

Christoph Johannes

# Energieorientierte Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei zeitabhängigen Energiepreisen

Konzeption quantitativer  
Planungsmodelle zur  
Entscheidungsunterstützung



Springer Gabler

---

# **Produktion und Logistik**

## **Reihe herausgegeben von**

Bernhard Fleischmann, Lehrstuhl Produktion und Logistik, Universität Augsburg,  
Augsburg, Deutschland

Martin Grunow, TUM School of Management, Technische Universität München,  
München, Deutschland

Stefan Helber, Institut für Produktionswirtschaft, Universität Hannover,  
Hannover, Deutschland

Karl Inderfurth, Fak Wirtschaftswissenschaften, Otto-von-Guericke-Universität,  
Magdeburg, Deutschland

Herbert Kopfer, Lehrstuhl für Logistik, Universität Bremen, Bremen,  
Deutschland

Herbert Meyr, Universität Hohenheim, Stuttgart, Deutschland

Thomas S. Spengler, Produktion und Logistik, TU Braunschweig, Braunschweig,  
Deutschland

Hartmut Stadtler, Institut für Logistik und Transport, Universität Hamburg,  
Hamburg, Deutschland

Horst Tempelmeier, FB Produktionswirtschaft, Universität Köln, Köln,  
Deutschland

Gerhard Wäscher, BWL VIII: Management Science, Univ. Magdeburg,  
Magdeburg, Deutschland

Christian Bierwirth, Wirtschaftswiss. Fakultät LS für BW, Universität  
Halle-Wittenberg, Halle, Deutschland

Katja Schimmelpfeng, Fak. Wirtschafts-u. Sozialwissensch, Universität  
Hohenheim Fak. Wirtschafts-u. Sozialwissensch, Stuttgart, Deutschland

Moritz Fleischmann, Lehrstuhl für Logistik und SCM, Universität Mannheim,  
Mannheim, Deutschland

Hans-Otto Günther, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

Diese Reihe dient der Veröffentlichung neuer Forschungsergebnisse auf den Gebieten der Produktion und Logistik. Aufgenommen werden vor allem herausragende quantitativ orientierte Dissertationen und Habilitationsschriften. Die Publikationen vermitteln innovative Beiträge zur Lösung praktischer Anwendungsprobleme der Produktion und Logistik unter Einsatz quantitativer Methoden und moderner Informationstechnologie.

### **Kontakt**

Professor Dr. Thomas S. Spengler  
Technische Universität Braunschweig  
Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion  
Mühlenpfordtstraße 23  
38106 Braunschweig

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/12449>

---

Christoph Johannes

# Energieorientierte Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei zeitabhängigen Energiepreisen

Konzeption quantitativer  
Planungsmodelle zur  
Entscheidungsunterstützung



Springer Gabler

Christoph Johannes  
Technische Universität Braunschweig  
Braunschweig, Deutschland

Produktion und Logistik  
ISBN 978-3-658-30917-6      ISBN 978-3-658-30918-3 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-30918-3>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Gabler ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

---

## Geleitwort

Das Energiesystem in Deutschland und auch in vielen anderen Ländern durchläuft derzeit eine massive Umgestaltung. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Ausweitung erneuerbarer Energieerzeugung. Im elektrischen Energiesektor werden dabei bislang bereits mehr als 38 Prozent der Energie aus erneuerbaren Quellen gewonnen. Mit der Verwendung erneuerbarer Energiequellen, insbesondere aus Sonnenlicht und Wind, geht jedoch eine wetterabhängige Volatilität in der Erzeugungsmenge einher. Aus wirtschaftlicher Sicht äußert sich diese Volatilität im Energiemarkt in dynamischen Energiepreisen, welche in kurzen Zeitintervallen angepasst werden.

Für die industrielle Wertschöpfung ist der Einsatz elektrischer Energie unabdingbar. So wird elektrische Energie für den Betrieb von Motoren, zur Beleuchtung und teilweise auch zur Erwärmung von Wasser, Werkstoffen und Aggregaten benötigt. Elektrische Energie hat dabei einen Anteil von 32 Prozent am Gesamtenergieeinsatz in der Industrie. Offenkundig ist die verwendete Energiemenge direkt abhängig von Einsatzentscheidungen der verwendenden Aggregate. Der energieorientierten Planung kommt daher eine wirtschaftlich große Bedeutung zu.

Eine betriebswirtschaftlich motivierte energieorientierte Produktionsplanung ist jedoch mit vielfältigen Herausforderungen verbunden. Diese stellen insbesondere auf die Berücksichtigung von Energieverbräuchen aller mithilfe einer Maschine oder Anlage durchgeführten Aktivitäten sowie deren Interdependenzen ab. Daneben sind im Rahmen der Produktionsplanung weitere organisatorische Rahmenbedingungen wie Rüst- und Lagerhaltungskosten zu berücksichtigen. Eine maßgebliche Herausforderung stellen hierbei jedoch dynamische Energiepreise dar. Diese werden in den in der Literatur vorliegenden Ansätzen bislang nur unzureichend berücksichtigt. Eine wesentliche Forschungslücke besteht daher

in der Ausgestaltung von Planungsansätzen in der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung, welche kurzfristig variierende Energiepreise sowie weitere technologische und organisatorische Anforderungen geeignet berücksichtigen.

Vor diesem Hintergrund setzt sich Herr Johannes in seiner Dissertation das Ziel, eine Entscheidungsunterstützung für das skizzierte Umfeld zu entwickeln und Handlungsempfehlungen für Industrie und Politik abzuleiten. Die besonderen Herausforderungen der Zielsetzung bestehen in der Identifikation von Ansatzpunkten zur Berücksichtigung des Energiewertes in gängigen Planungsansätzen der Losgrößenplanung. Dabei erweisen sich sowohl die mathematische Formalisierung der vorliegenden Entscheidungsvariablen, Zielfunktionen und Restriktionen als auch die Entwicklung eines geeigneten Evaluationsrahmens als methodisch anspruchsvoll.

Herr Johannes deckt mit seiner Dissertation eine sowohl unter theoretischen als auch praxisorientierten Gesichtspunkten aktuelle und anspruchsvolle Thematik ab, und dies auf durchgehend höchstem Niveau. Das Aufgreifen und gezielte Nutzen betriebswirtschaftlicher Chancen in neuen Energiemarkten ist eine wesentliche Herausforderung hin zu mehr Flexibilität und Effizienz in zukünftigen Energiesystemen. Die Problemstellung der vorliegenden Arbeit ist gekennzeichnet durch ein hohes Maß an technologischen, organisatorischen und informationsbezogenen Herausforderungen sowie einer herausragenden wirtschaftlichen und ökologischen Relevanz. Herrn Johannes ist es in beeindruckender Weise gelungen, einen überzeugenden Planungsrahmen aufzuspannen, mehrere Modellierungskonzepte sowohl formal als auch inhaltlich mit Leben zu füllen sowie komplexe dynamische Zusammenhänge in Zeitstrukturen und Rüstvorgängen abzubilden. Insgesamt ist die Arbeit geprägt von einer sehr hohen theoretischen Eindringtiefe in die mit der Bearbeitung der Thematik verbundenen Themengebiete der Betriebswirtschaftslehre, des Operations Research und des Ingenieurwesens. Sie leistet damit einen relevanten und methodisch stringenten Forschungsbeitrag. Interessierten Lesern aus Wirtschaft und industrieller Praxis ist sie unbedingt zu empfehlen.

Univ.-Prof. Dr. Thomas Stefan Spengler

---

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktion und Logistik des Instituts für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion an der Technischen Universität Braunschweig. Die Zeit am Lehrstuhl war gekennzeichnet durch viele berufliche und persönliche Höhepunkte, aber auch das Kennenlernen eigener Grenzen und deren Überwindung. Ich möchte an dieser Stelle allen Personen danken, die mich in dieser Zeit begleitet und unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Dr. Thomas Spengler. Von Beginn an hat er mich gefördert und gefordert, mich durch fachliche Anregungen und kritische Diskussionen schrittweise weitergebracht und damit wesentlich zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen. Außerdem möchte ich ihm für das entgegengebrachte Vertrauen und die mir übertragene Verantwortung in Forschung und Lehre sowie für die persönliche Unterstützung danken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann danke ich für die Übernahme des Korreferats und die wertvollen Diskussionen. Herrn Prof. Dr. Dietrich von der Oelsnitz sei für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission und der Schaffung einer guten Prüfungsatmosphäre gedankt.

Die Zeit am Lehrstuhl wird mir vor allem meiner Kollegen wegen in Erinnerung bleiben. Herzlicher Dank gilt Matthias Wichmann, der mir in seiner Zeit als Habilitand jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand und mir somit half, diesen Weg zu gehen. Für die zahlreichen fachlichen Diskussionen auf dem Weg zur Promotion und für die gemeinsame Zeit am Lehrstuhl und im Privaten danke ich ganz besonders Martin Grunewald, Karsten Kieckhäuser, Maren Kreis, Christoph Schinner, Kerstin Schmidt, Christian Thies und Christian Weckenborg. Dank gebührt ebenfalls meinen weiteren ehemaligen Kollegen Alexander Barke, Anna Breitenstein, Amjad Essakly, Raphael Ginster, Katharina Hibbeln, Isa von

Hoesslin, Claas Hoyer, Christoph Hüls, David Kik, Andreas Matzke, Christoph Meyer, Patrick Oetjegerdes, Karen Puttkammer, Sina Quidde, Carsten Ruhnke, Felix Saucke, Christian Scheller, Ina Schlei-Peters, Patrick Schumacher, Natalia Stepien und Sönke Wieczorrek.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für den Rückhalt und ihre Unterstützung, insbesondere in den letzten Jahren. Besonderer Dank gebührt meinen Eltern Gudrun und Ralf-Peter dafür, dass sie mich jederzeit unterstützt und mir im Leben alle Möglichkeiten und Freiheiten gegeben haben. Für die wohltuende Ablenkung vom Promovieren, unvergesslichen gemeinsamen Momente sowie die langjährige Freundschaft danke ich meiner Schwester Lena, meinem Kumpel Patrick sowie meinem Schulfreund Benno.

Mein größter Dank geht an meine Frau Julianne – dafür, dass sie den nicht immer leichten Weg zur Promotion mit mir gegangen ist, dabei immer an mich geglaubt hat, keine Selbstzweifel zuließ und für ihre mir entgegengebrachte Liebe.

Christoph Johannes

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> . . . . .	1
1.1 Ausgangslage und Problemstellung . . . . .	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise . . . . .	6
<b>2 Strommarkt 2.0 – Chance einer energieorientierten Losgrößen- und Reihenfolgeplanung</b> . . . . .	9
2.1 Relevanz von Energie für produzierende Unternehmen . . . . .	9
2.2 Der Strommarkt 2.0 aus Sicht produzierender Unternehmen . . . . .	15
2.2.1 Wandel der Energieträger . . . . .	17
2.2.2 Angebot und Nachfrage . . . . .	19
2.2.3 Marktmechanismen . . . . .	23
2.2.4 Handlungsbedarf für produzierende Unternehmen . . . . .	26
2.3 Chance einer energieorientierten Losgrößen- und Reihenfolgeplanung . . . . .	29
2.3.1 Status quo . . . . .	29
2.3.2 Grenzen mengenorientierter Planungskonzepte . . . . .	31
2.3.3 Bedarf wertorientierter Planungskonzepte . . . . .	33
2.4 Anforderungen an eine energieorientierte Losgrößen- und Reihenfolgeplanung . . . . .	34
<b>3 Stand der Forschung zur energieorientierten Losgrößen- und Reihenfolgeplanung</b> . . . . .	39
3.1 Grundlagen der simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung . . . . .	39
3.1.1 Entscheidungssituation . . . . .	40
3.1.2 Zielkriterien . . . . .	44
3.1.3 Modellierungskonzepte zum Umgang mit Dynamiken . . . . .	46

<b>3.2</b>	<b>Ansätze einer simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung . . . . .</b>	<b>48</b>
3.2.1	Konventionelle Ansätze . . . . .	48
3.2.2	Energieorientierte Ansätze . . . . .	54
<b>3.3</b>	<b>Alternative Ansätze für eine energieorientierte Produktionsplanung . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>3.4</b>	<b>Ergebnis der Literaturanalyse . . . . .</b>	<b>62</b>
<b>4</b>	<b>Maschinenzustandsbasierter Modellierungsansatz . . . . .</b>	<b>65</b>
4.1	Modellkonzeption . . . . .	65
4.2	Annahmen . . . . .	70
4.3	Notation . . . . .	74
4.4	Modellierung . . . . .	77
4.5	Klassifikation . . . . .	85
4.6	Fazit . . . . .	86
<b>5</b>	<b>Energiepreisbasierter Modellierungsansatz . . . . .</b>	<b>89</b>
5.1	Modellkonzeption . . . . .	89
5.2	Annahmen . . . . .	92
5.3	Notation . . . . .	94
5.4	Modellierung . . . . .	97
5.5	Klassifikation . . . . .	103
5.6	Fazit . . . . .	104
<b>6</b>	<b>Numerische Analyse zur Validierung und Ableitung von Handlungsempfehlungen . . . . .</b>	<b>107</b>
6.1	Einführung eines energieintensiven Produktionsprozesses im Elektrorecycling . . . . .	107
6.2	Konzeption der numerischen Analyse und Datengrundlage . . . . .	111
6.3	Bewertung betriebswirtschaftlicher Potenziale einer energieorientierten Planung . . . . .	119
6.3.1	Vorgehen zur Bewertung betriebswirtschaftlicher Potenziale . . . . .	119
6.3.2	Gegenüberstellung hinsichtlich Modellumfang, Lösbarkeit und Lösungszeit . . . . .	121
6.3.3	Gegenüberstellung hinsichtlich Einsparpotenzialen . . . . .	126

6.4	Identifikation günstiger Rahmenbedingungen für eine energieorientierte Planung . . . . .	131
6.4.1	Strukturierte Parametervariation . . . . .	132
6.4.2	Gegenüberstellung der Einsparpotenziale hinsichtlich untersuchter Rahmenbedingungen. . . . .	134
6.5	Ableitung von Handlungsempfehlungen . . . . .	136
6.5.1	Handlungsempfehlungen für produzierende Unternehmen . . . . .	136
6.5.2	Handlungsempfehlungen für politische Entscheidungsträger . . . . .	139
7	<b>Kritische Würdigung und Ausblick</b> . . . . .	141
7.1	Würdigung der entwickelten Planungsansätze und erzielten Erkenntnisse . . . . .	141
7.2	Übertragbarkeit der entwickelten Modellierungsansätze . . . . .	150
7.3	Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf . . . . .	151
8	<b>Zusammenfassung</b> . . . . .	153
<b>A</b>	<b>Optimierungsmodell für konventionellen Planungsansatz</b> . . . . .	159
<b>B</b>	<b>Boxplots der Ergebnisse der numerischen Analyse</b> . . . . .	161
<b>C</b>	<b>Optimierungsmodell für energiemengenorientierten Planungsansatz</b> . . . . .	165
<b>Literatur</b>	. . . . .	169

---

# Symbolverzeichnis

---

## Indizes und Mengen

$k, k', k'', k'''$	Index der Produkte $k, k', k'', k''' = 0, 1, \dots, K$ , wobei Produkt ‘0’ ein Dummy-Produkt darstellt
$K^{all}$	Menge aller Produkte $k$
$K^1$	Menge aller Produkte $k$ abzüglich des Dummy-Produkts ‘0’
$r, r'$	Index der energiepreisorientierten (Mikro-)Perioden $r, r' = 0, 1, \dots, R$ , wobei (Mikro-)Periode ‘0’ eine Dummy-Periode zur Initialisierung darstellt
$R^{all}$	Menge aller energiepreisorientierten (Mikro-)Perioden $r$
$R_t$	Menge aller energiepreisorientierten (Mikro-)Perioden $r$ , welche der Makroperiode $t$ zugeordnet sind
$R^1$	Menge aller energiepreisorientierten (Mikro-)Perioden $r$ abzüglich der ersten (Mikro-)Periode ‘0’
$s$	Index der maschinenzustandsorientierten Mikroperioden $s = 0, 1, \dots, S$ , wobei Mikroperiode ‘0’ eine Dummy-Periode zur Initialisierung darstellt
$S^{all}$	Menge aller maschinenzustandsorientierten Mikroperioden $s$
$S_t$	Menge aller maschinenzustandsorientierten Mikroperioden $s$ , welche der Makroperiode $t$ zugeordnet sind
$S'_t$	Menge aller maschinenzustandsorientierten Mikroperioden $s$ , welche der Makroperiode $t$ zugeordnet sind, abzüglich dem letzten Element von $S_t$
$S^1$	Menge aller maschinenzustandsorientierten Mikroperioden $s$ abzüglich der ersten maschinenzustandsorientierten Mikroperiode ‘0’

---

$t$	Index der Makroperioden $t = 1, 2, \dots, T$
$T^{\text{all}}$	Menge aller Makroperioden $t$
$T^1$	Menge aller Makroperioden $t$ abzüglich der ersten Makroperiode ‘0’

---

## Parameter

$a_k$	Bearbeitungszeit pro Produkt $k$
$C_t$	Länge der Makroperiode $t$
$d_{k,r}$	Nachfrage nach Produkt $k$ in Periode $r$
$d_{k,t}$	Nachfrage nach Produkt $k$ in Makroperiode $t$
$\varepsilon$	Ausreichend kleine Zahl $\triangleq (\frac{1}{M})$
$ec_r$	Energiepreis in der energiepreisorientierten (Mikro-)Periode $r$
$hc_k$	Lagerkostensatz für Produkt $k$ je Makroperiode $t$
$hc_{k,r}$	Lagerhaltungskostensatz für Produkt $k$ in der Mikroperiode $r$
$I_{k,0}$	Initialer Lagerbestand von Produkt $k$
$l_r$	Länge der energiepreisorientierten (Mikro-)Periode $r$
$M$	Ausreichend große Zahl, bekannt als ‘Big M’
$p_k^q$	Leistungsaufnahme der Maschine im Maschinenzustand <i>Produktion</i> von Produkt $k$ bzw. im Maschinenzustand <i>Abgeschaltet</i>
$p_r^{\bar{q}}$	Leistungsaufnahme der Maschine im Maschinenzustand <i>Standby</i> von Produkt $k$
$p_{k',k}^z$	Leistungsaufnahme der Maschine im Maschinenzustand <i>Rüsten</i> von Produkt $k'$ zu $k$
$pc_k$	Bereitschaftskostensatz für die Erhaltung des Rüstzustands von Produkt $k$
$sc_{k',k}$	Rüstkostensatz für eine Umrüstung von Produkt $k'$ zu $k$
$st_{k',k}$	Rüstzeit für eine Umrüstung von Produkt $k'$ zu $k$
$sp_{r,k',k}^{\text{start}}$	Anzahl notwendiger Perioden $r$ um eine Umrüstung von Produkt $k'$ zu $k$ , startend in der Periode $r$ , vollständig abzuschließen
$sp_{r,k',k}^{\text{end}}$	Anzahl notwendiger Perioden $r$ um eine Umrüstung von Produkt $k'$ zu $k$ , endend in der Periode $r$ , vollständig abzuschließen
$st_{k',k}^b$	Binärer Parameter zur Erkennung von Rüstzeiten länger null; nimmt den Wert eins an, wenn die Rüstzeit von Produkt $k'$ zu $k$ größer als null ist
$\omega_{k,0}$	Binärer Parameter zur Definition des initialen Maschinenzustands

## Entscheidungs- und Hilfsvariablen

$e_s$	Länge der maschinenzustandsorientierten Mikroperiode $s$
$I_{k,r}$	Lagerbestand des Produkts $k$ am Ende der Periode $r$
$I_{k,t}$	Lagerbestand des Produkts $k$ am Ende der Makroperiode $t$
$l_{r,s}$	Zugeordnete Länge von maschinenzustandsorientierten Mikroperioden $s$ zu energiepreisorientierten Mikroperioden $r$
$l_{k,r,s}^q$	Zugeordnete Länge von maschinenzustandsorientierten Mikroperioden $s$ zu energiepreisorientierten Mikroperioden $r$ im Maschinenzustand <i>Produktion</i> von Produkt $k$ , bzw. im Maschinenzustand <i>Abgeschaltet</i>
$l_{k,r,s}^{\bar{q}}$	Zugeordnete Länge von maschinenzustandsorientierten Mikroperioden $s$ zu energiepreisorientierten Mikroperioden $r$ im Maschinenzustand <i>Standby</i> von Produkt $k$
$l_{k',k,r}^z$	Länge des Maschinenzustands <i>Rüsten</i> von Produkt $k'$ zu $k$ in der energiepreisorientierte Periode $r$
$l_{k',k,r,s}^z$	Zugeordnete Länge von maschinenzustandsorientierten Mikroperioden $s$ zu energiepreisorientierten Mikroperioden $r$ im Maschinenzustand <i>Rüsten</i> von Produkt $k'$ zu $k$
$\lambda_{k',k,r}^z$	Binäre Hilfsvariable zur Erkennung eines Maschinenzustands <i>Rüsten</i> von Produkt $k'$ zu $k$ in der energiepreisorientierten Mikroperiode $r$
$q_{k,r}$	Produktionsmenge von Produkt $k > 0$ in Periode $r$ , bzw. Zeit im Maschinenzustand <i>Abgeschaltet</i>
$q_{k,s}$	Produktionsmenge von Produkt $k > 0$ in Mikroperiode $s$ , bzw. Zeit im Maschinenzustand <i>Abgeschaltet</i>
$\bar{q}_{k,r}$	Länge des Maschinenzustands <i>Standby</i> in der Periode $r$ zur Erhaltung des Rüstzustands von Produkt $k$
$\bar{q}_{k,s}$	Länge des Maschinenzustands <i>Standby</i> in der Mikroperiode $s$ zur Erhaltung des Rüstzustands von Produkt $k$
$v_{k,r}$	Binäre Hilfsvariable zur Erkennung des Maschinenzustands <i>Produktion</i> von Produkt $k$ in Periode $r$
$v_{k,s}$	Binäre Hilfsvariable zur Erkennung des Maschinenzustands <i>Produktion</i> von Produkt $k$ in Mikroperiode $s$
$\bar{v}_{k,r}$	Binäre Hilfsvariable zur Erkennung des Maschinenzustands <i>Standby</i> von Produkt $k$ in Periode $r$
$\bar{v}_{k,s}$	Binäre Hilfsvariable zur Erkennung des Maschinenzustands <i>Standby</i> von Produkt $k$ in Mikroperiode $s$

$u_{r,s}$	Binäre Hilfsvariable zur Erkennung, ob in der Mikroperiode $r$ bereits alle Zeiteinheiten der maschinenzustandsorientierten Mikroperiode $s$ den energiepreisorientierten Mikroperioden $r'$ ( $r' = [0, r]$ ) zugeordnet wurden
$V_{k,r}$	Hilfsvariable zur Bestimmung einer Reihenfolge von Rüstzuständen innerhalb einer energiepreisorientierten Periode $r$ ; je größer $V_{k,r}$ , desto später wird die Maschine für das Produkt $k$ gerüstet
$\omega_{k,r}$	Binäre Entscheidungsvariable zur Bestimmung des Rüstzustands von Produkt $k$ zu Beginn der Periode $r$
$\omega_{k,s}$	Binäre Entscheidungsvariable zur Bestimmung des Rüstzustands von Produkt $k$ zu Beginn der Mikroperiode $s$
$z_{k',k,r}$	Binäre Entscheidungsvariable als Indikator für eine abgeschlossene Umrüstung der Maschine von Produkt $k'$ zu $k$ in der Periode $r$
$z_{k',k,s}$	Binäre Entscheidungsvariable als Indikator für eine abgeschlossene Umrüstung der Maschine von Produkt $k'$ zu $k$ in der Mikroperiode $s$

---

## Abkürzungsverzeichnis

BTB	Big-Time-Bucket
CLSD	Capacitated Lot-sizing Problem with sequence-dependent setups
CLSP	Capacitated Lot-sizing Problem
CSLP	Continuous Setup Lot-sizing Problem
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DLSP	Discrete Lot-sizing and Scheduling Problem
EOGLSP	Energy-Oriented General Lot-sizing and Scheduling Problem
EOLSP	Energy-Oriented Lot-sizing and Scheduling Problem
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
MILP	Mixed-integer linear programming
MIP	Mixed-integer programming
PLSP	Proportional Lot-sizing and Scheduling Problem
STB	Small-Time-Bucket
TSP	Traveling Salesman Problem

---

## Einheitenverzeichnis

GW	Gigawatt
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
MWh	Megawattstunde
t	Tonne
TWh	Terawattstunde

---

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	Weltweite, energiebedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen nach Sektoren mit expliziter (links) und impliziter (rechts) Berücksichtigung der <i>Energiewirtschaft</i> im Jahr 2016. (Vgl. International Energy Agency (2018a), S. 98 und 101.) . . . . .	2
Abbildung 1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit . . . . .	8
Abbildung 2.1	Leistungsaufnahme eines Produktionssystems über die Zeit (Vgl. Posselt (2016), S. 32. Die dargestellte Leistungsaufnahme wurde an einer Schleifmaschine aufgenommen.) . . . . .	11
Abbildung 2.2	Zuordnung von Betriebszuständen zur Leistungsaufnahme eines Produktionssystems über die Zeit. (Eigene Abbildung in Anlehnung an Posselt (2016), S. 32). . . . .	12
Abbildung 2.3	Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern (Vgl. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. (2018b). Für die Jahre 1991–1994 sowie 1996–1999 sind keine Werte vorhanden. Diese wurden zur Veranschaulichung linear approximiert. Werte für das Jahr 2018 basieren auf vorläufigen Angaben.) . . . . .	18
Abbildung 2.4	Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie sowie Last in den Monaten Januar (a), Juli (b) und Oktober (c) 2018 (Vgl. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (2019).) . . . . .	21

Abbildung 2.5	Preise am Day-Ahead-Markt sowie verstromte Wind- und Sonnenenergie in den ersten zwei Wochen der Monate Januar (a), Juli (b) und Oktober (c) 2018 (Vgl. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (2019).)	25
Abbildung 2.6	Beispielhafte Minimierung des Energieverbrauchs von (a) nach (b) mithilfe eines mengenorientierten Planungskonzepts	31
Abbildung 2.7	Beispielhafte Minimierung der Energiekosten von (a) nach (b) mithilfe eines wertorientierten Planungskonzepts	33
Abbildung 3.1	Bezugsrahmen zur Darstellung der Problemcharakteristika in Planungsansätzen für die simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung	42
Abbildung 3.2	Modellierungskonzepte für die simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung	46
Abbildung 3.3	Grundlegende Modellierungsansätze für die simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung	49
Abbildung 4.1	Prozess der Modellbildung (Vgl. Schneeweiß (2002), S. 111)	66
Abbildung 4.2	Konzeptionelles Realmodell	70
Abbildung 4.3	Zeitstruktur des maschinenzustandsbasierten Modellierungsansatzes(Vgl. Wichmann et al. (2019b). In Anlehnung an Seeanner und Meyr (2013))	72
Abbildung 4.4	Auftretende Symmetrien in den maschinenzustandsorientierten Mikroperioden	83
Abbildung 5.1	Zeitstruktur des energiepreisbasierten Modellierungsansatzes. (Vgl. Johannes et al. (2019a). In Anlehnung an Wichmann et al. (2019b) und Seeanner und Meyr (2013).)	93
Abbildung 5.2	Besonderheiten bei der Modellierung endogener Dynamiken auf exogenen Zeitstrukturen	94
Abbildung 6.1	Vereinfachtes Prozessschema für das Recycling von Elektro- und Elektronikgeräte	109
Abbildung 6.2	Modellumfang der Modellierungsansätze EOGLSP und EOLSP für eine Instanz mit $K = 8, R = 44, S = 50$ sowie $T = 5$	123
Abbildung 6.3	Kosteneinsparungen EOGLSP	127
Abbildung 6.4	Kosteneinsparung EOLSP	128