtigen. Nachfolgend werden diese beschrieben und im Speziellen auf die Risikokosten untersucht.

### 6.4.2 Kosten von Energieflexibilitätsmaßnahmen

Bei der Betrachtung von Kosten der EFM werden ausschließlich Kosten betrachtet, die in der Betriebsphase entstehen und direkt einer EFM zugeordnet werden können. Im Weiteren sind Investitionsausgaben im Sinne der Ermöglichung der Vermarktung von EFM explizit nicht betrachtet. Hierzu sei auf Abschnitt 6.5.1 verwiesen.

Nach GRAßL (2015) können die Kostenarten der einmaligen Durchführung von EFM in

- Materialkosten  $MK_m$ ,
- Personalkosten  $PK_m$ ,
- Kosten für Fremddienste  $FD_m$ ,
- Kosten für Rechtsgüter  $RG_m$ ,
- Abschreibungen  $AS_m$ ,
- Wagniskosten  $WK_m$ ,
- Abgaben  $AG_m$  und
- Zinsen  $Z_m$

unterschieden werden. Da dabei kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird, müssen individuell evtl. zusätzliche Kosten ebenfalls berücksichtigt werden. Zur Berechnung der Kosten einer EFM  $K_m^{EFM}$  müssen diese demnach auf die Höhe der jeweiligen Kostenarten überprüft und nach Formel (42) berechnet werden.

$$K_m^{EFM} = MK_m + PK_m + FD_m + RG_m + AS_m + WK_m + AG_m + Z_m \quad (42)$$

Die vorgestellten Kostenarten beinhalten ausschließlich Kosten, die mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 100 % auftreten. Alle weiteren Kosten mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit werden als Risikokosten bezeichnet und sind im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

### 6.4.3 Risikokosten von Energieflexibilitätsmaßnahmen

In Abschnitt 6.3 werden die Auswirkungen von Produktionsrisiken unter Berücksichtigung des Einflusses von EFM mit einem Schadensausmaß beschrieben. Dabei treten stückzahlbezogene Bewertungen von Qualitätsmängeln oder zeitliche Bewertungen eines Produktionsausfalls auf. Nachfolgend wird eine Vorgehensweise zur monetären Bewertung und deren anschließenden Aggregation vorgeschlagen.

#### Monetäre Bewertung von Qualitätsmängeln

Nach DIN 55350 können Qualitätskosten in Fehlerverhütungs-, Qualitätsprüfungs- und Fehlerkosten unterteilt werden. Fehlerverhütungskosten fallen für vorbeugende Maßnahmen zur Qualitätssicherung an. Kosten zur Qualitätsprüfung entstehen hingegen für alle personellen und materiellen Aufwände zur Prüfung der Qualität. Fehlerkosten werden durch fehlerhafte Produkte oder Verfahren verursacht und können nach deren Entdeckungsort in interne und externe Fehlerkosten unterteilt werden.

Da im Rahmen dieser Arbeit die Ist-Situation eines Produktionssystems bewertet wird und zusätzliche durch EFM verursachte Fehlerverhütungs- und Qualitätsprüfungskosten immer mit einer Veränderung des Produktionssystems einhergehen würden, werden diese Kostenarten im Weiteren nicht betrachtet. Dieser Ausschluss ist nötig, da in Kapitel 5 nur EFM betrachtet werden, die im aktuellen Zustand des Produktionssystems durchgeführt werden können.

Die damit im Fokus stehenden Fehlerkosten können nach WENDEHALS (2000) in unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden. *Interne Fehlerkosten* sind automatisch aus Fehlern resultierende Fehlerkosten, die durch fehlerbedingte Mengenabweichungen, fehlerbedingte Ausfallzeiten und fehlerbedingte Schäden an Maschinen verursacht werden, und führen jeweils zu Mehrkosten. Fehlerkosten durch Problemuntersuchungen entstehen vor allem durch den Personaleinsatz bei der Entscheidungsfindung bezüglich des weiteren Umgangs mit Qualitätsmängeln bei Teil- bzw. Endprodukten und bei der Durchführung von Fehlerursachenanalysen. Fehlerkosten aufgrund von fehlerbeseitigenden und -kompensierenden Maßnahmen berücksichtigen die Kosten durch Ausschuss, Nacharbeitsversuche, Verkauf von Produkten minderer Qualität, Sortier- und Wiederholprüfungen, fehlerhaftes Zuliefermaterial und mangelhafte Designqualität. Fehlerkosten durch weitere interne Fehlerkostenelemente können bei der Dokumentation von Fehlern sowie bei der Aufbereitung und Verteilung von Berichten entstehen. *Externe Fehlerkosten*

## 6.4 Wirtschaftlichkeitsbewertung von Energieflexibilität

können in durch Reklamationen<sup>9</sup> und infolge eines fehlerbedingten Kaufverzichts entstehende Kosten unterschieden werden. In letztere Gruppe können auch zukünftige Kaufverzichte der Kunden zählen. Abbildung 6-20 zeigt die Kategorisierung der Fehlerkosten. Zur exakten Berechnung der einzelnen internen und externen Fehlerkosten wird auf die einschlägige Literatur verwiesen (KERN 1996; WILDEMANN 1997; WENDEHALS 2000).

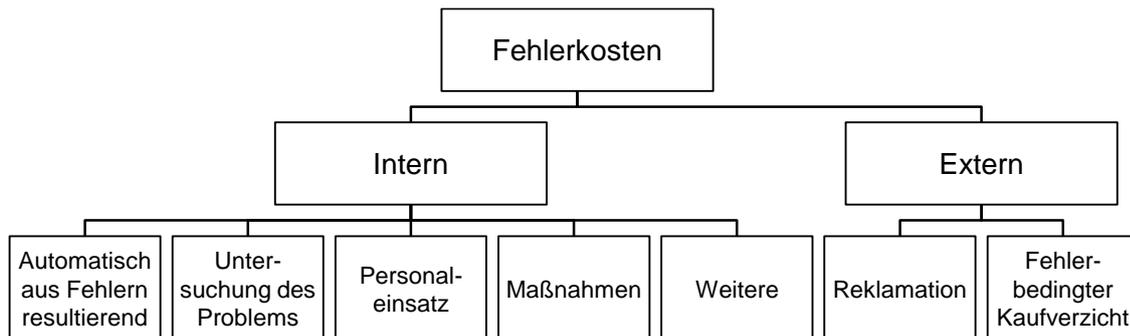


Abbildung 6-20: Kategorien von Fehlerkosten (KERN 1996; WILDEMANN 1997; WENDEHALS 2000)

Um den Einfluss einer EFM auf die Qualitätsmängelkosten  $K_m^{QM}$  zu bewerten, ist zunächst der Betrachtungszeitraum zu bestimmen. Bspw. können die Kosten für einen Monat berechnet und betrachtet werden. Im nächsten Schritt werden diese durch die Zuordnung der identifizierten ursprünglichen Eintrittswahrscheinlichkeit  $EW_{m,i}$  und der veränderten Eintrittswahrscheinlichkeit  $EW_{m,i}^{Neu}$  zu den Qualitätsmängelrisiken des erweiterten Risikoinventars (siehe Abbildung 6-13) verbunden. Die o. g. Kategorien können zu den internen  $IF_i$  und externen Fehlerkosten  $EF_i$  aufsummiert werden. Zusätzlich müssen die Fehlerkosten  $IF_j$  und  $EF_j$  der zuvor nicht im Risikoinventar aufgetretenen Risiken mit deren Eintrittswahrscheinlichkeit  $EW_{m,j}$  einbezogen werden. Unter Berücksichtigung der neuen Risiken und der aufgrund von EFM gestiegenen Eintrittswahrscheinlichkeiten lassen sich anhand von Formel (43) die Qualitätsmängelkosten ermitteln.

$$K_m^{QM} = \sum_i^I \left( \left( \frac{EW_{m,i}^{Neu}}{EW_{m,i}} - 1 \right) \times (IF_i + EF_i) \right) + \sum_j^J EW_{m,j} \times (IF_j + EF_j) \quad (43)$$

<sup>9</sup> Insbesondere werden dabei Reklamationen im Rahmen der gesetzlichen Gewährleistung nach §459 und §633 BGB betrachtet.

### Monetäre Bewertung von Produktionsausfällen

Produktionsausfallkosten werden in der Literatur häufig bei der Beschreibung von Instandhaltungskosten aufgezählt (PAWELLEK 2016). Diese können in direkte und indirekte Instandhaltungskosten aufgeteilt werden (siehe Abbildung 6-21). Zu den *direkten Instandhaltungskosten* zählen dabei die Inspektion, Wartung und Verbesserung. *Indirekte Instandhaltungskosten* beschreiben dagegen alle Kosten infolge von Produktionsausfällen. Da diese das Mehrfache der direkten Instandhaltungskosten betragen können, stellen sie eine relevante Größe bei der weiteren Bewertung dar (KUHN ET AL. 2006). Hierzu zählen nach PAWELLEK (2016) Stillstandskosten (z. B. für unbeschäftigtes Personal), entgangene Deckungsbeiträge durch Produktionsausfälle sowie erforderliche Aufwendungen, um die ausgefallene Produktion wieder aufzuholen (z. B. durch Überstunden aber auch die Instandsetzung).

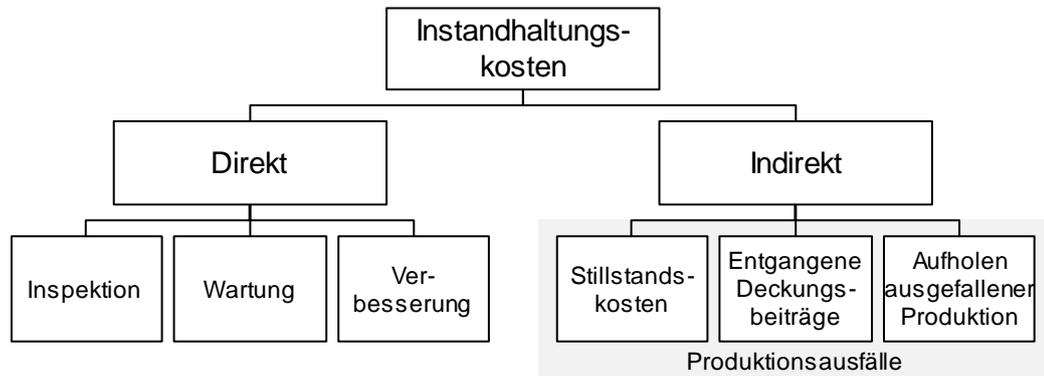


Abbildung 6-21: Kategorien von Instandhaltungskosten und Einordnung von Produktionsausfällen (KUHN ET AL. 2006; BETH ET AL. 2009; MATYAS 2013; PAWELLEK 2016)

Die Ermittlung der indirekten Instandhaltungskosten gestaltet sich in der Praxis sehr komplex (BETH ET AL. 2009; MATYAS 2013). Daher werden die Produktionsausfallkosten in vielen Unternehmen mit vereinfachten Methoden der Berechnung des entgangenen Deckungsbeitrags oder der Berücksichtigung der Wertschöpfungsminderung quantifiziert. Diese werden nachfolgend kurz beschrieben und bewertet.

Die Berechnung der *Produktionsausfallkosten über die Minderung des Deckungsbeitrags* und damit der Differenz aus Erlösen und variablen Kosten (PREIBLER 2008) basiert auf der Annahme einer reduzierten produzierten Menge durch den Produktionsausfall. Das Resultat ist eine Verringerung des erzielten Deckungsbeitrags und infolgedessen ein verschlechtertes Unternehmensergebnis (BETH ET AL.

## 6.4 Wirtschaftlichkeitsbewertung von Energieflexibilität

---

2009). Die Produktionsausfallkosten können demnach über die Minderung des Deckungsbeitrags bewertet werden. Für ein vertieftes Verständnis der Methoden sei auf die o. g. Quellen verwiesen.

Zur Bestimmung der *Produktionsausfallkosten über die Wertschöpfungsminde- rung* werden nach BETH ET AL. (2009) in vielen Unternehmen kalkulatorische Maschinenstundensätze herangezogen. Diese werden durch die geleisteten Maschinenstunden im Jahr und den anfallenden Gesamtkosten der Produktion kalkuliert. Maschinenstundensätze beinhalten demnach neben laufenden Kosten, wie bspw. Abschreibungen, auch variable Kostensätze, wie z. B. Leistungslöhne. Eine ausführliche Vorgehensweise zur Kalkulation der Maschinenstundensätze ist u. a. MÜLLER (2009) zu entnehmen. Zur Berechnung der Wertschöpfungsminde- rung sind zusätzlich die Ausfallzeiten und die Auslastung aufzunehmen (MATYAS 2013). Letztere ist zu berücksichtigen, da z. B. ein Stillstand nur dann negative Auswirkungen auf die Wertschöpfung hat, wenn die Produktionsstation gleichzeitig einen Auftrag zur Bearbeitung hätte (BETH ET AL. 2009). Nachfolgend werden die Methoden bewertet.

Die Methode der Bestimmung der Produktionsausfallkosten über die Minderung des Deckungsbeitrags ist nur unter gewissen Voraussetzungen möglich. Zum einen darf das zu bewertende Produktionssystem nach BETH ET AL. (2009) keine Puffer zur zeitlichen Entkopplung von Produktionsstationen beinhalten und zum anderen wird vorausgesetzt, dass der Auftragsbestand größer als die Produktionskapazität ist. Die Produktion ist somit immer voll ausgelastet, wodurch sich ein Produktionsausfall direkt auf das Tagesproduktionsvolumen auswirkt. Solche Bedingungen sind bspw. in der Verfahrenstechnik oder in der klassischen Fließbandfertigung zu finden. Da die Anforderungen der hier entwickelten Methode eine möglichst breite Anwendung in unterschiedlichen Produktionssystemen anstrebt (siehe Abschnitt 4.3), wird dieser Ansatz nicht weiterverfolgt. Nach MATYAS (2013) wird bei der Berechnung der Wertschöpfungsminde- rung ein erheblicher Anteil der Ausfallfolgekosten nicht berücksichtigt. Bspw. werden entgangene Deckungsbeiträge und Folgekosten, wie z. B. Konventionalstrafen bei verspäteter Fertigstellung, mit dieser Methode nicht erfasst. Trotzdem ist die Methode in Unternehmen weitverbreitet und wird daher nachfolgend zur Berechnung des Einflusses von EFM auf die Produktionsausfallkosten herangezogen.

Dabei wird in Anlehnung an BETH ET AL. (2009) nach Formel (44) die Auslastung der jeweiligen Produktionsstation  $A^{Sta}$  und der kalkulatorischer Maschinenstundensatz pro Leistungsstunde  $M_{i,n}^{Sta}$  bzw.  $M_{j,n}^{Sta}$  herangezogen. Zusätzlich müssen

die Eintrittswahrscheinlichkeiten des ursprünglichen Risikoinventars  $EW_{m,i}$ , der im erweiterten Risikoinventar veränderten Eintrittswahrscheinlichkeiten  $EW_{m,i}^{Neu}$  und die Eintrittswahrscheinlichkeiten neu identifizierter Risiken  $EW_{m,j}$  betrachtet werden. Unter Berücksichtigung des identifizierten Schadensausmaßes  $SA_i^{PA}$  bzw.  $SA_j^{PA}$  der Produktionsausfallrisiken des erweiterten Risikoinventars können diese anschließend berechnet und aufsummiert werden (siehe Abbildung 6-13).

$$K_m^{PA} = \sum_i^I \left( (EW_{m,i}^{Neu} - EW_{m,i}) \times SA_i^{PA} \times M_{i,n}^{Sta} \times A^{Sta} \right) + \sum_j^J EW_{m,j} \times SA_j^{PA} \times M_{j,n}^{Sta} \times A^{Sta} \quad (44)$$

### Bewertung der Risikosituation einzelner EFM

Nach der monetären Bewertung von potenziellen Qualitätsmängeln  $K_m^{QM}$  und Produktionsausfällen  $K_m^{PA}$  erfolgt eine direkte Zuordnung der Risikokosten zu einzelnen EFM bzw. EFMB. Dies gelingt durch die eindeutige Zuweisung des erweiterten Risikoinventars (siehe Abbildung 6-13). Unter Berücksichtigung der Anzahl der Durchführung von EFM im Betrachtungszeitraum  $D$  können somit in Formel (45) die Kosten einer einmaligen Durchführung  $K_m^R$  berechnet werden.

$$K_m^R = \frac{K_m^{QM} + K_m^{PA}}{D} \quad (45)$$

Damit können zusammengefasst die folgenden Informationen bezüglich der Risikobewertung gegeben werden:

- Neue Werte der Verfügbarkeit und aller weiteren zeitlichen Eigenschaften einer EFM unter Berücksichtigung von Produktionsrisiken je Eigenschaft
- Relative Veränderung der Eigenschaften einer EFM als Risikokennzahl
- Risikokosten einer EFM

Im Anschluss an die Berechnung der Wirtschaftlichkeit einzelner EFM wird nachfolgend die Aufbereitung der gesammelten zusätzlich notwendigen Informationen für eine Vermarktungsentscheidung der Energieflexibilität beschrieben. Hierbei müssen zunächst die Investitionsausgaben betrachtet werden.

## 6.5 Vermarktungsentscheidung von Energieflexibilität als Investitionsentscheidung

### 6.5.1 Investitionsausgaben von Energieflexibilität

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Ist-Situationsbewertung. Wie in Abschnitt 1.3 dargestellt, wird damit eine Änderung des Produktionssystems, etwa zur Steigerung der Energieflexibilität, ausgeschlossen. Dennoch sind mit der Erschließung von verschiedenen Vermarktungsmöglichkeiten der Nachfrageflexibilität Investitionen verbunden.

*Tabelle 6-5: Beispielhafte Investitionskosten für die Einrichtung des Energiebezugs über die Strombörse und die Teilnahme an der Minutenreserve*

Beispiel	EEX	Minutenreserve
Zulassung	Anerkennung als Handelsteilnehmer durch die European Commodity Clearing AG und Anerkennung durch EEX	Präqualifikation – beim ÜNB, in dessen Regelzone die betreffenden technischen Einheiten unabhängig von der Spannungsebene netztechnisch angeschlossen sind
Personal	Schulung und Zulassung mindestens einer beruflich geeigneten Person (z. B. EEX-Börsenhändlerprüfung)	Schulung der entsprechenden Mitarbeiter
Technische Anbindung	Frontends für Zugang an Markt	Erfüllung der Mindestanforderungen, bezüglich der Verfügbarkeit, Vertraulichkeit, Integrität, Verbindlichkeit, Nachweisbarkeit und Authentizität

Sachinvestitionen

Immaterielle Investitionen

Nach PAPE (2015) können diese in Sach-, immaterielle, und Finanzinvestitionen unterteilt werden. Während Finanzinvestitionen, wie Beteiligungen, Anleihen und Forderungen, keine Rolle spielen, werden nachfolgend beispielhaft Sach- und immaterielle Investitionen aufgeführt. Diese sind in Tabelle 6-5 für die Einrichtung des Energiebezugs über die Strombörse laut §§ 14 ff. der EEX-Börsenordnung sowie im § 19 (4) BörsG als Beispiel für zeitbasierte Tarife und für die Teilnahme

an der Minutenreserve als Beispiel für anreizbasierte Programme aufgezählt. Die Ausführungen zu den Erlösen, Kosten und Investitionsausgaben werden im nachfolgenden Abschnitt zur Informationsaufbereitung zusammengefasst.

### 6.5.2 Informationsaufbereitung

Die Entscheidung der Vermarktung von Energieflexibilität ist, wie im letzten Abschnitt 6.5.1 dargelegt, mit Investitionen verbunden und damit für produzierende Unternehmen eine Investitionsentscheidung. Nach MOROFF UND FOCKE (2016) werden dabei die Kosten von den Erlösen subtrahiert und mit den Investitionsausgaben innerhalb eines bestimmten Zeitraums verglichen. Abbildung 6-22 stellt die in diesem Zusammenhang benötigten Größen gegenüber. Zusätzlich werden die Abschnitte der vorliegenden Arbeit aufgezeigt, in denen die Herleitung der Vorgehensweise zur Erarbeitung der notwendigen Informationen beschrieben ist. Der erste Lösungsbaustein (FF 1) stellt dabei die benötigten Informationen bzw. Eigenschaften einzelner EFM den Strategien zur Bildung von EFMB (FF 2) zur Verfügung. Anschließend an die technische und organisatorische Bewertung der EFM und EFMB ist das Ergebnis des Risikobausteins (FF 3) zum einen die unter Risiko bewerteten EFM und EFMB und zum anderen die mit der Durchführung von Energieflexibilität verbundenen Risikokosten. Anhand der detaillierten Bewertung aller notwendigen Informationen können die Erlöse der EFM wie in Tabelle 6-4 beschrieben unter Umständen sowohl mithilfe von zeitbasierten Tarifen  $E_m^{EFM,ZT}$  wie auch von anreizbasierten Programmen  $E_m^{EFM,AP}$  bewertet werden. In diesem Fall wird der Mittelwert der prognostizierten Erträge verrechnet. Im Anschluss ist die Summe aller Erlöse der EFM des finalen Maßnahmenkatalogs (Abschnitt 6.4.1) und deren Kosten  $K_m^{EFM}$  (Abschnitt 6.4.2) sowie zusätzlichen Risikokosten  $K_m^R$  (Abschnitt 6.4.3) zu berücksichtigen. Eine übliche Kennzahl ist dabei die Berechnung der Amortisationszeit, die in Anlehnung an WESTKÄMPER (2006) nach Formel (46) berechnet wird.

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{Investitionsausgaben}}{\sum_m^M E_m^{EFM,AP} + E_m^{EFM,ZT} - K_m^{EFM} - K_m^R} \quad (46)$$

Unter Berücksichtigung der unternehmensüblichen Amortisationszeit kann im Anschluss die Entscheidung über eine Vermarktung getroffen werden, da dem Management alle hierzu benötigten Informationen zur Energieflexibilität zur Verfügung stehen (FF 4).

## 6.6 Fazit

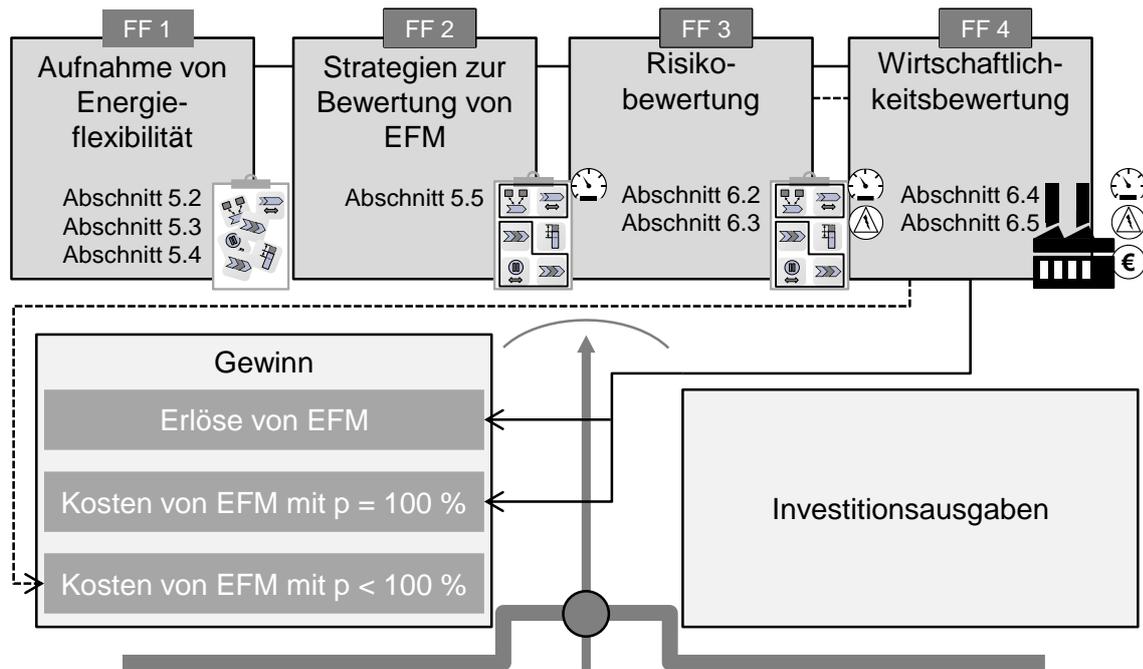


Abbildung 6-22: Informationen der Vermarktungsentscheidung

## 6.6 Fazit

Im vorliegenden Kapitel wurde die Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung von Energieflexibilität entwickelt. Dies stellt das zweite Element der Methodik zur Bewertung von Energieflexibilität von Produktionssystemen dar. Das dabei aufgezeigte Vorgehen beschreibt Energieflexibilität im Wirkgefüge von Produktionsrisiken anhand von zwei Wirkrichtungen. Durch die Erweiterung bestehender Methoden zum Verständnis und zur Bewertung der Risikosituation gelingt die Ableitung von insgesamt drei Bewertungsstrategien. Dabei wird anhand der ersten Strategie ein Vorgehen zur Bewertung der Auswirkungen von Energieflexibilität auf zuvor aufgenommene oder neu identifizierte Produktionsrisiken (SBPR) entwickelt. Unter Berücksichtigung deren Einflüsse werden anschließend die Verfügbarkeit (SBVR) und alle weiteren zeitlichen Eigenschaften (SBZR) von EFM unter der Berücksichtigung von Risiken bewertet. Mit Einbeziehung des finalen Maßnahmenkatalogs (siehe Kapitel 5) und dessen detaillierter Risikobewertung wird darauf aufbauend ein marktbasierendes Vorgehen zur Erlösberechnung für EFM vorgestellt. Abschließend wird gezeigt, dass die Entscheidung über die Vermarktung von Energieflexibilität als Investitionsentscheidung beschrieben werden kann und alle nötigen Informationen hierfür durch die Methodik bereitgestellt werden. Im nachfolgenden Kapitel 7 erfolgt die Anwendung der Methodik im Praxisbeispiel.

# 7 Anwendung der Methodik im Praxisbeispiel

## 7.1 Übersicht

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Methodik zur risikoorientierten Bewertung von Energieflexibilität von Produktionssystemen fokussiert die Bewertung der Fähigkeit eines Produktionssystems, sich an Anforderungen des Energiemarkts anzupassen. Ein geeignetes Praxisbeispiel muss aus diesem Grund mehrere miteinander verknüpfte Produktionsstationen aufweisen, um das entwickelte Vorgehen der Methodik anwenden zu können. Hierzu wurde im Rahmen der Forschungsarbeiten der *Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV)* im vom *Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)* geförderten *Kopernikus-Projekt: Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie)* die Methodik beispielhaft umgesetzt. Aufgrund einer hohen installierten Leistung und der von den Unternehmen für Lastreduktionen und Lasterhöhungen als nutzbar eingeschätzten Prozessen (LANGROCK ET AL. 2015) wurde die Papierindustrie als Anwendungsbeispiel für eine detaillierte Bewertung ausgewählt. Abschnitt 7.2 beschreibt dabei das in Kapitel 5 entwickelte Vorgehen zur technischen und organisatorischen Bewertung. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 7.3 die Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung vorgenommen (siehe Kapitel 6).

## 7.2 Beschreibung des Anwendungsszenarios

Bevor die tatsächliche Bewertung des Produktionssystems vorgenommen wird, erfolgt die in Abbildung 7-1 dargestellte allgemeine Beschreibung des Prozesses zur Herstellung von Papier, wie er in vielen Fabriken der Branche vorgefunden werden kann. Grundsätzlich können die drei Schritte der *Halbstoff-, Papierproduktion* und *Verpackung inkl. Versand* unterschieden werden. Die benötigten Rohstoffe sind dabei Holzhackschnitzel, Altpapier und weitere chemische Rohstoffe. Zur Halbstoffproduktion werden die Holzhackschnitzel in einer Refiner-Anlage<sup>10</sup> unter Zuführung von Druck und Wärme zwischen zwei rotierenden Scheiben zerfasert, um einen thermomechanisch aufgeschlossenen TMP-Halbstoff zu erhalten. Darüber hinaus wird für die Produktion Altpapier-Halbstoff (AP-Halbstoff) benötigt.

---

<sup>10</sup> Auch Thermomechanical pulp (thermomechanischer Holzstoff) -Anlage (TMP-Anlage)

## 7.2 Beschreibung des Anwendungsszenarios

Hierzu wird Altpapier in einem chemischen Verfahren von der Druckfarbe befreit. Der zweistufige Prozess beinhaltet die Erstflotation (EAP) und die Nachflotation (NAP), in welchem die Druckfarbpartikel von den Fasern getrennt werden. Die EAP und NAP-Anlagen sind grundsätzlich voneinander unabhängig ausführbar und werden daher als separate Anlagen betrachtet. Beide Halbstoffe werden in Puffern, sog. TMP- bzw. AP-Bütten, gefüllt und für die Papiermaschinen bereitgestellt. Beispielhaft sind in der Abbildung 7-1 drei Papiermaschinen dargestellt.

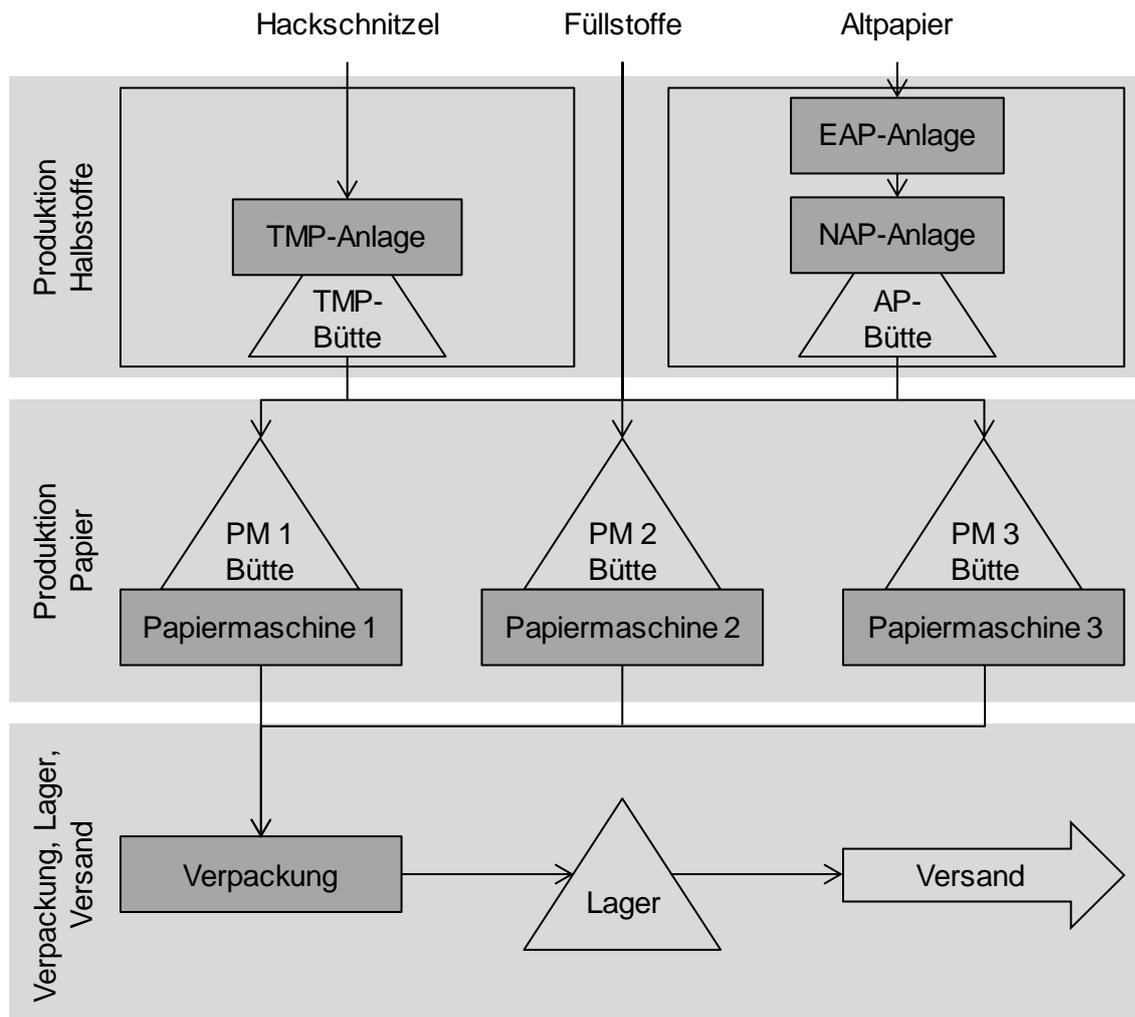


Abbildung 7-1: Produktionsprozess in der Papierindustrie

Zur Herstellung unterschiedlicher Papiersorten werden unterschiedliche Anteile von TMP-, AP-Halbstoffen und zusätzlichen Füllstoffen, wie z. B. Kaolin oder Kalziumkarbonat, benötigt. Im Stoffauflaufkasten der Papiermaschine wird die Fasersuspension aufgetragen und anschließend in der Siebpartie zur Papierbahn geformt. In der Presspartie wird durch Walzendruck ein Großteil des Wasserge-

halts aus der Papierbahn ausgepresst. Der restliche Wasseranteil wird in der Trockenpartie, bestehend aus erhitzten Hohlzylindern, je nach Papiersorte auf drei bis acht Prozent reduziert. Der Aufroller wickelt die fertige Papierbahn zu Maschinenrollen auf, die einen Durchmesser von vier Meter haben können, 100 Tonnen wiegen und 100 km Papierbahn enthalten. Fertige Papierrollen werden abschließend kundenspezifisch geschnitten und verpackt, bevor sie in das Lager oder direkt in die Distribution transportiert werden. Nachfolgend wird die exemplarische Bewertung von Energieflexibilität im beschriebenen Produktionssystem vorgestellt.

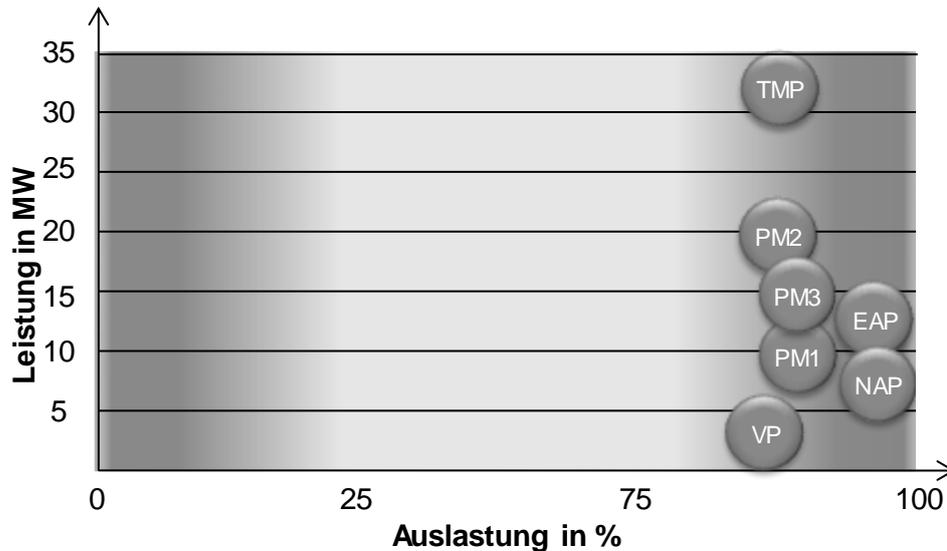
### 7.3 Bewertung von Energieflexibilität

Die Bewertung von Energieflexibilität gliedert sich in die vier Schritte Identifikation von Energieflexibilität, Bestimmung der Bewertungsparameter, Kategorisierung von EFM und Durchführung der Bewertungsstrategien. Der Fokus der nachfolgenden Beschreibung liegt auf der initialen Identifikation von EFM und der Durchführung der Bewertungsstrategien, wodurch die Ergebnisse der Strategien beispielhaft vorgestellt werden.

#### Identifikation von EFM

Als erstes erfolgt die Auswahl der Produktionsstationen im beschriebenen Produktionssystem. Da die einzelnen EAP- und NAP-Anlagen nahezu gleiche Eigenschaften aufweisen, werden diese im Gegensatz zu den Papiermaschinen nicht einzeln aufgeführt. Mithilfe der in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Vorgehensweise wird eine Reihenfolge zur weiteren Betrachtung der Produktionsstationen festgelegt. Das Ergebnis ist in Abbildung 7-2 festgehalten. Dabei wird der TMP-Anlage aufgrund eines besonders hohen Leistungsbedarfs bei gleichzeitiger moderater Auslastung ein hohes Energieflexibilitätpotenzial zugeordnet. Die besonders hohe Auslastung der EAP- und NAP-Anlagen deutet auf geringe Erwartungen bezüglich einer zeitlichen Verschiebemöglichkeit von Last hin. Die Betrachtung wird allerdings weiter fortgesetzt, da die Anlagen nahezu baugleich mehrfach bestehen und sich daher weitere Flexibilität ergeben kann. Die Verpackungsanlage wird dagegen nicht weiter betrachtet, da diese das mit Abstand geringste Potenzial aufweist.

## 7.3 Bewertung von Energieflexibilität



Reihenfolge	Produktions-element	Produktions-station	Kürzel	$\Delta P$ in MW	Auslastung in %	Anzahl
1	1	TMP-Anlage	TMP	32,0	89	1
2	4	Papiermaschine 2	PM 2	19,5	88	1
3	2	EAP-Anlage	EMP	12,5	98	6
4	5	Papiermaschine 3	PM 3	14,5	91	1
5	3	NAP-Anlage	NAP	7,5	99	3
6	6	Papiermaschine 1	PM 1	9,5	89	1
7	7	Verpackung	VP	0,3	85	1

Abbildung 7-2: Reihenfolgebildung der betrachteten Produktionsstationen

Für jede betrachtete Anlage werden anschließend Anlagensteckbriefe ausgefüllt und dabei die jeweils möglichen Zustände und deren zeitlichen Anteile aufgenommen. Beispielhaft können für die TMP-Anlage die vier Zustände Normalbetrieb, Reduzierter Betrieb, Teilabschaltung bei Störungen und Wartungen sowie Stillstand identifiziert werden. Siehe hierzu den Anlagensteckbrief der TMP-Anlage in Abbildung 10-1 des Anhangs.

Im Anschluss erfolgt die Identifikation von EFM und damit die Beschreibung der möglichen Zustandswechsel der Produktionsstationen. Tabelle 7-1 zeigt einen Auszug der aufgenommenen EFM.

*Tabelle 7-1: Auszug identifizierte EFM und deren Leistungsveränderung*

Station	Nr.	EFM-Typ	Beschreibung	$\Delta P$ in MW
TMP	1.1	Unterbrechung von Prozessen	Anlage abschalten	30,5
	1.2	Anpassung von Prozessstarts	Anlage durchblasen	30,5
	1.3	Anpassung von Prozessparametern	Reduzierte Leistung	2,5
	1.4	Anpassung von Prozessstarts	Instandhaltung	30,5
EMP	2.1	Anpassung der Maschinenbelegung	Abschaltung einzelner Linien	1,5
NAP	3.1	Anpassung der Maschinenbelegung	Abschaltung einzelner Linien	2
PM 1	4.1	Anpassung der Auftragsreihenfolge	Produktion Buchdrucksorte	2
	4.2	Anpassung von Prozessstarts	Instandhaltung	9
PM 2	5.1	Anpassung von Prozessstarts	Instandhaltung	17,5
PM 3	6.1	Anpassung von Prozessstarts	Instandhaltung	13,5

### Durchführung der Strategien

Im Anschluss an die Identifikation der EFM werden die zeitlichen Eigenschaften und die mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 100 % verbundenen Kosten bewertet und anhand der in Abschnitt 5.4.3 beschriebenen Vorgehensweise Maßnahmenkatalogen zugeordnet. Im letzten Schritt der Bewertung durchlaufen die EFM die einzelnen Strategien zur Bewertung auf Produktionssystemebene (siehe Abbildung 5-17).

Das Ergebnis ist in Tabelle 7-2 in Form einer Übersicht der gebildeten EFMB dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass eine parallele Maßnahmenbündelung nur mit unterschiedlichen Produktionsstationen erfolgen kann, da die Grundvoraussetzung eine simultane Leistungsveränderung darstellt. Eine sequenzielle Maßnahmenbündelung ist auch innerhalb einer Produktionsstation möglich.

Beispielhaft wird die Bündelbildung der EFM 2.1 Anpassung der Maschinenbelegung der EMP-Anlagen sowie der EFM 3.1 der NAP-Anlagen im Rahmen der in Abschnitt 5.5.3 beschriebenen Strategie zur Bewertung der Leistungsveränderung betrachtet. Die Leistungsveränderung der EFM 2.1 wird dabei aufgrund der durch den betrachteten Energiemarkt vorgegeben Leistungsveränderung von ca. 3 MW als zu niedrig eingestuft. Da die zeitlichen Eigenschaften der EFM durchgehend positiv bewertet sind, wird diese dem Basismaßnahmenkatalog zugeordnet und daher anschließend für die Überprüfung einer möglichen Verbesserung durch Bündelbildung in der SBL ausgewählt.

## 7.3 Bewertung von Energieflexibilität

Tabelle 7-2: In den Bewertungsstrategien gebildete EFMB

		TMP				EAP	NAP	PM6		PM7	PM9
		1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	3.1	4.1	4.2	5.1	6.1
TMP	1.1	S	S		S	P	P	P	P	P	P
	1.2	S	S		S	P	P	P	P	P	P
	1.3			S		P,S	P,S	P,S	P	P	P
	1.4	S	S		S	P	P	P	P	P	P
EAP	2.1	P	P	P,S	P	S	P,S	P,S	P	P	P
NAP	3.1	P	P	P,S	P	P,S	S	P,S	P	P	P
PM6	4.1	P	P	P,S	P	P,S	P,S	S		P	P
	4.2	P	P	P	P	P,S	P		S	P	P
PM7	5.1	P	P	P	P	P	P	P	P	S	P
PM9	6.1	P	P	P	P	P	P	P	P	P	S

Hohe Eignung
  Grundsätzlich geeignet
  Ungeeignet

S: Sequenzielles EFMB P: Paralleles EFMB

Abbildung 7-3 illustriert das nachfolgend beschriebene Vorgehen. Die dem Kombinationsmaßnahmenkatalog zugeordnete EFM 3.1 wird anhand der Formeln (6), (7), (8), (9), (10) und (11) bezüglich der Erfüllung der zeitlichen Eigenschaften und der geforderten Leistungsänderung überprüft. Da jeder der Prüfungsvorgänge, u. a. aufgrund eines ähnlichen Aufbaus der Anlagen, positiv abgeschlossen wird, erfolgt anschließend die Bündelbildung und die Bewertung des Bündels anhand der Formeln des Anhangs 10.2 in der Tabelle 10-5.

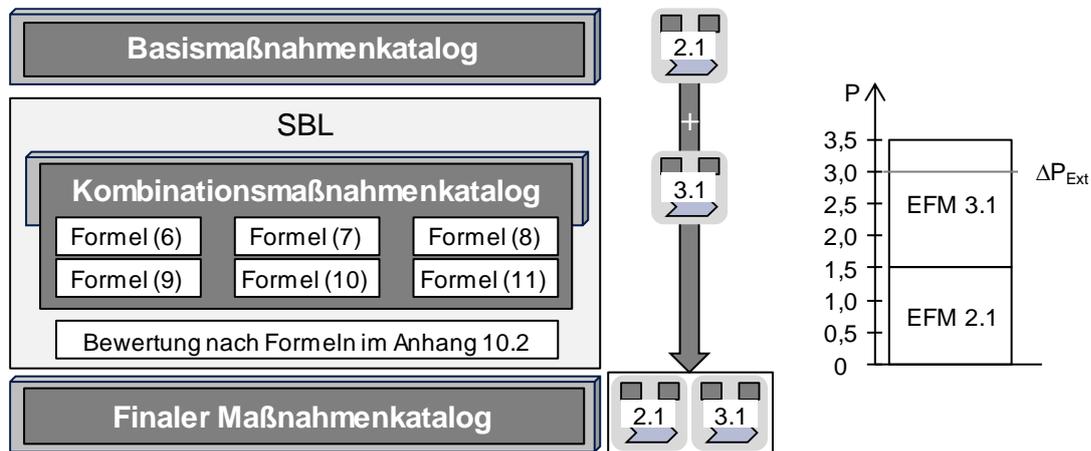


Abbildung 7-3: Vorgehen der beispielhaften Bündelung von Energieflexibilitätsmaßnahmen

Tabelle 7-3 zeigt dabei die in diesem Fall angenommenen Anforderungen des Energiemarktes, die Eigenschaften der zwei EFM und des anschließenden Bündels.

*Tabelle 7-3: Eigenschaften und Anforderungen an ein beispielhaftes EFM*

Eigenschaft	Anforderung	M 2.1		M3.1		EFM-Bündel	
$\Delta P$	ca. 3 MW	1,5 MW	✘	2 MW	✘	3,5 MW	✔
$\beta$	min. 75 %	90 %	✔	95 %	✔	85 %	✔
$t_{akt}$	max. 15 Min	5 Min	✔	10 Min	✔	10 Min	✔
$t_{min}$	max. 15 Min	10 Min	✔	10 Min	✔	10 Min	✔
$t_{max}$	min. 4 h	4 h	✔	4 h	✔	4 h	✔
$t_{deakt}$	max. 15 Min	5 Min	✔	12 Min	✔	12 Min	✔

Im Anschluss an die technische Bewertung der Energieflexibilität wird nachfolgend die Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Anwendungsbeispiels in Auszügen dargestellt.

### 7.4 Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung

Das in Kapitel 6 beschriebene Vorgehen zur Bewertung der Risikosituation unter Berücksichtigung von Energieflexibilität und der anschließenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgt in den vier aufeinanderfolgenden Schritten Beschreibung der Risikosituation, Bewertung von Energieflexibilität, Wirtschaftlichkeitsberechnung einzelner EFM und Vermarktungsentscheidung. Der Fokus liegt dabei erneut auf der exemplarischen Beschreibung der Durchführung der Strategien und der darauffolgenden Wirtschaftlichkeitsbewertung.

#### Durchführung der Strategien

Aus didaktischen Gründen wird die Durchführung der Strategien anhand einer einzelnen EFM beschrieben. Dabei wird die im vorherigen Abschnitt identifizierte EFM 1.1, die einer Unterbrechung des Prozesses der TMP-Anlage entspricht, herangezogen und deren Wirkung in der erweiterten Ursache-Wirkungskette beschrieben. Dabei sind zunächst im Rahmen der SBPR die mit der ausgewählten EFM verbundenen Risiken zu beschreiben. In Tabelle 7-4 werden die drei identifizierten Risiken mit ihrer zugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeit jeweils mit und ohne Berücksichtigung von Energieflexibilität und dem Schadensausmaß – bezogen auf einen frei gewählten Betrachtungszeitraum von einem Monat – dargestellt. So kann z. B. eine häufigere Unterbrechung des TMP-Prozesses zu einem erhöhten Verschleißaufkommen und damit aufgrund von zusätzlich notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen zu einem Produktionsausfall von 10 Stunden innerhalb eines

## 7.4 Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung

Monats führen. Dieses Risiko tritt ohne die Betrachtung der EFM nicht auf, da die bisher geplanten Instandhaltungsmaßnahmen nicht als Risiko auftreten bzw. bezeichnet werden. Die hier beispielhaft betrachtete EFM birgt keine Risiken, die Qualitätsmängel verursachen, da eine Unterbrechung des Prozesses nahezu keine unmittelbaren Auswirkungen auf den TMP-Stoff hat. Tabelle 7-4 zeigt einen Auszug aus dem erweiterten Risikoinventar mit Bezug auf die EFM 1.1 Unterbrechung des TMP-Prozesses.

Tabelle 7-4: Auszug aus dem erweiterten Risikoinventar bezogen auf die EFM 1.1 Unterbrechung des TMP-Prozesses

i	m	Kurzbeschreibung veränderter Risiken	$PE_i$	$OK_i$	$EW_i$	$EW_{m,i}^{NEU}$	$SA_i^{PA}$	$SA_i^{QM}$
			[-]	[-]	[%]	[%]	[h]	[St]
1	1	Fehlerhafte Maschinenbedienung	1	PPA	3	7	15	
1	2	Gefährdung Sicherheitsbestands	1	LPA	2	8	8	
...								
j	m	Kurzbeschreibung neu identifizierter Risiken	$PE_j$	$OK_j$	$EW_j$	$SA_j^{PA}$	$SA_j^{QM}$	
			[-]	[-]	[%]	[h]	[t]	
1	3	Erhöhter Verschleiß	1	BPA	5	5		
1	4	Verminderung der Stoffqualität	1	BQM	6		50	
...								

PE	Produktionselement	TPA	Transport (Produktionsausfall)	PQM	Personal (Qualitätsmängel)
OK	Objektklasse	TQM	Transport (Qualitätsmängel)	LPA	Lager (Produktionsausfall)
EW	Eintrittswahrscheinlichkeit	BPA	Betriebsmittel (Produktionsausfall)	LQM	Lager (Qualitätsmängel)
SA	Schadensausmaß	BQM	Betriebsmittel (Qualitätsmängel)	IPA	Information (Produktionsausfall)
		PPA	Personal (Produktionsausfall)	IQM	Information (Qualitätsmängel)

Nach der Betrachtung der Wirkrichtung 1 werden nachfolgend die zwei Strategien SBVR und SBZR im Rahmen der Wirkrichtung 2 untersucht. Somit stellt die betrachtete EFM 1.1 nun nicht mehr den Ausgangspunkt, sondern das Bewertungsobjekt an sich dar. Durch die Veränderungen des in Tabelle 7-4 in Auszügen dargestellten erweiterten Risikoinventars werden die Eigenschaften der jeweils betrachteten EFM beeinflusst. Mithilfe der Formeln (32) bis (39) lassen sich die neuen Werte der Eigenschaften der EFM berechnen. Das Ergebnis dieser Berechnungen ist in Tabelle 7-5 verzeichnet. Bspw. ist dabei ersichtlich, dass die Verfügbarkeit der TMP-Anlage aufgrund der veränderten Risikosituation, u. a. da der erhöhte Verschleiß der durch die EFM entstanden ist und zusätzliche Instandhal-

tungsmaßnahmen erfordert, gesunken ist. Im Weiteren sinkt aus denselben Gründen die durchschnittliche maximale Verweildauer und es entsteht eine Erhöhung der Deaktivierungsdauer.

*Tabelle 7-5: Werte der Eigenschaften der EFM 1.1 ohne und mit Berücksichtigung der veränderten Risikosituation aufgrund von Energieflexibilität*

<b>EFM 1.1</b>	<b><math>\Delta P</math> in MW</b>	<b><math>t_{akt}</math> in min</b>	<b><math>t_{min}</math> in min</b>	<b><math>t_{max}</math> in min</b>	<b><math>t_{deakt}</math> in min</b>	<b><math>\beta</math> in %</b>
Strategie		SBZR	SBZR	SBZR	SBZR	SBVR
Ohne Risiko	30,5	2	15	1440	120	89
Mit Risiko	30,5	2	15	1350	130	84
Differenz	0	0	0	90	10	5

### Wirtschaftlichkeitsbewertung

Auf Basis der Bewertung in Abschnitt 7.3 und der erfolgten Risikobetrachtung kann nun die in Abschnitt 6.4 und 6.5 beschriebene Wirtschaftlichkeitsbewertung erfolgen. Hierzu werden erneut die oben im Detail betrachteten EFM 1.1 und das EFMB, bestehend aus der EFM 2.1 und EFM 3.1, beispielhaft herangezogen. Tabelle 7-6 stellt dabei die mithilfe der Formeln (40) und (41) berechneten Erlöse, die nach Formel (42) ermittelten Kosten und die mit Formel (43) bis (45) berechneten Risikokosten der jeweiligen EFM in einem Bezugszeitraum von einem Monat dar.

Zusätzlich zu den bereits aufgeführten Daten der EFM kann dabei von einer einmaligen Ausführung pro Woche ausgegangen werden. Zur Berechnung der Erlöse wurden die stündlichen Preise für eine MWh am Spotmarkt analysiert. Die Kosten entstehen hauptsächlich durch zusätzliche Planungsaufwände bei der Umsetzung der EFM. Die Risikokosten ergeben sich u. a. durch die bereits beschriebenen zusätzlichen Instandhaltungskosten.

*Tabelle 7-6: Erlöse, Kosten, Risikokosten und Gewinn der EFM1.1 und des EFMBs bestehend aus EFM2.1 und EFM3.1*

<b>Nr.</b>	<b>Erlöse</b>	<b>Kosten</b>	<b>Risikokosten</b>	<b>Gewinn</b>
EFM 1.1	6.900 €	800 €	600 €	5.500 €
EFM 2.1/EFM 3.1	10.200 €	1.200 €	800 €	8.200 €

## 7.4 Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung

---

Über die vollständige Betrachtung aller in Tabelle 7-1 beschriebenen EFM und in Tabelle 7-2 identifizierten Maßnahmenbündel kann der aufsummierte Gewinn berechnet werden. Dieser beträgt im vorliegenden Beispiel 54.879 €. Zusätzlich können die notwendigen Investitionskosten zur Teilnahme an den Vermarktungsmöglichkeiten von Energieflexibilität gegenübergestellt werden (siehe hierzu Abschnitt 6.5 und 8.4). Mithilfe der Formel (46) kann abschließend die Amortisationszeit berechnet werden. Somit sind alle relevanten Informationen für das Management über eine Entscheidung bezüglich der Vermarktung der vorhandenen Energieflexibilität aufbereitet. Nachfolgend wird die Umsetzung der Methodik in einem Softwaretool und die wirtschaftliche Bewertung der Methodik selbst vorgestellt.

# 8 Umsetzung und wirtschaftliche Bewertung der Methodik

## 8.1 Übersicht

Das Ziel des vorliegenden Kapitels ist die Vorstellung der Umsetzung der Methodik mithilfe von mehreren entwickelten Softwaretools und die Bewertung der Methode selbst. Abschnitt 8.2 stellt dabei die Tools zur Unterstützung der Strategien vor, die dem Nutzer der Methodik die Durchführung erleichtern. Im Anschluss wird im Abschnitt 8.3 eine anforderungsbezogene Bewertung und abschließend die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (siehe Abschnitt 8.4) vorgenommen.

## 8.2 Softwaretools

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Methodik zur risikoorientierten Bewertung von Energieflexibilität beinhaltet in der Umsetzung die Aufnahme einer Vielzahl von Daten, die in Abhängigkeit der Anzahl der Produktionsstationen im Produktionssystem stark zunimmt. Die zusätzliche Komplexität, die sich für den Anwender durch die Berechnungen anhand der in Kapitel 5 und 6 ergibt, lässt sich in üblichen Tabellenkalkulationsprogrammen nur schwer abbilden. Um dabei der Anforderung an die Methodik (siehe Abschnitt 4.3) der Minimierung des Aufwands gerecht zu werden, ist es erforderlich, unterstützende Softwaretools zur Verfügung zu stellen. Diese stellen Benutzeroberflächen zur Eingabe von Daten zur Verfügung und werten eingegebene Daten im Sinne der Bewertungsmethodik aus. Im Fokus stehen dabei besonders rechenintensive Schritte der Durchführung der Bewertungsstrategien aus Abschnitt 5.5 und 6.3.

### **Tool zur Unterstützung der SBL, SBZ und SBW**

Basierend auf dem in GRABL (2015) entwickelten Softwaretool zur Eingabe und Bewertung von Energieflexibilitätsdaten auf Anlagenebene führt das mithilfe des Softwareprogramms MATLAB der Firma MathWorks entwickelte Softwaretool den Nutzer durch die Benutzeroberfläche und unterstützt ihn bei der Eingabe der relevanten Daten. Im Anschluss werden automatisch die notwendigen Berechnungen durchgeführt (siehe Abbildung 8-1).

## 8.2 Softwaretools

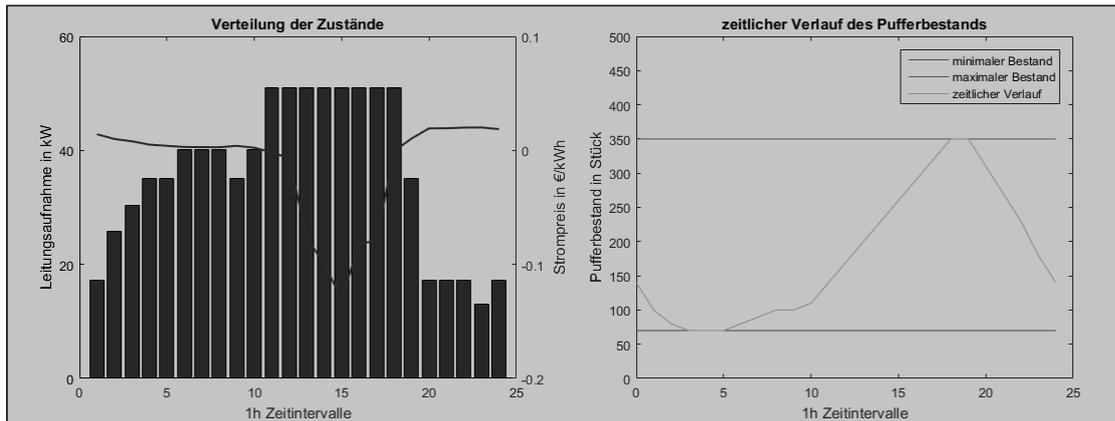


Abbildung 8-1: Beispielhafter Screenshot einer der Ergebnismasken des Softwaretools zur Unterstützung der SBL, SBZ und SBW

### Tool zur Unterstützung der SBPR, SBVR und SBZR

Das mithilfe der von der Firma Microsoft gestalteten Skriptsprache Visual Basic for Applications (VBA) zur Steuerung von Abläufen der Microsoft-Office-Programmfamilie entwickelte Tool zur Unterstützung der Risikobewertung von Energieflexibilität ist mit einer Eingabemaske ausgestattet. Dabei sind z. B. Eingabemöglichkeiten für alle relevanten Daten für mehrere Anlagen und Puffer, sowie zusätzlich benötigten Informationen zu EFM und EFMB implementiert.

Nach Durchführung der Berechnungen werden die Ergebnisse in einer separaten Maske angezeigt und können in Tabellenform ausgegeben werden. Abbildung 8-2 zeigt einen Screenshot der Ergebnisanzeige für ein EFMB des Softwaretools.

Eigenschaften des sequentiellen Maßnahmenbündels					
Ohne Berücksichtigung der Produktionsrisiken	Mit Berücksichtigung der Produktionsrisiken	Prozentuale Änderung durch die Berücksichtigung der Produktionsrisiken:			
Aktivierungsdauer:	14,00	Aktivierungsdauer:	16,92	Aktivierungsdauer:	20,89 %
Deaktivierungsdauer:	12,00	Deaktivierungsdauer:	14,32	Deaktivierungsdauer:	19,75 %
Maximale Verweildauer:	10,00	Maximale Verweildauer:	14,32	Maximale Verweildauer:	5,90 %
Minimale Verweildauer:	13,00	Minimale Verweildauer:	14,32	Minimale Verweildauer:	0,43 %
<b>Risikokennzahl:</b>		<b>11,65 %</b>			

Abbildung 8-2: Screenshot der Ergebnisanzeige für ein EFMB des Softwaretools zur Unterstützung der SBPR, SBVR und SBZR

Im Anschluss an die Vorstellung der Softwaretools wird die Methodik anhand der in Abschnitt 4.3 definierten Anforderungen bewertet.

### 8.3 Erfüllung der Anforderungen

Im Rahmen des vorliegenden Abschnitts soll die Methodik zur risikoorientierten Bewertung von Energieflexibilität hinsichtlich der in Abschnitt 4.3 formulierten Anforderungen bewertet werden. Hierzu wurden vier Anforderungen bezüglich der Methodik selbst und drei Anforderungen hinsichtlich der Anwendbarkeit formuliert.

Die *Minimierung des Aufwands für den Nutzer* stellt einen der zentralen Aspekte der Methodik dar, da der Nutzen sehr stark von marktwirtschaftlichen Entwicklungen abhängt und dadurch nicht direkt beeinflusst werden kann. Die Anforderung wurde bei der Entwicklung der Vorgehensweise durchgehend beachtet und wurde dementsprechend erfüllt. Insbesondere ist dies bei der Auswahl der aufzunehmenden Daten festzustellen, da sich diese ausschließlich auf die für das finale Ergebnis benötigten Daten beschränkt. Des Weiteren ist eine möglichst aufwandsarme Gestaltung der Datenverarbeitung durch die Vorgabe der mathematischen Formeln sichergestellt.

Die Erfüllung der Anforderung nach der Auswahl einer geeigneten Ebene der *Granularität der Bewertung des Potenzials* wurde durch ständigen Abgleich mit den zu erreichenden Zielen sichergestellt. Da diese Anforderungen, wie bereits erwähnt, grundsätzlich im Gegensatz zur vorher genannten Anforderung steht, stellte dies den Kerngedanken des Vorgehens bei der Entwicklung der Methodik dar.

Die Anforderung nach der *Berücksichtigung der aktuellen Anforderungen des Energiemarktes* ist dadurch berücksichtigt worden, dass die Vermarktung von EFM sowohl bei zeitbasierten Tarifen als auch bei anreizbasierten Programmen durch allgemeingültige Formeln bewertet werden kann. Diese sind dabei so allgemein gehalten, dass davon auszugehen ist, dass auch zukünftige Produkte des Energiemarktes durch die Anwendung dieser Formeln mit in der Bewertung berücksichtigt werden können.

Die vierte Anforderung der methodischen Anforderungen fordert die *Betrachtung von Maßnahmen*. Die hier vorliegende Arbeit baut auf dem Bewertungsansatz von GRABL (2015) auf, der Energieflexibilitätsmaßnahmen einzelner Produktionsstationen vorschlägt. Durch das Aufgreifen dieses maßnahmenbasierten Ansatzes und der Weiterentwicklung durch die Bildung von EFMB sowie der Definition dieser wird der Anforderung Rechnung getragen.

Durch die Anforderung einer *quantitativen Bewertung* wurde die Erstellung eines Ansatzes mit messbaren Größen und die Verwendung von weiterverarbeitbaren

## 8.3 Erfüllung der Anforderungen

---

Daten sichergestellt. Die erstellte Methodik lässt in allen Kennzahlen des Ergebnisses und der Teilergebnisse ausschließlich quantifizierbare Größen zu. Vor allem in Kapitel 6 werden eventuelle qualitative aufzunehmende Informationen bzgl. relevanter Risiken grundsätzlich nur in Form der Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. des Schadensausmaßes aufgenommen.

Zur Sicherstellung der Anforderung der *Übertragbarkeit* der Methode auf produzierende Unternehmen verschiedener Branchen wurden alle Schritte des Vorgehens und aufzunehmende Daten auf deren Anwendung bezüglich unterschiedlichster Prozessarten überprüft. Insbesondere der zustandsbasierte Ansatz zur Beschreibung der EFM und deren Eigenschaften ist dabei ein geeignetes Mittel.

Abschließend wurde als dritte Anforderung der Anwendbarkeit eine *Umsetzung in einer Software* gefordert. Abschnitt 8.2 beschreibt dabei zwei Softwaretools, die zur Unterstützung des Anwenders bei der Umsetzung der entwickelten Bewertungsstrategien in produzierenden Unternehmen entwickelt wurden. Nachfolgend wird die Nutzen- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Methodik selbst vorgestellt.

## 8.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Methodik

### 8.4.1 Übersicht

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Methodik muss zunächst der Aufwand und Nutzen der Vorgehensweise detailliert betrachtet werden, um anschließend eine finale Aussage über die Rentabilität treffen zu können. Dabei wird nachfolgend die einmalige Durchführung der Bewertung der Ist-Situation diskutiert. Eine erneute Bewertung ist immer dann von Nöten, sobald sich die Gegebenheiten in der Produktion bzw. die Vermarktungsmöglichkeiten, wie z. B. zur Verfügung stehende Produkte oder Preisschwankungen an der Energiebörse, stark verändern. Da der Fokus der hier vorliegenden Arbeit auf der Analyse der Möglichkeiten eines Produktionssystems liegt, können Veränderungen im Produktionssystem erhebliche Auswirkungen auf das Bewertungsergebnis haben und erfordern ggf. hohe Aufwände zur erneuten Aufnahme der notwendigen Daten. Änderungen auf dem Energiemarkt sind in der Methodik vergleichsweise mit deutlich weniger Aufwand verbunden und können erheblich schneller implementiert werden.

### 8.4.2 Aufwand

Die Bewertung des Aufwands der Methodik muss in die drei Kategorien der benötigten Software, des Aufwands der in Kapitel 5 beschriebenen Bewertung von Energieflexibilität und der in Kapitel 6 vorgestellten Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung unterschieden werden.

Zur *benötigten Software* gehören dabei neben üblichen Tabellenkalkulationsprogrammen, wie z. B. Microsoft Excel, auch der Zugang zu Daten bezüglich der Vermarktungsmöglichkeiten von Energieflexibilität. Dabei ist es erforderlich, den Zugriff auf die Daten für mindestens ein Jahr zu erhalten, um saisonale Effekte bereinigen zu können und dadurch möglichst realistische Ergebnisse zu erhalten. Ein Zugriff auf Daten mit der erforderlichen Granularität ist z. B. bei der Strombörse European Energy Exchange (EEX) in Leipzig mit Kosten in Höhe von ca. 1.800 € anzusetzen. Zusätzlich können die in dieser Arbeit entwickelten Softwaretools bei der Durchführung der Methodik unterstützen. Nachfolgend werden die Aufwendungen der Projektarbeit eines Bewertungsvorhabens beschrieben.

Der Aufwand der in Kapitel 5 beschriebenen Bewertung von Energieflexibilität erfordert die Analyse der Zustände mehrerer Produktionsstationen innerhalb eines Produktionssystems sowie dessen Puffer und Lager. Während die Daten bezüglich des Materialflusses aktuell in vielen produzierenden Unternehmen in ausreichender Granularität vorliegen, ist für die Aufnahme der Energiedaten oftmals eine eigenständige Analyse vorzunehmen. Trotz der häufig bereits umgesetzten Vorgaben der DIN 50001 sind in den meisten Fällen zusätzliche Messungen z. B. mit mobilen Messgeräten notwendig. Zur Identifikation und Beschreibung der EFM sind detaillierte Interviews mit produktionsnahen Mitarbeitern wie einem Werkstattmeister oder Anlagenführer notwendig, um Daten wie die Zeitdauer eines Neustarts einer Maschine aufnehmen zu können. Grundsätzlich ist dabei mit einem steigenden Aufwand mit zunehmender Anzahl von Produktionsstationen im Produktionssystem zu rechnen. Der Aufwand für ein repräsentatives Unternehmen wird mit 20 bis 22 Personentagen geschätzt.

Die Aufwände der in Kapitel 6 vorgestellten Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung sind ebenfalls stark von Personalaufwendungen geprägt. Diese entstehen in den notwendigen beschriebenen Workshops und durch die Teilnahme von Mitarbeitern mit unterschiedlicher Qualifikation. Im Weiteren ist die Vorbereitung und Analyse der aufgenommenen Daten in die Kalkulation aufzunehmen. Es wird davon ausgegangen, dass ein grundsätzliches Risikoinventar, wie es in Abschnitt 6.2.4 vorgestellt ist, bereits existiert und daher bei der Durchführung des

## 8.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Methodik

Projekts und der vorgestellten Strategien auf die bestehenden Informationen zurückgegriffen werden kann. Der verbleibende Aufwand wird auf 15 bis 17 Personentage geschätzt.

### 8.4.3 Nutzen und Wirtschaftlichkeit

Wie in Kapitel 1 detailliert erläutert, liegt der generelle Nutzen der Bewertung von Energieflexibilität in der Generierung von Informationen zur Einsparung von Energiekosten. Hierbei ergeben sich, wie bereits oben genannt, große Abhängigkeiten zu den aktuellen Gegebenheiten des Energiemarkts. In Abschnitt 2.4.2 wurde die Breite der verschiedenen Vermarktungsmöglichkeiten vorgestellt. Ergeben sich hierbei neue Produkte oder eine starke Veränderung der Höhe oder Schwankungsbreite von Strompreisen, so hat dies einen starken Einfluss auf die Erlöspotenziale. Diese sind allerdings unabhängig von der entwickelten Vorgehensweise der Methodik.

Zur beispielhaften Abschätzung der benötigten Werte werden die Erlöse des Anwendungsbeispiels aus Kapitel 7 herangezogen. Dabei wurden bei einer vollständigen Vermarktung aller Energieflexibilitätpotenziale in einem Betrachtungszeitraum von einem Jahr eine Energiekosteneinsparung von 54.879 € ermittelt. Zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit werden diesem Wert in Abbildung 8-3 der ermittelte Aufwand für Softwareinvestitionen und die durchschnittlichen Kosten der Durchführung des Bewertungsprojekts gegenübergestellt.

	Personaltage	Ø-Tagessatz	Betrag
Energiekosteneinsparung			54.879 €
Software			1.800 €
Personalaufwand (Technische Energieflexibilität)	21	850 €	17.850 €
Personalaufwand (Risiko- und Wirtschaftlichkeit)	16	850 €	13.600 €
Summe Kosten			33.250 €
<b>Differenz</b>			<b>20.629 €</b>

Abbildung 8-3: Exemplarische Wirtschaftlichkeitsberechnung der einmaligen Durchführung der Vorgehensweise der Methodik

Das Ergebnis der Berechnung zeigt, dass eine grundsätzliche Wirtschaftlichkeit der Vorgehensweise zur Bewertung von Energieflexibilität gegeben ist. Dabei ist,

wie in Abschnitt 1.2 dargelegt, zu beachten, dass Experten von steigender Volatilität bezüglich der Strompreise ausgehen. Dies führt in naher Zukunft zu der Annahme eines deutlich höheren Energiekosteneinsparungspotenzials für produzierende Unternehmen in Deutschland.

Im Allgemeinen bleibt festzuhalten, dass die Wahrscheinlichkeit einer grundsätzlichen Wirtschaftlichkeit von energieflexiblem Handeln bei produzierenden Unternehmen mit der Höhe des Energiebedarfs steigt. Energieintensive Branchen besitzen in vielen Fällen bereits die nötige Transparenz ihrer Energieverbräuche, welche die Aufwände der in dieser Methodik vorgestellten ersten Schritte erheblich reduziert. Des Weiteren stehen auf dem Energiemarkt mehr Vermarktungsmöglichkeiten für Energieflexibilität zur Verfügung, je höher die Leitungsveränderung von EFM ist. Weiterhin ist zu erwähnen, dass eine erhöhte Komplexität in Produktionssystemen zu einem erhöhten Personalaufwand bei der Aufnahme der benötigten Daten führt.



---

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

### 9.1 Zusammenfassung

Produzierende Unternehmen sahen sich in den letzten Jahren verstärkt mit den ersten Auswirkungen einer Verknappung von nichterneuerbaren Ressourcen konfrontiert. Die darauffolgende Analyse der Ressourceneffizienz ist in vielen Zweigen der Industrie nicht nur den durch die Politik gesetzten Anreizen hierzu geschuldet, sondern vielmehr durch den Wunsch einer langfristigen Sicherung von Standorten in Deutschland getrieben. Insbesondere im Bereich der elektrischen Energie sind die Auswirkungen in Form von steigenden Strompreisen u. a. aufgrund der Umlage der Kosten der Energiewende erkennbar. Experten gehen davon aus, dass sich diese Trends in den nächsten Jahrzehnten intensiv fortsetzen werden, da der Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland und Europa stark vorangetrieben wird und dies als eine der Ursachen für die beschriebenen Trends angeführt wird.

Um für industrielle Standorte in Deutschland eine langfristig wirtschaftlich rentable Produktion sicherzustellen, müssen demnach Möglichkeiten zur Reduzierung von Energiekosten gefunden werden. Neben der klassischen energieeffizienten Produktion und einer Reduzierung des Energieverbrauchs bietet der Energiemarkt verschiedene Anreize für eine zeitliche Verschiebung des Lastgangs einer Fabrik. Das Angebot resultiert dabei aus der wichtigsten Anforderung an ein Stromnetz: Die Stabilität. Um diese sicherzustellen, ist es notwendig, das Verhältnis des aktuellen Stromverbrauchs zur Stromnachfrage innerhalb gewisser Grenzwerte zu halten. Um die Stabilität zu gewährleisten, können das Stromangebot oder die aktuelle Stromnachfrage angepasst werden. Die Anpassung der aktuellen Stromnachfrage kann u. a. durch die Verschiebung von Energieverbräuchen in der Industrie erfolgen. Hierfür werden die betroffenen Fabriken mithilfe unterschiedlicher Produkte des Energiemarktes entlohnt. Dabei wird auch von der Vermarktung der Nachfrageflexibilität bzw. Energieflexibilität gesprochen (siehe Kapitel 1).

Da produzierende Unternehmen in der Regel keine Kenntnis über ihre zur Verfügung stehende Energieflexibilität und deren Erlöspotenziale besitzen, ist es notwendig, diese zu bewerten. Um hierbei eventuell auftretende Risiken in der Produktion frühzeitig zu identifizieren und bei der Bewertung zu berücksichtigen, ist es folglich notwendig, eine *Methodik zur risikoorientierten Bewertung von Energieflexibilität von Produktionssystemen* zu entwickeln.

## 9.1 Zusammenfassung

---

Hierzu wurden in Kapitel 2 die notwendigen Grundlagen der vorliegenden Arbeit vorgestellt, um darauf aufbauend in Kapitel 3 in einer ausführlichen Literaturlanalyse den Stand der Technik darzulegen. Basierend auf den untersuchten Arbeiten wurden in Kapitel 4 der Leitgedanke und die Anforderungen an die Methodik abgeleitet. Zusätzlich wurden darin die einzelnen Elemente der Methodik in einer Übersicht dargestellt, welche die Forschungsfragen der Arbeit aufgriffen.

Kapitel 5 stellte den ersten Baustein der Methode dar und beschreibt die *technische und organisatorische Bewertung* von Energieflexibilität. Sie gliedert sich in die vier Bereiche Identifikation von Energieflexibilität, Bestimmung der Bewertungsparameter, Kategorisierung von EFM und Bewertung von Energieflexibilität auf. Insbesondere wird dabei dem Anwender der Methodik ein Wirkgefüge zur Verfügung gestellt, mit dem dieser die Auswirkungen von Änderungen bei PPS-Stellgrößen auf die Zielgrößen von Energieflexibilität ablesen kann. Zusätzlich werden drei Bewertungsstrategien hergeleitet. Die Strategien leiten den Nutzer zu einem strukturierten, hinsichtlich aller relevanten Informationen vollständigen und möglichst aufwandsarmen Vorgehen an.

Kapitel 6 widmete sich der *Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung* von Energieflexibilität und teilt sich in die vier Schritte Beschreibung der Risikosituation, Risikoorientierte Bewertung von Energieflexibilität, Wirtschaftlichkeitsberechnung einzelner EFM und Vermarktungsentscheidung auf. Dabei wird Energieflexibilität in eine erweiterte Ursache-Wirkungskette integriert, um darauf aufbauend drei Bewertungsstrategien für den Anwender der Methodik bereitzustellen. Des Weiteren werden die bereits untersuchten EFM und EFMB hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit untersucht, um abschließend alle relevanten Informationen für die Vermarktungsentscheidung der Nachfrageflexibilität eines Unternehmens zur Verfügung zu stellen.

Anschließend wurde die entwickelte Methodik in Kapitel 7 im Rahmen der Projektarbeit eines Forschungsprojektes bei einem Industriepartner angewandt. Dabei wurden die in Kapitel 8 beschriebenen Softwaretools zur Unterstützung der Vorgehensweise eingesetzt. Die Ergebnisse der Bewertung des Unternehmens fließen anschließend in die Wirtschaftlichkeitsbewertung der Methodik selbst ein. Nachfolgend wird ein Ausblick auf mögliche zukünftige, auf diese Arbeit aufbauende Forschungsinhalte gegeben.

---

## 9.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methodik zur risikoorientierten Bewertung von Energieflexibilität beschrieben. Dies beinhaltet ein Vorgehen zur statischen Ist-Situationsaufnahme von Energieflexibilität in produzierenden Unternehmen und dient der strategischen Entscheidungsfindung.

Die zunehmende Digitalisierung in der Produktion eröffnet Unternehmen völlig neue Möglichkeiten der Datenaufnahme und -verarbeitung. Vor diesem Hintergrund müssen sich weitere Forschungsarbeiten in diesem Themengebiet mit der echtzeitfähigen Bewertung von Handlungsoptionen der PPS beschäftigen. Aufbauend auf den Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit sind dabei dynamische Bewertungsvorgehen zu entwickeln, die es ermöglichen, die Risiken und Auswirkungen auf logistische Zielgrößen auch in der operativen Entscheidungsfindung berücksichtigen zu können.

Zukünftige Forschungsarbeiten werden sich neben der Bewertung von Energieflexibilität zusätzlich mit dem Austausch von Informationen zwischen Unternehmen und dem Energiemarkt in möglichst kurzer Zeit beschäftigen, um zum einen die Reaktionszeiten, die teilweise in Sekundentakt benötigt werden, abbilden zu können und zum anderen, um eine Plattform entwickeln zu können, die die Kommunikation der Akteure flächendeckend bewerkstelligen kann (SCHOTT ET AL. 2018). Dabei ist ein Datenmodell zu entwickeln, das den standardisierten Austausch an der Schnittstelle zwischen Unternehmen und Markt ermöglicht. Dieses Modell kann auf den Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit aufbauen, muss jedoch voraussichtlich erweitert werden, um den o. g. Anforderungen in ausreichendem Maß gerecht zu werden.

Die Risikobetrachtung der Methodik ist vor dem Hintergrund einer produktionstechnischen Arbeit auf die Betrachtung von Produktionsrisiken beschränkt. Des Weiteren ist eine Analyse der Risiken des Energiemarktes denkbar. Dabei sind die Marktentwicklungen sowohl bestehender Produkte als auch evtl. neu angebotener Produkte zu berücksichtigen. Eine Analyse der ersten Gruppe könnte hier z. B. die Entwicklung von Energiepreisen prognostizieren bzw. einer evtl. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einen Risikofaktor hinzufügen. Ziel wäre dabei ähnlich zu der vorliegenden Arbeit eine Erhöhung der Bewertungsgranularität und damit des Informationsgehalts des Ergebnisses.

## 9.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

---

Zusammenfassend ist demnach festzustellen, dass das noch sehr junge Forschungsobjekt der energieflexiblen Fabrik bereits vielsprechende Ansätze zur Bewertung und Umsetzung von Energieflexibilität hervorgebracht hat. Zur effizienten Umsetzung und im Speziellen zum flächendeckenden Einsatz der Methoden in möglichst vielen Branchen und unterschiedlichen Unternehmensgrößen sind weitere Forschungsarbeiten im Themengebiet unumgänglich, denn

*Stillstand ist Rückschritt.*

*Rudolf von Bennigsen-Foerder*

## 10 Anhang

### 10.1 Prüfkriterien für Kombinations-EFM

Tabelle 10-1: Prüfkriterien für Kombinations-EFM (SBZ, Aktivierungsdauer)

Nr.	Kriterium	Formel
1	$\Delta P$	$\Delta P^K = (1 \pm \varphi)(\Delta P^{EFM})$
2	$t_{\min}$	$t_{akt}^K \leq (1 + \tau)t_{akt}^{ext}$
3	$t_{\max}$	$t_{deakt}^K \leq (1 + \tau)(t_{akt}^{EFM} - t_{akt}^K)$
4	$t_{akt}$	$t_{\min}^K \leq (1 + \tau)(t_{akt}^{EFM} - t_{akt}^K - t_{deakt}^K)$
5	$t_{deakt}$	$t_{\max}^K \geq (1 - \tau)(t_{akt}^{EFM} - t_{akt}^K - t_{deakt}^K)$

Tabelle 10-2: Prüfkriterien für Kombinations-EFM (SBZ, Deaktivierungsdauer)

Nr.	Kriterium	Formel
1	$\Delta P$	$\Delta P^K = (1 \pm \varphi)(-\Delta P^{EFM})$
2	$t_{\min}$	$t_{akt}^K \leq (1 + \tau)t_{deakt}^{ext}$
3	$t_{\max}$	$t_{deakt}^K \leq (1 + \tau)(t_{deakt}^{EFM} - t_{akt}^K)$
4	$t_{akt}$	$t_{\min}^K \leq (1 + \tau)(t_{deakt}^{EFM} - t_{akt}^K - t_{deakt}^K)$
5	$t_{deakt}$	$t_{\max}^K \geq (1 - \tau)(t_{deakt}^{EFM} - t_{akt}^K - t_{deakt}^K)$

## 10.2 Bewertung von EFMB

Tabelle 10-3: Prüfkriterien für Kombinations-EFM (SBZ, minimale Verweildauer)

Nr.	Kriterium	Formel
1	$\Delta P$	$\Delta P^K = (1 \pm \varphi)(-\Delta P^{EFM})$
2	$t_{\min}$	$t_{akt}^K \leq (1 + \tau)t_{deakt}^{ext}$
3	$t_{\max}$	$t_{\min}^K \leq (1 + \tau)(t_{\min}^{EFM} - t_{\min}^{ext} - t_{akt}^K)$
4	$t_{akt}$	$t_{\max}^K \geq (1 - \tau)(t_{\min}^{EFM} - t_{\min}^{ext} - t_{akt}^K)$
5	$t_{deakt}$	$t_{deakt}^K \leq (1 + \tau)t_{deakt}^{ext}$

Tabelle 10-4: Prüfkriterien für Kombinations-EFM (SBZ, maximale Verweildauer)

Nr.	Kriterium	Formel
1	$\Delta P$	$\Delta P^K = (1 \pm \varphi)\Delta P^{EFM}$
2	$t_{\min}$	$t_{akt}^K \leq (1 + \tau)t_{deakt}^{EFM}$
3	$t_{\max}$	$t_{\min}^K \leq (1 + \tau)(t_{\max}^{ext} - t_{\max}^{EFM} - t_{akt}^K)$
4	$t_{akt}$	$t_{\max}^K \geq (1 - \tau)(t_{\max}^{ext} - t_{\max}^{EFM} - t_{akt}^K)$
5	$t_{deakt}$	$t_{deakt}^K \leq (1 + \tau)t_{deakt}^{ext}$

## 10.2 Bewertung von EFMB

Tabelle 10-5: Bewertung von Maßnahmenbündel nach Durchführung der Strategien

$t_{akt}$	$t_{deakt}$	$t_{\max}$	$t_{\min}$
$t_{\min}^{EFMB} = \max(EFM, K)_{t_{\min}}$	$t_{\min}^{EFMB} = t_{\min}^{EFM}$	$t_{\min}^{EFMB} = \max(EFM, K)_{t_{\min}}$	$t_{\min}^{EFMB} = t_{\min}^{ext}$
$t_{\max}^{EFMB} = \min(EFM, K)_{t_{\max}}$	$t_{\max}^{EFMB} = t_{\max}^{EFM}$	$t_{\max}^{EFMB} = t_{\max}^{EFM} + t_{deakt}^{EFM} + t_{\max}^K$	$t_{\max}^{EFMB} = t_{\max}^{EFM}$
$t_{akt}^{EFMB} = t_{akt}^K$	$t_{akt}^{EFMB} = t_{akt}^{EFM}$	$t_{akt}^{EFMB} = t_{akt}^{EFM}$	$t_{akt}^{EFMB} = t_{akt}^{EFM}$
$t_{deakt}^{EFMB} = t_{deakt}^{EFM}$	$t_{deakt}^{EFMB} = t_{akt}^K$	$t_{deakt}^{EFMB} = t_{deakt}^K$	$t_{deakt}^{EFMB} = t_{deakt}^{EFM}$

### 10.3 Anlagensteckbrief

<p><b>TMF Anlage</b></p>		<p><b>Jahr der Inbetriebnahme:</b></p> <p><b>Hersteller:</b></p> <p><b>Technologie:</b></p>	<p><b>Datum:</b></p> <p><b>Ort:</b></p> <p><b>Ersteller:</b></p>																														
<p><b>Anlage:</b></p> <p><b>Hauptfunktion:</b></p> <p><b>Anschlussleistung [kW]:</b></p> <p><b>Betriebsstunden [h]:</b></p> <p><b>Jahresleistung [kW/h]:</b></p>																																	
<p><b>Zustände</b></p> <p>Betriebsstunden [h]</p> <p>Leistungsniveau [MW]</p> <p><b>Weitere Größen</b></p> <p>Betriebszeit (min/max) [min]</p> <p>Umschaltzeit nächster Zustand [min]</p> <p>Umschaltzeit vorheriger Zustand [min]</p>		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Stillstand</th> <th>Teilabschaltung</th> <th>Normalbetr. 320 t/d</th> <th>Normalbetr. 370 t/d</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>420</td> <td>320</td> <td>480</td> <td>6840</td> </tr> <tr> <td>1,5</td> <td>27</td> <td>29,5</td> <td>32</td> </tr> </tbody> </table>	Stillstand	Teilabschaltung	Normalbetr. 320 t/d	Normalbetr. 370 t/d	420	320	480	6840	1,5	27	29,5	32																			
Stillstand	Teilabschaltung	Normalbetr. 320 t/d	Normalbetr. 370 t/d																														
420	320	480	6840																														
1,5	27	29,5	32																														
<p><b>Roh- und Hilfsstoffe [kg/h, m³/h, l/h]</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Art</th> <th>Durchsatz</th> <th>Einheit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Hackschnitzel</td> <td>-</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Druckluft</td> <td>701.350</td> <td>Nm³/a</td> </tr> <tr> <td>Dampf</td> <td>-</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Chemikalien</td> <td>-</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Art	Durchsatz	Einheit	Hackschnitzel	-		Druckluft	701.350	Nm³/a	Dampf	-		Chemikalien	-		<p><b>Output</b></p> <p><b>Hauptprodukte</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Durchsatz</th> <th>Einheit</th> <th>Lagerfähigkeit / Puffergröße (min/max) [h]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>320-370</td> <td>t/d</td> <td>VB 4 (250t otro)</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Bleichturm (50 t otro)</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>Neben-/ Abfallprodukte</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Durchsatz</th> <th>Einheit</th> <th>Lagerfähigkeit / Puffergröße (min/max) [h]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>20 t/h</td> <td>t/h</td> <td>keine</td> </tr> </tbody> </table>		Durchsatz	Einheit	Lagerfähigkeit / Puffergröße (min/max) [h]	320-370	t/d	VB 4 (250t otro)			Bleichturm (50 t otro)	Durchsatz	Einheit	Lagerfähigkeit / Puffergröße (min/max) [h]	20 t/h	t/h	keine
Art	Durchsatz	Einheit																															
Hackschnitzel	-																																
Druckluft	701.350	Nm³/a																															
Dampf	-																																
Chemikalien	-																																
Durchsatz	Einheit	Lagerfähigkeit / Puffergröße (min/max) [h]																															
320-370	t/d	VB 4 (250t otro)																															
		Bleichturm (50 t otro)																															
Durchsatz	Einheit	Lagerfähigkeit / Puffergröße (min/max) [h]																															
20 t/h	t/h	keine																															

Abbildung 10-1: Anlagensteckbrief der TMF-Anlage

### 10.4 Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden in den Jahren von 2015 bis 2017 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.

- Manuel Fetscher: Methode zur Bewertung der Energieflexibilität von Produktionssystemen; Semesterarbeit (Abgegeben an der Technischen Universität München am 30.10.2015)
- Florian Kramer: Validierung einer Methode zur Bewertung der Energieflexibilität; Semesterarbeit (Abgegeben an der Technischen Universität München am 31.08.2015)
- Patrick Buck; Christoph Liehr; Daniel Barragán: Der Markt der Zukunft für Energieflexible Fabriken; Projektarbeit (Abgegeben an der Technischen Universität München am 18.01.2016)
- Yannik Zeiträg: Methode zur Bewertung der Risikosituation energieflexibler Fabriken; Semesterarbeit (Abgegeben an der Technischen Universität München am 31.10.2016)
- Paco-Rodolphe Schmittbiel: Bewertung des wirtschaftlichen Potenzials der Energieflexibilität in der Produktion; Masterarbeit (Abgegeben an der Technischen Universität München am 30.09.2016)
- Maximilian Ammon: Vorgehen zur Bewertung von Handlungsoptionen im Umfeld von Industrie 4.0; Masterarbeit (Abgegeben an der Technischen Universität München am 30.09.2016)
- Yannick Apfel: Entwicklung einer Vorgehensweise zur ersten Identifikation von Energieflexibilität in Produktionssystemen; Bachelorarbeit (Abgegeben an der Technischen Universität München am 30.11.2016)
- Floris Roltsch: Technische Bewertung der Energieflexibilität von Produktionssystemen; Semesterarbeit (Abgegeben an der Technischen Universität München am 30.11.2016)
- Peter Schlüter: Analyse von Auswirkungen energieflexibler Maßnahmen und deren Nachbereitungsstrategien; Semesterarbeit (Abgegeben an der Technischen Universität München am 28.02.2017)

- Yannik Zeiträg: Bewertung der Vermarktungsmöglichkeiten von Energieflexibilität von Produktionssystemen; Masterarbeit (Abgegeben an der Technischen Universität München am 15.07.2017)
- Florian Kunzmann: Analyse des Energieflexibilitätpotentials in der Produktion (Abgegeben an der Hochschule für angewandte Wissenschaften München am 30.09.2017)
- David Diehl: Einflussfaktoren und deren Wirkung auf die energieflexible Fabrik; Masterarbeit (Abgegeben an der Technischen Universität München am 30.11.2017)



## 11 Literaturverzeichnis

ABELE ET AL. 2006

Abele, E.; Liebeck, T.; Wörn, A.: Measuring Flexibility in Investment Decisions for Manufacturing Systems. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 55 (1), S. 433–436. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60452-1.

ABELE UND REINHART 2011

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

AGEB 2017

Arbeitsgruppe Energiebilanzen e.V.: Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2017. Berlin.

AICHELE ET AL. 2014

Aichele, C.; Doleski, O.: Smart Market. Vom smart grid zum intelligenten Energiemarkt. Wiesbaden: Springer 2014.

ALBADI UND EL-SAADANY 2008

Albadi, M. H.; El-Saadany, E. F.: A summary of demand response in electricity markets. In: Electric Power Systems Research 78 (11), S. 1989–1996. DOI: 10.1016/j.epsr.2008.04.002.

APPELRATH ET AL. 2012

Appelrath, H.; Kagermann, H.; Mayer, C.: Future Energy Grid. Migrationspfade ins Internet der Energie. Berlin, Heidelberg: Springer (Acatech STUDIE), Februar 2012.

ARNOLD 2013

Arnold, D.: Materialflußlehre. 2., verbesserte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2013.

ASHOK 2006

Ashok, S.: Peak-load management in steel plants. In: Applied Energy 83 (5), S. 413–424. (2006) DOI: 10.1016/j.apenergy.2005.05.002.

ASHOK UND BANERJEE 2000

Ashok, S.; Banerjee, R.: Load-management applications for the industrial sector. In: Applied Energy 66 (2), S. 105–111. (2000) DOI: 10.1016/S0306-2619(99)00125-7.

ASHOK UND BANERJEE 2001

Ashok, S.; Banerjee, R.: An optimization mode for industrial load management. In: IEEE Trans. Power Syst. 16 (4), S. 879–884. (2001) DOI: 10.1109/59.962440.

ASHOK UND BANERJEE 2003

Ashok, S.; Banerjee, R.: Optimal cool storage capacity for load management. In: Energy 28 (2), S. 115–126. (2003) DOI: 10.1016/S0360-5442(02)00109-3.

AULL 2013

Aull, F.: Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden. München, Techn. Univ., Diss., 2013. München: Utz (Forschungsberichte IWB, 275).

AURICH ET AL. 2003

Aurich, J. C.; Barbian, P.; Wagenknecht, C.: Prozessmodule zur Gestaltung flexibilitätsgerechter Produktionssysteme. In: ZWF 98 (5), S. 214–218. (2003) DOI: 10.3139/104.100635.

BABU UND ASHOK 2008

Babu, C. A.; Ashok, S.: Peak Load Management in Electrolytic Process Industries. In: IEEE Trans. Power Syst. 23 (2), S. 399–405. (2008) DOI: 10.1109/TPWRS.2008.920732.

BATRA ET AL. 2014

Batra, N.; Kelly, J.; Parson, O.; Dutta, H.; Knottenbelt, W.; In: Jon Crowcroft (Hrsg.): Proceedings of the 5th ACM International Conference on Future Energy Systems, June 11 - 13, 2014, Cambridge, England. the 5th international conference. Cambridge, United Kingdom. Association for Computing Machinery; S. 265–276 (2014).

BAUER ET AL 2017

Bauer, D.; Abele, E.; Ahrens, R.; Bauernhansl, T.; Fridgen, G.; Jarke, M.: Flexible IT-platform to Synchronize Energy Demands with Volatile Markets. In: Procedia CIRP 63, S. 318–323, 2017 DOI:10.1016/j.procir.-2017.03.088.

BDEW 2016

BDEW: Bundesverband für Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: BDEW-Strompreisanalyse November 2016: Haushalte und Industrie. Hg. v. BDEW. Berlin.

BEIER ET AL. 2015

Beier, J.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Increasing Energy Flexibility of Manufacturing Systems through Flexible Compressed Air Generation. In: *Procedia CIRP* 37, S. 18–23. (2015) DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.063.

BEIER ET AL. 2016

Beier, J.; Neef, B.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Integrating on-site Renewable Electricity Generation into a Manufacturing System with Intermittent Battery Storage from Electric Vehicles. In: *Procedia CIRP* 48, S. 483–488 (2016) DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.057.

BEIER 2017

Beier, J.: Simulation approach towards energy flexible manufacturing systems. Cham, Switzerland: Springer (Sustainable production, life cycle engineering and management) 2017.

BEIER ET AL. 2017

Beier, J.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Energy flexibility of manufacturing systems for variable renewable energy supply integration. Real-time control method and simulation. In: *Journal of Cleaner Production* 141, S. 648–661. (2017) DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.09.040.

BENESTAD UND SCHMIDT 2009

Benestad, R. E.; Schmidt, G. A.: Solar trends and global warming. In: *J. Geophys. Res.* 114 (D14), L06704. (2009) DOI: 10.1029/2008JD011639.

BERNDT UND CANSIER 2007

Berndt, R.; Cansier, A.: *Produktion und Absatz. 2, aktualisierte und erw. Aufl.* Berlin: Springer 2007.

BETH ET AL. 2009

Beth, M.; Konrad, T.; Forkert, T.; Frankenthal, P.; Munzinger, C.; Schopp, M.: Analyse und Bewertung der Kosten von Produktionsausfällen. Am Beispiel einer Fallstudie. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)* (104 Nr. 5), S. 371-378.

BLOHM ET AL. 2008

Blohm, H.; Beer, T.; Seidenberg, U.; Silber, H.: *Produktionswirtschaft. Kontrollfragen ; Aufgaben mit Lösungshinweisen. 4., vollst. überarb. Aufl.* Herne: Verl. Neue Wirtschafts-Briefe 2008.

### BMUB 2017

BMUB: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. COP-TOP 15.11. 2017-Klima-Langfriststrategien. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.cop23.de/fileadmin/Daten/PDF/cop23\\_bmub\\_cop\\_top\\_8\\_de\\_bf.pdf](https://www.cop23.de/fileadmin/Daten/PDF/cop23_bmub_cop_top_8_de_bf.pdf), zuletzt geprüft am 05.12.2017.

### BMWi 2010

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

### BMWi 2014

BMWi: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose 2014 Berlin.

### BMWi 2017

BMWi: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Ergebnispapier - Strom 2030. Ergebnispapier Langfristige Trends – Aufgaben für die kommenden Jahre. 2017 Berlin.

### BNETZA 2017

BNETZA: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Hrsg.): Quartalsbericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen 2017. Berlin.

### BNETZA UND BKARTA 2016

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Hrsg.); Bundeskartellamt (Hrsg.): Monitoringbericht 2016. Berlin.

### BNETZA UND BKARTA 2017

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Hrsg.); Bundeskartellamt (Hrsg.): Monitoringbericht 2017. Berlin.

### BÖCK 2013

Böck, J.: Methode zur Integration nicht-konventioneller Verfahren in flexible Fertigungs- und Montagelinien. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2013. Stuttgart: Fraunhofer Verlag (Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 19).

BÖCKMANN UND GROBE 2014

Böckmann, M.; Große, N.: Senkung der Produktionskosten durch Gestaltung eines Energieregulierungskreis-Konzeptes. 1. Aufl. s.l.: Apprimus Wissenschaftsverlag. (2014) Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1773807>, zuletzt geprüft am 06.11.2017.

BÖNING 2013

Böning, C.; Stromintensive Fertigung - Energiekostenorientierte Belegungsplanung. In: *IT&Production* 14 (12), S. 88–89, 2013.

BÖNING ET AL. 2013

Böning, C.; Nyhuis, P.; Ullmann, G.: Sparen trotz konstanten Energieverbrauch. In: *Computer & Automation* (4), S. 28–31, 2013.

BÖNING ET AL. 2017

Böning, C.; Prinzhorn, H.; Hund, E.; Stonis, M.: A Memetic Algorithm for an Energy-Costs-Aware Flexible Job-Shop Scheduling Problem. In: *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Idenex 125, International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering* 11 (5), S. 1215–1228, 2017.

BONNESCHKY 2002

Bonneschky, A.: Energiekennzahlen in PPS-Systemen. Als Ms. gedr. Berlin: Dissertation.de, 2002.

BRANDL 2007

Brandl, F.: Mix-Guide. Augsburg: Weltbild 2007. ISBN 13: 97838-28912885.

BRAUN 1984

Braun, H.: Risikomanagement. Eine spezifische Controllingaufgabe. Univ., Diss. Stuttgart, 1984. Darmstadt: Toeche-Mittler (Controlling-Praxis CP, 7).

BREITHAUPT 2001

Breithaupt, J. W.: Rückstandsorientierte Produktionsregelung von Fertigungsbereichen. Grundlagen und Anwendung. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2001. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl.

BURGER ET AL. 2012

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

BUSCH 2005

Busch, T.: Holistisches und probabilistisches Risikomanagement-Prozessmodell für projektorientierte Unternehmen der Bauwirtschaft. Zürich: Eigenverlag des IBB an der ETH Zürich, 2005.

CISEK ET AL. 2002

Cisek, R.; Habicht, C.; Neise, P.: Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme. In: *ZWF* 97 (9), S. 441–445, 2002. DOI: 10.3139-104.100566.

CONRAD 2016

Conrad, R.: 7 Arten der Verschwendung (7V). In: 5S als Basis des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (ifaa-Edition), S. 7–14, 2016.

DÄUBLER 2005

Däubler, L.: Strukturverträgliche Ontologien der Automatisierungstechnik. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig: Deutscher Universitätsverlag, 2005.

DENA 2010

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

DENA 2016

Deutsche Energie-Agentur GmbH.: Roadmap Demand Side Management. Industrielles Lastmanagement für ein zukunftsfähiges Energiesystem. Schlussfolgerungen aus dem Pilotprojekt DSM Bayern. Hg. v. dena. Deutsche Energie-Agentur GmbH. Berlin, 2016.

DEPARTMENT OF ENERGY 2006

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

### DIEDERICHS 2013

Diederichs, M.: Risikomanagement und Risikocontrolling. 3., vollständig überarbeitete Auflage. München: Vahlen. 2013 Online verfügbar unter <http://lib.mylibrary.com/detail.asp?id=625322>, zuletzt geprüft am 09.10.2017.

### DIETMAIR UND VERL 2008

Dietmair, A.; Verl, A.: Energy consumption modeling and optimization for production machines. In: Sustainable Energy Technologies, 2008, ICSET 2008, IEEE International Conference on. Date, 24-27 Nov. 2008.

### DIN 25424

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN EN 25424: Teil 1: Fehlerbaumanalyse: Methode und Bildzeichen. Berlin, 1981.

### DIN 31000

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN EN 31000: Risikomanagement – Grundsätze und Leitlinien. Berlin, 2008.

### DIN 50001

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN EN 50001: Energiemanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung. Berlin, 2010.

### DIN 55350

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN EN 55350: Begriffe zum Qualitätsmanagement - Teil 11 Berlin, 2008.

### DUFTER ET AL. 2017

Dufter, C.; Guminski, A.; Orthofer, C.; Roon, S.: Lastflexibilisierung in der Industrie. Metastudienanalyse zur Identifikation relevanter Aspekte bei der Potenzialermittlung. In: *10. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien 2017*.

### DYCKHOFF 2010

Dyckhoff, H.; Spengler, T.: Produktionswirtschaft. Eine Einführung. 3., überarb. und erw. Aufl. Berlin: Springer 2010. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-13684-9>, zuletzt geprüft am 12.12.2017.

### EBERLIN UND HOCK 2014

Eberlin, S.; Hock, B.: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme. Eine Einführung in die Praxis, 2014, Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-03573-0>, zuletzt geprüft am 12.06.2017.

EEX 2017

European Energy Exchange: Strommarktdaten - Spotmarkt. Online verfügbar unter <https://www.eex.com/de/marktdaten/strom/spotmarkt/auktion#!/2017/12/05>, zuletzt geprüft am 05.12.2017.

EHRMANN 2005

Ehrmann, H.: Logistik. 5., überarb. und aktualisierte Aufl. Ludwigshafen (Rhein): Kiehl, 2005.

EMEC ET AL. 2013

Emec, S.; Kuschke, M.; Huber, F.; Seliger, G.: Stochastic Optimization Method to Schedule Production Steps According to Volatile Energy Price. In: *Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, S. 356-362, 2013.

EMEC ET AL. 2016

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

EVERSHEIM UND SCHUH 1996

Eversheim, W.; Schuh, G. (Hg.): Hütte. Produktion und Management; Betriebs-hütte. Akademischer Verein Hütte. 7., völlig neu bearb. Aufl. Berlin: Springer, 1996.

FANDEL 2010

Fandel, G.: Produktions- und Kostentheorie. 8., vollst. überarb. und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2010.

FARUQUI ET AL. 2009

Faruqui, A.; Hledik, R.; Tsoukalis, J.: The Power of Dynamic Pricing. In: *The Electricity Journal* 22 (3), S. 42–56, 2009, DOI: 10.1016/j.tej.2009.02.011.

FERC 2009

FERC: Federal Energy Regulatory Commission: A National Assessment of Demand Response Potential. Washington DC, 2009.

FERNANDEZ ET AL. 2013

Fernandez, M.; Li, L.; Sun, Z.: Just-for-Peak” buffer inventory for peak electricity demand reduction of manufacturing systems. In: *International Journal of Production Economics* 146 (1), S. 178–184, 2013, DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.06.020.

FFE 2010

FfE: Forschungsstelle für Energiewirtschaft: Demand Response in der Industrie. Status und Potenziale in Deutschland. Unter Mitarbeit von Serafin von Roon und Thomas Gobmaier. München, 2010.

FORRESTER 1961

Forrester, J. W.: Industrial dynamics. Students ed., 8. print. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1961.

FRAUNHOFER ISE 2013

Fraunhofer ISI: Erstellung von Anwendungsbilanzen für das Jahr 2012 für das verarbeitende Gewerbe mit Aktualisierungen für die Jahre 2009-2011. Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). Unter Mitarbeit von Clemens Rohde. Karlsruhe, 2013.

FRAUNHOFER ISE 2017

Fraunhofer ISE. Energy Charts. Freiburg 2017. Online verfügbar unter <https://www.energy-charts.de/>, zuletzt geprüft am 05.12.2017.

FREITAG 2005

Freitag, M.: Modellierung und Analyse von Produktionssystemen mit Methoden der Nichtlinearen Dynamik. Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2005. Berlin: GITO-Verl, 2005.

FRIDGEN ET AL. 2017

Fridgen, G.; Keller, R.; Thimmel, M.; Wederhake, L.: Shifting Load through Space : the Economics of Spatial Demand Side Management Using Distributed Data Centers. In: *Energy Policy*, 2017.

GEBBE ET AL. 2017

Gebbe, C.; Glasschröder, J.; Reinhart, G.: Cost-Efficient Energy Monitoring of Manufacturing Machines Based on Nonintrusive Load Monitoring. In: *AMM* 871, S. 125–134, 2017. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.871.125.

GLEIßNER 2011

Gleißner, W.: Grundlagen des Risikomanagements im Unternehmen. Controlling, Unternehmensstrategie und wertorientiertes Management. 2. Aufl. München, 2011.

GLEIßNER UND AHRENS-FREUDENBERG 2015

Gleißner, W.; Ahrens-Freudenberg, H.: Praxishandbuch Risikomanagement. Konzepte, Methoden, Umsetzung. Berlin: Erich Schmidt, 2015.

GOLDHAHN ET AL. 2012

Goldhahn, L.; Bock, D.; Eckardt, R.; Weber, M.: Energetische Planungsalgorithmen für ERP-Systeme (EnPlan). In: *ZWF* 107 (9), S. 603–607, 2012. DOI: 10.3139/104.110814.

GOTTSCHALK 2007

Gottschalk, L.: Flexibilitätsprofile. Kapazitätsanpassung in der Produktion. 1. Aufl. Hg. v. Paul Schönsleben, Zürich, 2007.

GRABL 2015

Graßl, M.: Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion. München: Utz, Herbert (Forschungsberichte IWB, 300), 2015.

GRABL UND REINHART 2014

Graßl, M.; Reinhart, G.: Evaluating Measures for Adapting the Energy Demand of a Production System to Volatile Energy Prices. In: *Procedia CIRP* 15, S. 129–134, 2014, DOI: 10.1016/j.procir.2014.06.081.

GRABL ET AL. 2014

Graßl, M.; Vikdahl, E.; Reinhart, G.: A Petri-net Based Approach for Evaluating Energy Flexibility of Production Machines. In: Michael Zäh (Hg.): Enabling manufacturing competitiveness and economic sustainability. Proceedings of the 5th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and. 1st edition. New York: Springer, S. 303–308, 2014.

GREINER 1989

Greiner, T.: Unternehmensberatung und Managementstrategien am Beispiel der Einführung von Produktionsplanungs- und -steuerungssystemen. Wiesbaden, Verlag für Sozialwissenschaften. S. 121–128, 1989.

GUDEHUS 2000

Gudehus, T.: Logistik I. Grundlagen, Verfahren und Strategien. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch). (2000) Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-56975-3>, zuletzt geprüft am 05.09.2017.

GÜNTHER UND TEMPELMEIER 2009

Günther, H.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. 8., überarb. und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2009.

GUPTA UND GOYAL 1989

Gupta, Y.; Goyal, S.: Flexibility of manufacturing systems. Concepts and measurements. In: *European Journal of Operational Research* 43 (2), S. 119–135, 1989, DOI: 10.1016/0377-2217(89)90206-3.

GUPTA UND SOMERS 1996

Gupta, Y.; Somers, T.: Business Strategy, Manufacturing Flexibility, and organizational performance relationships. A path analysis approach. In: *Production and Operations Management* 5 (3), S. 204–233, 1996, DOI: 10.1111/j.1937-5956.1996.tb00395.x.

HAAG 2013

Haag, H.: Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2013.

HACKSTEIN 1989

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

HÄRTERICH 1987

Härterich, Susanne: Risk management von industriellen Produktions- und Produktrisiken. Karlsruhe: VVW Verl. Versicherungswirtschaft Mannheim, 1987.

HART 1992

Hart, G. W.: Nonintrusive appliance load monitoring. In: *Proc. IEEE* 80 (12), S. 1870–1891, 1992, DOI: 10.1109/5.192069.

HAUPTMANN 2013

Hauptmanns, U.: Prozess- und Anlagensicherheit. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-37253-7>. zuletzt geprüft am 24.11.2017.

HEIN 2007

Hein, D.: Strategisches Risikomanagement im Maschinen- und Anlagenbau. Aachen: Shaker (Berichte aus der Produktionstechnik, Bd. 2007, 29).

HELBING 2010

Helbing, K. W.: Handbuch Fabrikprojektierung. Berlin. Springer, 2010.

HERRMANN 2013

Herrmann, C.: Energie- und hilfsstoffoptimierte Produktion. Berlin: Springer, 2013.

HÖLSCHER 2002

Hölscher, R.: Herausforderung Risikomanagement. Identifikation, Bewertung und Steuerung industrieller Risiken. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2002.

HOPP UND SPEARMAN 2001

Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: Factory physics. Foundations of manufacturing management. 2. ed. Boston. 2001 Online verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/description/mh023/99086385.html>, zuletzt geprüft am 05.06.2017.

HUTH UND ROMEIKE 2016

Huth, M.; Romeike, F.: Risikomanagement in der Logistik. Konzepte - Instrumente - Anwendungsbeispiele. 1. Aufl. 2016. Wiesbaden: Gabler, 2016.

ICHOUA UND PECHMANN 2013

Ichoua, S.; Pechmann, A.: Production Scheduling for Sustainable Manufacturing Systems. In: *KEM* 572, S. 235–238, 2013, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.572.235.

ILLETSCHKO ET AL. 2014

Illetschko, S.; Käfer, R.; Spatzierer, K.: Risikomanagement. Praxisleitfaden zur integrativen Umsetzung. München: Hanser, Carl, 2014.

IMBODEN 1983

Imboden, C.: Risikohandhabung: Ein entscheidungsbezogenes Verfahren. Berlin. Springer, 1983.

JONDRALE 2013

Jondral, A. G.: Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes. Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Inst. für Technologie, Diss., 2013. 1. Aufl. Aachen, 2013.

JONEN 2007

Jonen, A.: Semantische Analyse des Risikobegriffs - Strukturierung der betriebswirtschaftlichen Risikodefinitionen und literaturempirische Auswertung. 2. Auflage. Kaiserslautern: Lehrstuhl für Unternehmensrechnung und Controlling, Techn. Univ. Online, 2007.

JUNGE 2007

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

KABELITZ UND STECKFUß 2014A

Kabelitz, S.; Streckfuß, U.: Energieflexibilität in der Produktionstheorie. Ein analytischer Identifikationsansatz. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)* (109 Nr. 1-2), S. 43-45, 2014.

KABELITZ UND STECKFUß 2014B

Kabelitz, S.; Streckfuß, U.: Identifikation energierelevanter Flexibilitätsdimensionen von Fertigungssystemen. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)* (109 Nr. 12), S. 900-903, 2014.

KAMISKE 2015

Kamiske, G.: Handbuch QM-Methoden. Die richtige Methode auswählen und erfolgreich umsetzen. 3., aktual. und erw. Aufl. München: Huber, 2015.

KAMPER 2010

Kamper, A.: Dezentrales Lastmanagement zum Ausgleich kurzfristiger Abweichungen im Stromnetz. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing. 2010.

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: *7. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 16.02-18.02 2011*.

KELLER ET AL. 2015

Keller, F.; Schönborn, C.; Reinhart, G.: Energy-orientated Machine Scheduling for Hybrid Flow Shops. In: *Procedia CIRP* 29, S. 156–161, 2015. DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.103.

KELLER ET AL. 2016A

Keller, F.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Integration of On-site Energy Generation into Production Planning Systems. In: *Procedia CIRP* 48, S. 254–258, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.158.

KELLER ET AL. 2016B

Keller, F.; Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Enabling Energy-Flexibility of Manufacturing Systems through New Approaches within Production Planning and Control. In: *Procedia CIRP* 57, S. 752–757, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.130.

KELLER UND REINHART 2016

Keller, F.; Reinhart, G.: Energy Supply Orientation in Production Planning Systems. In: *Procedia CIRP* 40, S. 244–249, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2016.01.113.

KELLER ET AL. 2017

Keller, F.; Schultz, C.; Simon, P.; Braunreuther, S.; Glasschröder, J.; Reinhart, G.: Integration and Interaction of Energy Flexible Manufacturing Systems within a Smart Grid. In: *Procedia CIRP* 61, S. 416–421, 2017, DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.250.

KERN 1996

Kern, W.: Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. [HWProd]. 2., völlig neu gestaltete Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1996.

KLEINE UND HAUFF 2009

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

KLOBASA ET AL. 2013

Klobasa, M.; Angerer, G.; Lüllmann, A.; Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. 2013: Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.

KLÖBER-KOCH ET AL 2016

Klöber-Koch, J.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Vorausschauende Produktionsplanung unter Beachtung des operativen Risikos. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)* (111 Nr. 10), S. 602-606, 2016.

KLÖBER-KOCH ET AL. 2017

Klöber-Koch, J.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Predictive Production Planning Considering the Operative Risk in a Manufacturing System. In: *Procedia CIRP* 63, S. 360–365. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.118, 2017.

KOHLER UND AGRICOLA 2012

Kohler, S.; Agricola, A.: Integration erneuerbarer Energien in den deutsch-europäischen Strommarkt. In: *ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE TAGESFRAGE* 62 (12), S. 41–44, 2012.

KÖHLER ET AL. 2010

Köhler, P.; Bintanja, R.; Fischer, H.; Joos, F.; Knutti, R.; Lohmann, G.; Masson-Delmotte, V.: What caused Earth's temperature variations during the last 800,000 years? Data-based evidence on radiative forcing and constraints on climate sensitivity. In: *Quaternary Science Reviews* 29 (1-2), S. 129–145, 2010, DOI: 10.1016/j.quascirev.2009.09.026.

KÖNIG 2008

König, R.: Management betrieblicher Risiken produzierender Unternehmen. RWTH Aachen, Diss.—Aachen, 2008.

KUHN ET AL. 2006

Kuhn, A.; Schuh, G.; Stahl, B.: Nachhaltige Instandhaltung. Trends, Potenziale und Handlungsfelder nachhaltiger Instandhaltung; Frankfurt am Main: VDMA-Verl. 2006.

KUNZE 2007

Kunze, B.: Überwachung operationeller Risiken bei Banken. Interne und externe Akteure im Rahmen qualitativer und quantitativer Überwachung. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag. 2007.

LANGROCK ET AL. 2015

Langrock, T.; Achner, S.; Jungbluth, C.; Marambio, C., Michels, A., Weinhard, P.: Potentiale regelbaren Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energien. Hg. v. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Dessau-Roßlau, 2015.

LANGROCK ET AL. 2016

Langrock, T.; Brühl, S.; Michels, A.: Lastmanagement in Nordrhein-Westfalen: Potenziale, Hemmnisse, Handlungsoptionen. Hg. v. BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH. Aachen, 2016.

LE QUÉRÉ ET AL. 2009

Le Quéré, C.; Raupach, M. R.; Canadell, J. G.: Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. In: *Nature Geosci* 2 (12), S. 831–836, 2009, DOI: 10.1038/ngeo689.

LEHNHOFF 2010

Lehnhoff, S.: Dezentrales vernetztes Energiemanagement. Ein Ansatz auf Basis eines verteilten adaptiven Realzeit-Multiagentensystems. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.

LIEBL ET AL. 2015A

Liebl, C.; Popp, R.; Zäh, M. F.: Energieflexibilität von Produktionsanlagen. Energieflexibilitäts-Kennfelder zur Abschätzung der Energieflexibilitäts-Potentiale unterschiedlicher Anlagen. In: *wt Werkstattstechnik online* (105 Nr. 3), S. 136-140, 2015.

LIEBL ET AL. 2015B

Liebl, C.; Rupp, S.; Zäh, M. F.; Keller, F.; Klimm, B.: Energiedaten-Monitoring für KMU. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)* (110 Nr. 11), S. 681-685, 2015.

LIEBL UND ZÄH 2014

Liebl, C.; Zäh, M. F.: Energiebedarfssimulation von Produktionsanlagen. In: *wt Werkstattstechnik online* (104 Nr. 5), S. 325-329, 2014.

LÖDDING 2008

Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 2., erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.

LÖDDING 2016

Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung: Springer Berlin Heidelberg, 2016.

LOSI ET AL. 2015

Losi, A.; Mancarella, P.; Vicino, A.: Integration of Demand Response Into the Electricity Chain. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2015.

MATYAS 2013

Matyas, K.: Instandhaltungslogistik. Qualität und Produktivität steigern. 5., aktualisierte Aufl. München, Wien: Hanser, 2013.

MOROFF 2016

Moroff, G.; Focke, K.: Repetitorium zur Investitionsrechnung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.

MOUZON ET AL. 2007

Mouzon, G.; Yildirim, M. B.; Twomey, J.: Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment. In: *International Journal of Production Research* 45 (18-19), S. 4247–4271, 2007, DOI: 10.1080/00207540701450013.

MUGLER 1979

Mugler, J.: Risk Management in der Unternehmung. Wien: Orac Verlag, 1979.

MÜLLER 2009

Müller, D.: Einfach zum Industriemeister. Betriebswirtschaftliches Handeln ; Formelsammlung - Formeln, Tabellen und Schemen. 1. Aufl. Berlin, 2009.

NACHTWEY ET AL. 2009

Nachtwey, A.; Schwarz, S.; Riedel, R.; Schopp, M.: Entwicklung einer Methode zur Ableitung von Flexibilitätsklassen in der Produktion. In: *ZWF* 104 (4), S. 224-228, 2009, DOI: 10.3139/104.110042.

NEUGEBAUER ET AL. 2012

Neugebauer, R.; Putz, M.; Schlegel, A.; Langer, T.; Franz, E.; Lorenz, S.: Energy-Sensitive Production Control in Mixed Model Manufacturing Processes. In: Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley, USA, May 23 - 25, 2012. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 399–404.

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), S. 85–91, 2008.

NYHUIS ET AL. 2005

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

NYHUIS 2010

Nyhuis, P.: Wandlungsfähige Produktionssysteme. Hochschulgruppe Arbeits- und Betriebsorganisation; HAB-Forschungsseminar. Berlin: GITO-Verl. (Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V.). 2010.

OLHAGER 1993

Olhager, J.: Manufacturing flexibility and profitability. In: *International Journal of Production Economics* 30-31, S. 67–78. 1993. DOI: 10.1016/0925-5273(93)90082-V.

PALENSKY UND DIETRICH 2011

Palensky, P.; Dietrich, D.: Demand Side Management. Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. In: *IEEE Trans. Ind. Inf.* 7 (3), S. 381–388, 2011, DOI: 10.1109/TII.2011.2158841.

PAPE 2015

Pape, U.: Grundlagen der Finanzierung und Investition. Boston, MA: De Gruyter, 2015.

PAWELLEK 2016

Pawellek, G.: Integrierte Instandhaltung und Ersatzteillogistik. Vorgehensweisen, Methoden, Tools. 2. Aufl. 2016.

PECHMANN UND SCHÖLER 2011

Pechmann, A.; Schöler, I.: Optimizing Energy Costs by Intelligent Production Scheduling. In: Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd - 4th, 2011. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, S. 293–298.

PECHMANN ET AL. 2012A

Pechmann, A.; Hackmann, R.; Schöler, I.: Measuring and Visualizing Different Energy Sources: A Concept for an Energy Management System. In: Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley, USA, May 23 - 25, 2012. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 527–532.

PECHMANN ET AL. 2012B

Pechmann, A.; Schöler, I.; Hackmann, R.: Energy Efficient and Intelligent Production Scheduling – Evaluation of a New Production Planning and Scheduling Software. In: Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley, USA, May 23 - 25, 2012. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 491–496.

PETER 2009

Peter, K.: Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in der Kleinserienproduktion. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss, 2009. Aachen, Karlsruhe: Shaker; Wbk Inst. für Produktionstechnik.

POPP ET AL. 2017

Popp, R.; Liebl, C.; Zäh, M. F.: Evaluation of the Energy Flexible Operation of Machine Tool Components. In: *Procedia CIRP* 63, S. 76–81. 2017 DOI: 10.1016/j.procir.2017.02.037.

PREIBLER 2008

Preißler, P. R.: Betriebswirtschaftliche Kennzahlen. Formeln, Aussagekraft, Sollwerte, Ermittlungsintervalle. München: Oldenbourg, 2008.

PUTZ ET AL. 2012

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

PUTZ ET AL. 2013

Putz, M.; Schlegel, A.; Franz, E.; Langer, T.; Stoldt, J.: Energy-sensitive control strategies for discrete part manufacturing. In: *10th Global Conference on Sustainable Manufacturing CIRP-Conference*, Istanbul, 2013.

PUTZ ET AL. 2014

Putz, M.; Schlegel, A.; Stoldt, J.; Franz, E.; Langer, T.: Energy-sensitive control strategies for decoupled production systems. In: *IJSM* 3 (3), S. 250, 2014, DOI: 10.1504/IJSM.2014.065661.

PUTZ ET AL. 2015

Putz, M.; Stoldt, J.; Fanghänel, C.; Bierer, A.; Schlegel, A.: Making Sustainability Paradigms a Part of PPC. In: *Procedia CIRP* 29, S. 209–214, 2015, DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.167.

RACKOW ET AL. 2015

Rackow, T.; Kohl, J.; Canzaniello, A.; Schuderer, P.; Franke, J.: Energy Flexible Production. Saving Electricity Expenditures by Adjusting the Production Plan. In: *Procedia CIRP* 26, S. 235–240, 2015, DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.179.

RAGER 2008

Rager, M.: Energieorientierte Produktionsplanung. Analyse, Konzeption und Umsetzung. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2008.

RAGER ET AL. 2015

Rager, M.; Gahm, C.; Denz, F.: Energy-oriented scheduling based on Evolutionary Algorithms. In: *Computers & Operations Research* 54, S. 218–231, 2015, DOI: 10.1016/j.cor.2014.05.002.

REINHARDT 2013

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

REINHART ET AL. 2014

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

REINHART UND GRUNWALD 2000

Reinhart, G.; Grunwald, S.: Einführung wandlungsfähiger Prozesse im Engineering. In: *ZWF* 95 (7-8), S. 351–355, 2000.

REINHART ET AL. 2012

Reinhart, G.; Reinhardt, S.; Graßl, M.: Energieflexible Produktionssysteme. Einführungen zur Bewertung der Energieeffizienz von Produktionssystemen. In: *wt Werkstattstechnik online* (102 Nr. 9), S. 622-628, 2012.

REINHART UND SCHULTZ 2014

Reinhart, G.; Schultz, C.: Herausforderungen einer energieorientierten Produktionssteuerung. In: *ZWF* (109 Nr. 1-2), S. 29-33, 2014.

REINHART 2015

Reinhart, G.: Skript Fabrikplanung. Technische Universität München, München. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), 2015.

ROGALSKI 2009

Rogalski, S.: Entwicklung einer Methodik zur Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen. Messung von Mengen-, Mix- und Erweiterungsflexibilität zur Bewältigung von Planungsunsicherheiten in der Produktion. Univ., Diss., 2009. Karlsruhe. Univ.-Verl. Karlsruhe.

### ROMEIKE 2004

Romeike, F.: Erfolgsfaktor Risiko-Management. Chance für Industrie und Handel ; Methoden, Beispiele, Checklisten; 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2004.

### ROMEIKE UND HAGER 2009

Romeike, F.; Hager, P.: Erfolgsfaktor Risiko-Management 2.0. Methoden, Beispiele, Checklisten ; Praxishandbuch für Industrie und Handel. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2009.

### SCHÄFERS 2014

Schäfers, H.: Bestimmung und Verortung des Demand-Side-Integration-Potenzials von Nichtwohngebäuden des tertiären Sektors unter Verwendung amtlicher Liegenschaftskatasterinformationssysteme (ALKIS). Hamburg; Universitätsverlag Hamburg, 2014.

### SCHELLMANN 2012

Schellmann, H.: Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz; Techn. Univ. München, Diss. 2012. München: Utz-Verlag.

### SCHENK ET AL. 2014

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

### SCHIEFERDECKER 2006

Schieferdecker, B.: Energiemanagement-Tools. New York. Springer-Verlag, Berlin, 2006.

### SCHNECK 2010

Schneck, O.: Risikomanagement. Grundlagen, Instrumente, Fallbeispiele. 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2010.

### SCHNELLBACH 2016

Schnellbach, Peter: Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung unter Berücksichtigung von Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme. München: Utz, Herbert (Forschungsberichte IWB, 312), 2016.

### SCHOTT ET AL. 2018

Schott, P.; Ahrens, R.; Bauer, D.; Hering, F.; Keller, R.; Pullmann, J.; Schel, D.; Schimmelpfennig, J.; Simon, P.; Weber, T.; Abele, E.; Bauernhansl, T.; Fridgen, G.; Jarke, M.; Reinhart, G.: Flexible IT platform for synchronizing energy demands with volatile markets. *it – Information Technology*, 2018, 60, S. 155-164.

SCHREIBER 1994

Schreiber, M.: Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit. Diss. Universität Karlsruhe. Karlsruhe: Schnelldruck Ernst Grässer (59), 1994.

SCHUFFT 2007

Schufft, W.: Taschenbuch der elektrischen Energietechnik. Mit 388 Bildern und 102 Tabellen. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, 2007.

SCHUH 2006

Schuh, G.: Change Management — Prozesse strategiekonform gestalten. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

SCHUH 2007

Schuh, Günther: Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung Und Konzepte. Dordrecht: Springer (VDI-Buch), 2007.

SCHUH ET AL. 2000

Schuh, G.; Gulden, A.; Wemhörner, N. Kampker, A.: Bewertung der Flexibilität von Produktionssystemen. Kennzahlen zur Bewertung der Stückzahl-, Varianten- und Produktänderungsflexibilität auf Linienebene. In: *wt Werkstattstechnik online* 94, S. 299–304, 2000.

SCHUH UND STICK 2012

Schuh, G.; Stich, V.: Grundlagen der PPS. 4., überarb. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2012.

SCHULTZ ET AL. 2015A

Schultz, C.; Keller, F.; Simon, P.; Reinhart, G.; Dornmair, R.; Wagner, U.: Wirtschaftlicher Einsatz von Energieflexibilität als Lösungsbaustein der Energiewende, 2015 In: *ZWF* 110 (7-8), S. 416–420. DOI: 10.3139/104.111365.

SCHULTZ ET AL. 2015B

Schultz, C.; Sellmaier, P.; Reinhart, G.: An Approach for Energy-oriented Production Control Using Energy Flexibility. In: *Procedia CIRP* 29, S. 197–202, 2015, DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.038.

SCHULTZ ET AL. 2016

Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Method for an Energyoriented Production Control. In: *Procedia CIRP* 48, S. 248–253, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.058.

SCHULTZ ET AL. 2017

Schultz, C.; Braun, S.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Integration of Load Management into an Energy-oriented Production Control. In: *Procedia Manufacturing* 8, S. 144–151, 2017, DOI: 10.1016/j.promfg.2017.02.017.

SCHUY 1989

Schuy, A.: Risiko-Management. Eine theoretische Analyse zum Risiko und Risikowirkungsprozess als Grundlage für ein risikoorientiertes Management unter besonderer Berücksichtigung des Marketings. Frankfurt a. M, Bern: Europäische Hochschulschriften. Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaft, Bd. 1044, 1989.

SERVATIUS ET AL. 2012

Servatius, H.; Schneidewind, U.; Rohlfing, D.: Smart energy. Wandel zu einem nachhaltigen Energiesystem. Heidelberg: Springer, 2012.

SETHI UND SETHI 1990

Sethi, A.; Sethi, S.: Flexibility in manufacturing. A survey. In: *Int J Flex Manuf Syst* 2 (4), 1990, DOI: 10.1007/BF00186471.

SHAPIRA 1994

Shapira, Z.: Risk taking. A managerial perspective. New York: Russell Sage Foundation, 1994.

SHWECHUK UND MOODIE 1998

Shewchuk, J. P.; Moodie, C. L. (1998). In: *Int J Flex Manuf Syst* 10 (4), S. 325–349, 1998, DOI: 10.1023/A:1008062220281.

SIMON ET AL. 2016A

Simon, P.; Glasschröder, J.; Reinhart, G.: Energieflexibilität eines Produktionssystems. *Wt Werkstatttechnik online*, 2016, S. 199-203.

SIMON ET AL. 2016B

Simon, P.; Schultz, C.; Keller, F.; Glasschröder, J.; Reinhart, G.: Energieflexibilität in Produktionssystemen. 14. Symposium Energieinnovation, 10.-12.02.2016, Graz.

SIMON ET AL. 2017A

Simon, P.; Roltsch, F.; Glasschröder, J.; Reinhart, G.: Approach for a Potential Analysis of Energy Flexible Production Systems. *Procedia CIRP* 63, 2017, S. 580–585.

### SIMON ET AL. 2017B

Simon, P.; Rösch, M.; Zeiträg, Y.; Klöber-Koch, J.; Glasschröder, J.; Reinhart, G.: Methode zur Bewertung von Energieflexibilitätsmaßnahmen unter Risikoaspekten. 10. Internationale Energiewirtschaftstagung – 15.-17. Februar 2017, Wien.

### SIMON ET AL 2018A

Simon, P.; Diehl, D.; Glasschröder, J.; Reinhart, G.: Approach for the Identification of Influencing Factors and their Effects on Energy Flexible Production Systems. 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 18-20 July 2018, Gulf of Naples, Italy 12 (2018), (bereits auf Konferenz vorgestellt – noch nicht veröffentlicht).

### SIMON ET AL. 2018B

Simon, P.; Zeiträg, Y.; Glasschröder, J.; Gutowski, T.; Reinhart, G.: Approach for a Risk Analysis of Energy Flexible Production Systems. Procedia CIRP 64 (2018), (bereits auf Konferenz vorgestellt – noch nicht veröffentlicht).

### SIMON UND DATZMANN 2016

Simon, P.; Datzmann, S.: Saisonale Verschiebung von Last in energieintensiven Unternehmen. In: *Energie 2.0, 2016*.

### SLACK 1983

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

### STEINMETZ 2007

Steinmetz, M.: Risikosituation und -handhabung in der Produktion. Ein Konzept zur Verbesserung der Risikosituation. Techn. Univ., Diss—München, 2007. 1. Aufl. München: TCW Transfer-Centrum.

### STERMAN 2000

Sterman, J. D.: Business dynamics. Systems thinking and modeling for a complex world. Boston Mass. u.a.: Irwin McGraw-Hill, 2000.

### STEVEN 2007

Steven, M.: Handbuch Produktion. Theorie - Management - Logistik - Controlling. Stuttgart: Kohlhammer, 2007.

STOLDT ET AL- 2013

Stoldt, J.; Neumann, D.; Langer, T.; Putz, M.; Schlegel, A.: Increasing energy efficiency through simulation-driven process evaluation. In: *11th Global Conference on Sustainable Manufacturing* 23rd-25th September, 2013, Berlin, S. 523–528.

STRBAC 2008

Strbac, G.: Demand side management. Benefits and challenges. In: *Energy Policy* 36 (12), S. 4419–4426, 2008, DOI: 10.1016/j.enpol.2008.09.030.

SUN ET AL. 2014

Sun, Z.; Li, L.; Fernandez, M.; Wang, J.: Inventory control for peak electricity demand reduction of manufacturing systems considering the tradeoff between production loss and energy savings. In: *Journal of Cleaner Production* 82, S. 84–93, 2014, DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.06.071.

SUN ET AL. 2015

Sun, Z.; Li, L.; Bego, A.; Dababneh, F.: Customer-side electricity load management for sustainable manufacturing systems utilizing combined heat and power generation system. In: *International Journal of Production Economics* 165, S. 112–119, 2015, DOI: 10.1016/j.ijpe.2015.04.002.

SUN UND LI 2013

Sun, Z.; Li, L.: Opportunity Estimation for Real-Time Energy Control of Sustainable Manufacturing Systems. In: *IEEE Trans. Automat. Sci. Eng.* 10 (1), S. 38–44, 2013, DOI: 10.1109/TASE.2012.2216876.

SUN UND LI 2014

Sun, Z.; Li, L.: Potential capability estimation for real time electricity demand response of sustainable manufacturing systems using Markov Decision Process. In: *Journal of Cleaner Production* 65, S. 184–193, 2014, DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.08.033.

SWAMIDASS 2000

Swamidass, P. M.: Manufacturing Flexibility. In: Paul M. Swamidass (Hg.): *Innovations in Competitive Manufacturing*. Boston, MA: Springer, 2000, S. 117–136.

SYSKA 2006

Syska, A.: Produktionsmanagement. Das A-Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2006.

TONI UND TONCHIA 1998

Toni, A.; Tonchia, S.: Manufacturing flexibility. A literature review. In: *International Journal of Production Research* 36 (6), S. 1587–1617, 1998, DOI: 10.1080/002075498193183.

ULRICH UND HILI (1976)

Ulrich, P.; Hili, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). In: *WiST Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt*, Heft 7, 1976.

UNITED NATIONS 2015

United Nations: Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/70/1). Hg. v. United Nations. United Nations. New York. 2015.

UNTERBERGER ET AL. 2017

Unterberger, E.; Glasschröder, J.; Reinhart, G.: A Systems Engineering Based Method to Increase Energy Flexibility. In: *Procedia CIRP* 63, S. 254–259, 2017. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.357.

UNTERBERGER ET AL. 2018

Unterberger, E.; Eisenreich, F.; Reinhart, G.: Design principles for energy flexible production systems, 2018, In: *Procedia CIRP* 67, S. 98–103. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.183.

UPTON 1994

Upton, D.: The Management of Manufacturing Flexibility. In: *California Management Review* 36 (2), S. 72–89, 1994, DOI: 10.2307/41165745.

US-AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN 2016

US-Akademie der Wissenschaften: Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change. Washington, D.C.: National Academies Press, 2016.

VANINI 2012

Vanini, U.: Risikomanagement. Grundlagen ; Instrumente ; Unternehmenspraxis. 1. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag, 2012.

VBW 2010

VBW: Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V.: Das Energiewirtschaftliche Gesamtkonzept (Kurzfassung). Hg. v. VBW. München, 2010.

### VDI 2815

Verein Deutsche Ingenieure e. V. (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2815 Blatt 1: Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung: Einführung, Grundlagen. Düsseldorf: Beuth, 1978.

### WAHAB 2005

Wahab, M.: Measuring machine and product mix flexibilities of a manufacturing system. In: *International Journal of Production Research* 43 (18), S. 3773–3786, 2005, DOI: 10.1080/00207540500147091.

### WANG UND LI 2013

Wang, Y.; Li, L.: Time-of-use based electricity demand response for sustainable manufacturing systems. In: *Energy* 63, S. 233–244. 2013. DOI: 10.1016/j.energy.2013.10.011.

### WATTS ET AL. 1993

Watts, C.; Hahn, C.; Sohn, B.: Manufacturing flexibility-concept and measurement. In: *Operations Management Review* 20 (3), S. 319–337, 1993.

### WEIG 2008

Weig, S.: Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten. München, 2008, Utz-Verlag.

### WEINERT 2010

Weinert, N.: Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme. Hg. v. Günther Seliger. Stuttgart: Fraunhofer-Verl. (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin), 2010.

### 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 (1), S. 41–44, 2011, DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.015.

### WEINERT UND MOSE 2016

Weinert, N.; Mose, C.: Electrical Load Management for Production Equipment Applying a Decentralized Optimization Approach. In: *Procedia CIRP* 48, S. 259–264, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.151.

### WENDEHALS 2000

Wendehals, M.: Kostenorientiertes Qualitätscontrolling. Planung - Steuerung - Beurteilung. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden, s.l.: Deutscher Universitätsverlag (Gabler Edition Wissenschaft), 2000.

WESTKÄMPER 2006

Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion (Springer-Lehrbuch). Stuttgart, 2006.

WESTKÄMPER UND DECKER 2006

Westkämper, E.; Decker, M.: Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch), 2006.

WESTKÄMPER ET AL. 2000

Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P.; Tilebein, M.: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. In: *wt Werkstattstechnik online* 90, S. 22–26, 2000.

WESTKÄMPER UND LÖFFLER 2016

Westkämper, E.; Löffler, C.: Strategien der Produktion. Technologien, Konzepte und Wege in die Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016.

WESTKÄMPER UND ZAHN 2009

Westkämper, E.; Zahn, E.: Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Berlin, Heidelberg, 2009.

WIENDAHL 2002

Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit: Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. In: *wt Werkstattstechnik online* 92, S. 122–127, 2002.

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H. P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 7., aktualisierte Aufl. München: Hanser, 2010.

WIENDAHL ET AL. 2007

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M.: Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56 (2), S. 783–809, 2007, DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.003.

WIENDAHL ET AL. 2014

Wiendahl, H. P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 2., überarb. und erw. Aufl. München: Hanser, 2014.

### WIENDAHL UND HERNANDEZ 2002

Wiendahl, H.-P.; Hernandez, R.: Entwicklung einer Methode zur Ableitung von Flexibilitätsklassen in der Produktion. In: *wt Werkstattstechnik online* (92), S. 133–137, 2002.

### WILDEMANN 1997

Wildemann, H.: Kosten- und Leistungsrechnung für präventive Qualitätssicherungssysteme. In: Wolfgang Becker und Jürgen Weber (Hg.): *Kostenrechnung. Stand und Entwicklungsperspektiven*. Wiesbaden: Gabler Verlag, S. 509–526, 1997.

### WILLEKE ET AL. 2014

Willeke, S.; Wesebaum, S.; Ullmann, G.; Nyhuis, P.: Energiekosteneffiziente Fertigungssteuerung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)* (109 Nr. 5), S. 328–331, 2014.

### WILLEKE ET AL. 2015A

Willeke, S.; Wesebaum, S.; Ullmann, G.: Integration zeitvariabler Energiekosten in die Belastungsorientierte Auftragsfreigabe. In: *Logistics Journal*. 2015 Online verfügbar unter [http://www.logistics-journal.de/not-reviewed/2015/07/4200/willeke\\_2015.pdf](http://www.logistics-journal.de/not-reviewed/2015/07/4200/willeke_2015.pdf), zuletzt geprüft am 28.05.2016.

### WILLEKE ET AL. 2015B

Willeke, S.; Wesebaum, S.; Ullmann, G.; Nyhuis, P.: Energiekostenorientierte Reihenfolgebildung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)* (110 Nr. 9), S. 495–499, 2015.

### WINKLER 2007

Winkler, H.: Modellierung vernetzter Wirkbeziehungen im Produktionsanlauf. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2007. Garbsen: PZH Produktionstechnischem Zentrum, 2007.

### WINTER 2004

Winter, H.: Risikomanagement und effektive Corporate Governance. Das Spannungsfeld von wertorientierter Unternehmenssteuerung und externer Rechnungslegung. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 2004.

### WOLF UND RUNZHEIMER 2009

Wolf, K.; Runzheimer, B.: *Risikomanagement und KonTraG. Konzeption und Implementierung*. 5., vollst. überarb. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2009.

WUNSCH 2000

Wunsch, G.: Grundlagen der Prozesstheorie. Struktur und Verhalten dynamischer Systeme in Technik und Naturwissenschaft. Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag, 2000.

ZEHIR UND BAGRIYANIK 2012

Zehir, M. A.; Bagriyanik, M.: Demand Side Management by controlling refrigerators and its effects on consumers. In: *Energy Conversion and Management* 64, S. 238–244, 2012, DOI: 10.1016/j.enconman.2012.05.012.

ZEPP 2009

Zepp, M.: Der Risikobericht von Kreditinstituten. Anforderungen, Normen, Gestaltungsempfehlungen. Berlin: Schmidt (Bilanz-, Prüfungs- und Steuerwesen, 12), 2009.

ZHOU UND LI 2013

Zhou, Z.; Li, L.: Real time electricity demand response for sustainable manufacturing systems considering throughput bottleneck detection. In: *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2013. 17 - 20 Aug. 2013, Madison, WI, USA, 2013.