



HERBERT UTZ VERLAG WISSENSCHAFT

FORSCHUNGSBERICHTE

300

Markus Graßl

Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

Markus Graßl

Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

Herbert Utz Verlag · München 2015

Forschungsberichte IWB
Band 300

EBook-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7143-4 Version: 1 vom
Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4476-6
Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

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

Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion

Markus Albert Graßl

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh

Prüfer der Dissertation:

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

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

Markus Graßl

**Bewertung der Energieflexibilität
in der Produktion**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 300

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

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

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2015

ISBN 978-3-8316-4476-6

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

Geleitwort der Herausgeber

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

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

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

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

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

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

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

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

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

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

Inhaltsverzeichnis

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

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

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

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

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

Abkürzungsverzeichnis

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

Abkürzungsverzeichnis

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

Verzeichnis der Formelzeichen

Große lateinische Buchstaben

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

Verzeichnis der Formelzeichen

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