



# Ein Energie-Management-System für wärmeintensive Produktionsprozesse

## Energy-Management-System for Heat Intensive Production Plants

Steffen Sommer, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,  
Jens Böhm, Rothenseer Generatorenfertigung GmbH, Magdeburg,  
Achim Kienle, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

**Zusammenfassung** Ziel des vorgestellten Energie-Management-Systems für Produktionsbetriebe ist die Minimierung der Energiekosten während des Produktionsprozesses unter gleichzeitiger Einhaltung von Zusatzbedingungen bezüglich Temperatur und Belüftung der Werkhalle. Dieses System realisiert eine dynamische Lastverteilung, welche unnötige Lastspitzen begrenzt. Das Problem wird mit Hilfe einer Optimierung gelöst. Hierfür wird der Produktionsprozess mathematisch modelliert. Das Energie-Management-System führt zu einer erheblichen

Reduktion der Energiekosten. ►►► **Summary** An energy-management system for a production plant is presented. The aim is to minimize energy costs with respect to additional constraints concerning workshop temperature and air ventilation. The system realizes a dynamic load balance, which prevents unneeded load peaks. The problem is solved by means of optimization. Therefore, the production plant is modeled mathematically. The energy-management-system provides considerable savings in energy costs.

**Schlagwörter** Energie-Management-System, MILP, Energiekosten, Scheduling, mathematische Modellierung ►►►  
**Keywords** Energy-management-system, MILP, energy costs, scheduling, mathematical modeling

### 1 Einleitung

Immer höhere Energiepreise zwingen Betreiber von industriellen Anlagen ihre Prozesse kostentechnisch effektiv zu gestalten. In diesem Beitrag wird ein Energie-Management-System für Produktionsbetriebe vorgestellt. Ziel dieses Systems ist die Minimierung der Energiekosten während des Produktionsprozesses. Die Energiekosten setzen sich aus dem Arbeits- und dem Leistungspreisanteil zusammen. Der Arbeitspreisanteil ist für die verbrauchte Energie zu entrichten. Der Leistungspreisanteil wird anhand der maximalen Leistung, die in einem bestimmten Zeitraum auftritt, bemessen. Hohe Energiekosten entstehen unter anderem durch ungewollte Lastspitzen, die einen hohen Leistungspreisanteil verursachen. Ziel des Beitrages ist die Entwicklung eines Energie-Management-Systems, welches unnötige Lastspitzen begrenzt und in lastärmere Zeiten verlagert.

Die Kostenminimierung mit Hilfe des Energie-Management-Systems erfolgt durch eine dynamische Lastverteilung. Dies bedeutet, dass Hauptverbraucher (Produktion) und Nebenverbraucher (Heizung, Lüftung etc.) so zu- beziehungsweise abgeschaltet werden, dass sich minimale Energiekosten während des Produktionsbetriebes ergeben. Weiterhin sollen Zusatzbedingungen bezüglich Halleninnentemperatur und Belüftung eingehalten werden. Gesucht werden die entsprechenden Einschaltzeiten der Verbraucher. Das beschriebene Problem wird mit Hilfe einer Optimierung gelöst.

Zur Lösung des Optimierungsproblems wird ein mathematisches Modell des Produktionsprozesses aufgestellt. Dabei wird nicht nur die Produktion allein, sondern wegen der einzuhaltenden Zusatzbedingungen, die ganze Werkhalle betrachtet. Insgesamt ergibt sich ein gemischt ganzzahliges lineares Optimierungsproblem (MILP), wel-

ches mit Hilfe des Softwarepaketes GAMS/CPLEX [3; 8] gelöst wird.

Die Optimierungsergebnisse verdeutlichen, dass die Anwendung des Energie-Management-Systems zu einer erheblichen Reduktion der Energiekosten führt.

Viele Ansätze zur Energieoptimierung führen mit heuristischen Strategien zum Ziel. In [7] erfolgt die Minimierung der Gesamtproduktionskosten zwar ebenfalls mit Hilfe der dynamischen Lastverteilung, die Optimierung basiert aber nicht auf einem mathematischen Modell, sondern auf historischen Daten, wie zum Beispiel der Außentemperatur oder der Sonneneinstrahlung, um Lastanforderungen vorherzusagen. Das Energie-Management-System ist somit erfahrungsorientiert.

Der in dieser Arbeit vorgeschlagene Ansatz führt zu einem Scheduling-Problem aus dem Operations-Research-Bereich [4; 6]. Zwei Besonderheiten treten gegenüber Standard-Scheduling-Problemen auf. Zum einen müssen in jedem Zeitpunkt zusätzliche Pfadbeschränkungen bezüglich Temperatur und Luftwechsel in der Halle eingehalten werden. Zum anderen ist das Ziel des Scheduling-Problems die Minimierung der Energiekosten. Bei Standard-Scheduling-Problemen stehen normalerweise durchlaufzeitbezogene, kapazitätsorientierte sowie terminorientierte Ziele im Vordergrund.

[1; 5; 9] sind weitere Arbeiten über die Energiekostenminimierung von industriellen Prozessen mit Hilfe von Energie-Management-Systemen auf der Grundlage der mathematischen Optimierung. Hierbei konzentriert man sich auf spezielle Prozesse einschließlich der mathematischen Modellierung, aber nicht auf zusätzliche Pfadbeschränkungen.

Der vorliegende Beitrag stellt eine Erweiterung der Arbeiten [11] und [2] dar und ist folgendermaßen gegliedert. Im nächsten Abschnitt wird ein Beispielprozess eingeführt, an dem das Energie-Management-Konzept demonstriert werden soll. Danach erfolgt die mathematische Modellierung dieses Beispielproduktionsprozesses. Im Abschnitt 4 wird die Optimierung der Energiekosten anhand des mathematischen Modells des Beispielprozesses durchgeführt. Die Optimierungsergebnisse werden präsentiert und ausgewertet. Im letzten Abschnitt werden eine Zusammenfassung und ein Ausblick gegeben.

## 2 Beispielprozess

Zur Demonstration des Energie-Management-Systems wird ein Beispiel eingeführt. Es handelt sich um die vereinfachte Darstellung eines realen Produktionsablaufes, der Fertigung von Rotorblättern für Windkraftanlagen, genaugenommen der thermischen Behandlung von Kunststoffbauteilen [2].

Während eines 48-stündigen Produktionsprozesses soll das Produkt A (z. B. ein Rotorblatt) fünf Mal produziert werden. Der betrachtete Produktionsprozess benötigt elektrische Energie und setzt Wärme frei. Die Variable  $b$  steht für das jeweilige Exemplar/Blatt beziehungsweise den entsprechenden Auftrag/Job:  $b = 1, \dots, 5$ .

Die Produktion der fünf Exemplare erfolgt sequentiell. Die Herstellung eines Exemplars von Produkt A besteht aus vier nacheinander abzuarbeitenden Produktionsschritten/Operationen, welche durch die Variable  $k$  beschrieben werden:  $k = 1, \dots, 4$ . Die einzelnen Produktionsschritte besitzen jeweils eine Dauer von 1 h, 2 h, 1 h und 3 h. Für die Produktion steht eine Formanlage/Maschine zur Verfügung. Alle Produktionsschritte laufen auf der einen zur Verfügung stehenden Maschine ab. Insgesamt kann auf der Formanlage jeweils nur ein Exemplar be- und ein Produktionsschritt abgearbeitet werden, wobei auf die sequentielle Abarbeitung zu achten ist. Zwischen den einzelnen Produktionsschritten und der Bearbeitung der Exemplare können Pausen eingelegt werden. Ein Produktionsschritt selbst darf nicht unterbrochen werden, damit die Produktion nicht gefährdet wird.

Die vier Teilprozesse zur Produktion eines Exemplars sind die Hauptverbraucher. Hinzu kommen die Nebenverbraucher Heizung und Lüftung, die ebenfalls elektrische Energie verbrauchen. Es stehen zwei Lüftungen ( $l = 1, 2$ ) und eine Heizung zur Verfügung. Heizung und Lüftung haben die Aufgabe, für einen Temperaturbereich von 18–35 °C innerhalb der Produktionshalle zu sorgen. Zusätzlich ist die Lüftung aus arbeitsschutztechnischen Gründen dafür verantwortlich, Menschen vor Schädigungen durch hohe Schadstoffkonzentrationen zu schützen. Aus diesem Grund muss im Mittel ein vollständiger Luftwechsel in der Halle von mindestens ein Mal ( $n_{\text{sol}} = 1$ ) pro Stunde erfolgen.

Das Ziel des Energie-Management-Systems ist, dass die Produktion der fünf Exemplare des Produktes A, unter Einhaltung aller Beschränkungen, mit minimalen Energiekosten erfolgt. Der Gesamtenergieverbrauch ergibt sich aus der Summe der Verbräuche der einzelnen Haupt- und Nebenverbraucher.

## 3 Mathematische Modellierung des Produktionsprozesses

Um einen optimalen Arbeitsablauf und die damit verbundenen Einschaltzeiten der verschiedenen Verbraucher zu ermitteln, wird der gesamte Produktionsprozess, einschließlich Fabrikhalle, mathematisch modelliert.

### 3.1 Zeitformulierung

Die Formulierung der Zeit erfolgt diskret. Dies lässt sich damit begründen, dass die Pfadbeschränkungen bezüglich Temperatur und Lüftung in jedem Intervall eingehalten werden müssen. Die Zeitachse wird in Zeitintervalle ( $i = 1, \dots, n_i$ ) mit der Dauer  $\Delta t$  eingeteilt.

### 3.2 Verbraucher

Innerhalb eines jeden Zeitintervalls können die Haupt- und Nebenverbraucher aktiv sein oder nicht:

$$IPP(b, k, i) = \begin{cases} 1 & \text{Produktion aktiv} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (1)$$

$$IH(i) = \begin{cases} 1 & \text{Heizung aktiv} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2)$$

$$IL(l, i) = \begin{cases} 1 & \text{Lüftung aktiv} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3)$$

### 3.3 Klassifizierung und Modellierung des Produktionsablaufs

Es erfolgt zunächst die Klassifizierung des Produktionsablaufs. Anschließend wird das entsprechende mathematische Modell aufgestellt.

Für die folgende Klassifizierung des Produktionsablaufs wird auf die Arbeiten [4; 6; 10] zurückgegriffen. Bei der Produktionsablaufplanung soll eine bestimmte Anzahl von Aufträgen  $b = 1, \dots, n_b$  mit jeweils  $k = 1, \dots, n_k$  Operationen auf  $m = 1, \dots, n_m$  Maschinen verteilt werden. Jeder Operation  $k$  wird dabei eine Maschine  $m$  und eine Produktionsdauer  $dur(k, m)$  zugeordnet. Diese beschriebene Aufgabenstellung wird Scheduling-Problem genannt. Im eingeführten Beispiel werden auf einer vorhandenen Maschine ( $n_m = 1$ ) hintereinander fünf Aufträge ( $n_b = 5$ ) abgearbeitet. Jeder Auftrag besteht aus  $n_k = 4$  sequentiell abzuarbeitenden Operationen. Die Operationen  $k = 1, \dots, 4$  sind der einen Maschine zugeordnet und besitzen die Bearbeitungsdauern  $dur(k)$  (Anzahl der Zeitintervalle zur Abarbeitung der Operation  $k$ ).

Ein Scheduling-Problem kann durch drei Eigenschaftsklassen beschrieben werden. Für das eingeführte Beispiel sieht die Beschreibung folgendermaßen aus.

**Maschineneigenschaft:** Es handelt sich um ein Flow-Shop-Problem (Fließfertigung) mit einer Maschine, da alle Aufträge dieselbe Reihenfolge besitzen, in denen die vier Operationen der einen Maschine zugeordnet sind.

**Auftragscharakteristik:** Für das Beispiel sind folgende Eigenschaften von Bedeutung:

- **Anzahl:** Die Anzahl der Aufträge ist fest vorgegeben:  $n_b = 5$ .
- **Unterbrechbarkeit:** Ein Auftrag kann unterbrochen werden. Eine Operation innerhalb eines Auftrages darf nicht unterbrochen werden.
- **Reihenfolgebeziehung:** Die Abarbeitung der Aufträge und Operationen unterliegt einer bestimmten Reihenfolge (sequentielle Abarbeitung).
- **Bearbeitungsdauern:** Die Bearbeitungsdauer jeder Operation ist festgelegt (1 h, 2 h, 1 h, 3 h), die eines Auftrages nicht.
- **Fertigstellungstermin:** Der Fertigstellungstermin für die fünf Aufträge beträgt 48 h.

**Zielsetzung:** Die Zielsetzung bei der Abarbeitung der Aufträge liegt in der Minimierung der Energiekosten.

Übliche Zielsetzungen bei Standard-Scheduling-Problemen sind durchlaufzeitbezogen, kapazitätsorientiert sowie terminorientiert. Beispiele sind Minimierung der Durchlaufzeit, Maximierung des Durchsatzes oder Maxi-

mierung der Kapazitätsauslastung. In dieser Publikation wird ein optimaler Produktionsablauf bezüglich der Energiekosten mit Haupt- (Produktion) und Nebenverbrauchern (Lüftung, Heizung) betrachtet.

Nach der Klassifikation folgt die mathematische Modellierung der Produktionsplanung. Sie besteht im Allgemeinen aus Reihenfolgebeschränkungen, Abschlussbedingungen und Zusatzbedingungen, welche für die Gültigkeit des Modells benötigt werden [6; 10].

Die Abarbeitung der Operationen ist rein sequentiell und muss in der richtigen Reihenfolge ausgeführt werden, d. h. die zweite Operation kann erst nach dem Ende der ersten beginnen und so weiter. Gleiches gilt für die Reihenfolge der Aufträge. Zur Lösung des Problems ist die Einführung der Binärvariable  $IP(b, k, i)$ , welche nur im Startintervall einer Operation Eins ist, notwendig. Mit Hilfe von (4) wird das Startintervall der ersten Operation des ersten Auftrages festgelegt.  $\sum_i IP(*, *, i) \cdot i$  ergibt die Nummer des Zeitintervalls, in dem Operation  $k$  für Auftrag  $b$  startet.

$$\sum_i IP(1, 1, i) \cdot i \geq 1 \quad (4)$$

Die nachfolgenden Operationen dürfen erst aktiv werden, wenn die jeweils vorhergehenden abgeschlossen sind (5).

$$\sum_i IP(b, k, i) \cdot i - \sum_i IP(b, k-1, i) \cdot i \geq dur(k-1) \quad (5)$$

$\forall b, k = 2, \dots, n_k$

Bevor ein neuer Auftrag abgearbeitet werden kann, muss die letzte Operation des vorherigen Auftrages abgearbeitet sein (6).

$$\sum_i IP(b, 1, i) \cdot i - \sum_i IP(b-1, n_k, i) \cdot i \geq dur(n_k) \quad (6)$$

$\forall b = 2, \dots, n_b$

Bei der Abarbeitung des letzten Auftrages muss die letzte Operation, ihrer Länge entsprechend, um diese Dauer vor Ende des Produktionszeitraumes beginnen (7).

$$n_i + 1 - \sum_i IP(n_b, n_k, i) \cdot i \geq dur(n_k) \quad (7)$$

Bei der Ermittlung des Energieverbrauchs (20), (21) ist die Verwendung der Variable  $IPP(b, k, i)$  (1) zweckmäßiger, da im Gegensatz zu  $IP(b, k, i)$  jedem aktiven Produktionsintervall der Wert Eins zugeordnet ist. Für die Berechnung der verbrauchten Energie im Bereich Produktion werden alle aktiven Produktionsintervalle benötigt. Die Ermittlung von  $IPP(b, k, i)$  erfolgt aus  $IP(b, k, i)$ :

$$IPP(b, k, i) = \sum_{\substack{i' = i - dur(k) + 1 \\ i' > 0}}^i IP(b, k, i') \quad \forall b, k, i. \quad (8)$$

### 3.4 Temperatur- und Luftwechselbeschränkung

Die Halleninnentemperatur soll in einem bestimmten Bereich liegen:

$$291,15 \text{ K} \leq T(i) \leq 308,15 \text{ K}. \quad (9)$$

Weiterhin wird ein durchschnittlicher Luftwechsel der Halle von mindestens ein Mal pro Stunde gefordert ( $n_{\text{soll}}/h = 1/h$ ). Diese Forderung kann durch die Ungleichung

$$\frac{n_{\text{soll}}}{h} \leq \frac{\sum_l \sum_i IL(l, i) \dot{V}_L(l)}{n_i V_R} \quad (10)$$

beschrieben werden, wobei  $\dot{V}_L(l)$  und  $V_R$  Volumenstrom der Lüftungen sowie Hallenvolumen sind.

### 3.5 Wärmebilanz

Um die Temperaturbeschränkung (9) einzuhalten, ist die Berechnung der Temperatur in jedem Zeitintervall notwendig. Hierfür wird die Wärmebilanz der Werkhalle aufgestellt. In die Bilanz gehen die Produktion, Heizung, Lüftung, Transmission und Strahlung ein. Die kontinuierliche Wärmebilanz lautet:

$$\rho_L V_R c_{p,L} \frac{dT(t)}{dt} = \quad (11)$$

$$\dot{Q}_P(t) + \dot{Q}_H(t) - \dot{Q}_L(t) - \dot{Q}_T(t) + \dot{Q}_S(t).$$

Aufgrund der diskreten Zeitformulierung erfolgt eine Diskretisierung der kontinuierlichen Wärmebilanz der Halle. Die diskrete Form von (11) lautet:

$$\rho_L V_R c_{p,L} \frac{T(i+1) - T(i)}{\Delta t} = \dot{Q}_P(i+1) + \quad (12)$$

$$\dot{Q}_H(i+1) - \dot{Q}_L(i+1) - \dot{Q}_T(i+1) + \dot{Q}_S(i+1).$$

Aus der Wärmebilanz (12) lässt sich für jedes Zeitintervall  $i$  die Halleninnentemperatur  $T(i)$  berechnen. Die Ansätze für die Wärmeeinträge (Leistungen) werden im Folgenden beschrieben.

#### Produktion:

$$\dot{Q}_P(i) = \sum_b \sum_k IPP(b, k, i) P_{th,P}(k) \quad (13)$$

$P_{th,P}(k)$  ist die thermische Leistung der jeweiligen Operation.

#### Heizung:

$$\dot{Q}_H(i) = IH(i) P_{th,H} \quad (14)$$

$P_{th,H}$  ist die thermische Leistung der Heizung.

#### Lüftung:

$$\dot{Q}_L(i) = \sum_l IL(l, i) \dot{V}_L(l) c_{p,L} \rho_L (T(i) - T_{ext}(i)) \quad (15)$$

Es sind  $c_{p,L}$  und  $\rho_L$  die Wärmekapazität und die Dichte der Luft. Im realen Fall wird bei der Lüftungsanlage

ein Wärmetauscher eingesetzt. Dadurch ist  $\dot{Q}_L(i)$  (15) nicht mehr von der Außentemperatur  $T_{ext}(i)$  abhängig und entspricht nun den Wärmetauscherverlusten. Für die Temperaturdifferenz  $T(i) - T_{ext}(i)$  wird 1 K angenommen. Aus (15) ergibt sich:

$$\dot{Q}_L(i) = \sum_l IL(l, i) \dot{V}_L(l) c_{p,L} \rho_L 1 \text{ K}. \quad (16)$$

#### Strahlung:

$$\dot{Q}_S(i) = \sum_j \sum_i I(j, i) A_{Gl}(j) f_s g_{Gl} \quad (17)$$

Bei der Ermittlung der Strahlungsgewinne werden nur Glasflächen betrachtet. Die Berechnung der Strahlungsgewinne basiert auf langfristigen Beobachtungen und Datenerhebungen, die bestimmte Annahmen erlauben. Ausschlaggebend für die ermittelten Werte ist neben den geografischen und klimatischen Faktoren die Ausrichtung  $j$  (Nord, Ost, Süd, West, horizontal), wodurch unterschiedliche Einstrahlungsmengen  $I(j, i)$  resultieren. Die Einstrahlungsmengen  $I(j, i)$  werden als temperaturunabhängig angenommen. Die Glasfläche  $A_{Gl}(j)$  ist ebenfalls eine Funktion der Ausrichtung  $j$ . Weiterhin sind  $g_{Gl}$  der wirksame Gesamtenergiedurchlassgrad von Glas und  $f_s$  der Strahlungskorrekturwert unverschattete Lage.

#### Transmission:

$$\dot{Q}_T(i) = \alpha_{Geb} A_R (T(i) - T_{ext}(i)) \quad (18)$$

Für die Außentemperatur  $T_{ext}(i)$  wird ein typischer Verlauf vorgegeben. Bei der Lösung des Beispielpblems (siehe Abschnitt 4) werden ein Sommer- und ein Winterszenario betrachtet.  $\alpha_{Geb}$  ist der Wärmedurchgangskoeffizient, wobei ein Durchschnittswert für das Gebäude angenommen wird, der sich auf die gesamte wärmeübertragende Gebäudefläche  $A_R$  bezieht.

#### Zielfunktion:

Die zu minimierende Zielfunktion ist die Summe der Energiekosten bestehend aus Arbeits- und Leistungspreisanteil:

$$J = E_{ges} AP + P_{\max} LP. \quad (19)$$

$AP$  ist der Arbeitspreis in €/kWh und  $LP$  der Leistungspreis in €/kW. Für die Berechnung der Zielfunktion (19) werden der Gesamtenergieverbrauch  $E_{ges}$  sowie die Maximalleistung  $P_{\max}$  benötigt:

$$E_{ges} = \sum_i P_{ges}(i) \Delta t, \quad (20)$$

$$P_{ges}(i) = \sum_b \sum_k IPP(b, k, i) P_{el,P}(k) + \sum_l IL(l, i) P_{el,L}(l) + IH(i) P_{el,H}, \quad (21)$$

$$P_{\max} = \max_i (P_{ges}(i)). \quad (22)$$



$P_{ges}(i)$  ist die Gesamtleistung für jedes Zeitintervall, die aus der Summe der Leistungen aller elektrischen Verbraucher (Produktion, Lüftung und Heizung) resultiert.

Insgesamt ergibt sich ein gemischt ganzzahliges lineares Optimierungsproblem (MILP). Gesucht werden die Zeitintervalle, in denen die Haupt- und Nebenverbraucher, welche durch die Binärvariablen  $IPP(b, k, i)$  (1),  $IH(i)$  (2), und  $IL(l, i)$  (3) beschrieben werden, eingeschaltet sind, damit sich minimale Energiekosten ergeben und die Zusatzbedingungen bezüglich Halleninnentemperatur und Belüftung erfüllt werden.

Das Modell kann auf andere Produktionsprozesse mit speziellen Produktionsabläufen, Zusatzbedingungen, Verbrauchern und räumlichen Gegebenheiten angepasst werden.

## 4 Optimierung

In diesem Abschnitt wird das Energie-Management-System anhand des Beispielprozesses demonstriert. Um eine optimale Lastverteilung bezüglich der in diesem Beitrag verfolgten Ziele zu ermitteln, wird das Optimierungsproblem aus Abschnitt 3 gelöst. Die Optimierung erfolgt mit Hilfe der Modellierungssprache GAMS [8] sowie dem integrierten Lösungsalgorithmus CPLEX [3]. Die verwendeten Prozessparameter sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Länge eines Zeitintervalls beträgt  $\Delta t = 1$  h. Der Produktionszeitraum wird somit in 48 Zeitintervalle eingeteilt ( $i = 1, \dots, 48$ ).

Für die Demonstration und den Test des Verfahrens werden ein Sommer- und ein Winterszenario untersucht. Das heißt, dass für die Außentemperatur eine der Jahreszeit entsprechende Tageskurve vorgegeben wird.

Zunächst wird das Sommerszenario betrachtet. Die Außentemperatur  $T_{ext}(i)$  liegt im Bereich zwischen  $12^\circ\text{C}$  und  $30^\circ\text{C}$ . Die Lösung des Beispielproblems ist in Bild 1 dargestellt. Es werden die Zeitintervalle markiert, in denen Haupt- und Nebenverbraucher eingeschaltet sind. Die Lösung garantiert die Einhaltung aller Beschränkungen und minimale Energiekosten.

In Bild 2 sind die Temperaturverläufe über dem Produktionszeitraum von 48 h dargestellt.

Die Arbeitsschritte sind so angeordnet, dass bei hohen Außentemperaturen keine Produktion stattfindet. Die Lüftung ist in Betrieb, wenn hohe Außentemperaturen vorhanden sind und wenn der lange wärmeintensive Produktionsschritt vier aktiv ist. Diese Maßnahmen ermöglichen, dass die Halleninnentemperatur unter der zulässigen Obergrenze bleibt. Die Heizung ist nie und die Lüftung nicht unnötig, nur so oft wie für den geforderten Luftwechsel notwendig, in Betrieb. Der Temperaturverlauf liegt daher mit durchschnittlich  $28,5^\circ\text{C}$  im oberen Bereich des zulässigen Intervalls. Um den geforderten Luftwechsel während des 48-stündigen Produktionszeitraumes zu garantieren, müssen zum Beispiel Lüftung eins 24 Zeitintervalle oder Lüftung zwei 12 Zeitintervalle aktiv sein.

Tabelle 1 Prozessparameter.

Parameter	Wert	Parameter	Wert
$\dot{V}_L(l)$	$(50.000 \ 100.000) \text{ m}^3/\text{h}$	$\rho_L$	$1,184 \text{ kg}/\text{m}^3$
$V_R$	$25.000 \text{ m}^3$	$I(j, \cdot)$	$(0,29 \ 0,4 \ 0,68 \ 0,4 \ 0,7) \text{ W}/\text{m}^2$
$A_R$	$8374 \text{ m}^2$	$A_{Gl}(j)$	$(580 \ 11 \ 580 \ 226 \ 495) \text{ m}^2$
$P_{th,p}(k)$	$(40 \ 75 \ 60 \ 75)$	$f_s$	0,9
$P_{th,H}$	66 kW	$g_{Gl}$	0,54
$\alpha_{Geb}$	$0,5 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$	$c_{p,L}$	$1,005 \text{ KJ}/\text{kg}/\text{K}$
$P_{el,p}(k)$	$(18 \ 16,5 \ 26 \ 5) \text{ kW}$	$P_{el,H}$	4,1 kW
$P_{el,L}(l)$	$(18 \ 36) \text{ kW}$	$AP$	$0,05 \text{ €/kWh}$
$LP$	$10 \text{ €/kW}$	$T(i = 1)$	$293,15 \text{ K}$

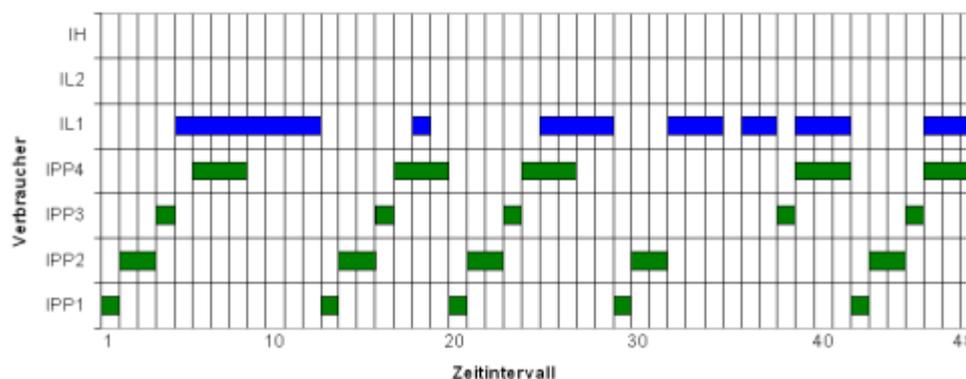


Bild 1 Gantt-Chart des Produktionsprozesses, Sommerszenario.

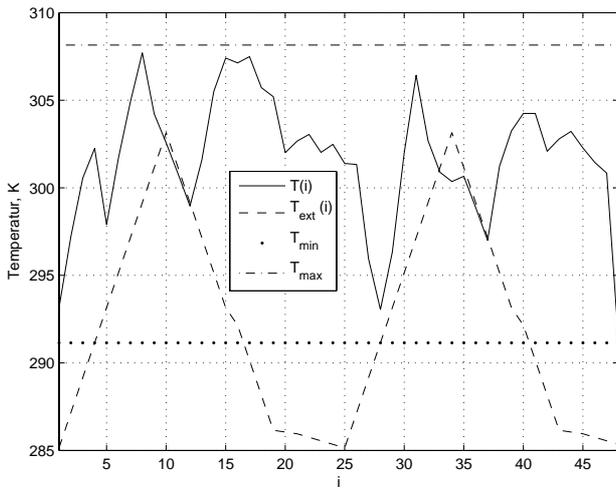


Bild 2 Temperaturverlauf, Sommerszenario.

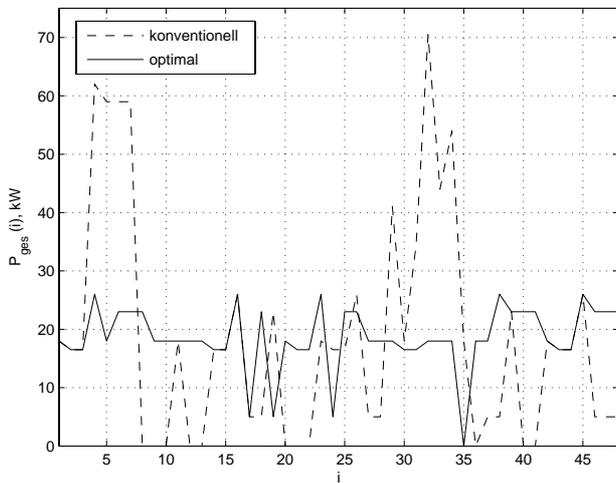


Bild 3 Leistungsverlauf, Sommerszenario.

In 48 h werden  $E_{ges} = 892 \text{ kWh}$  nach (20) bei einer maximalen Leistung  $P_{max} = 26 \text{ kW}$  nach (22) verbraucht. Aus (19) ergeben sich Energiekosten von 304,6 €.

Die ermittelten Ergebnisse werden mit einer konventionellen Lösung verglichen. Die zu minimierende Kostenfunktion ist hierbei nur der Gesamtenergieverbrauch  $J = E_{ges}$ . Die Maximalleistung, welche innerhalb

des Produktionszeitraumes auftritt, wird dabei nicht berücksichtigt. Der Produktionsablauf ist somit nicht optimal bezüglich der Energiekosten, aber optimal bezüglich der verbrauchten Energie.

In 48 h werden wiederum  $E_{ges} = 892 \text{ kWh}$  bei einer deutlich höheren maximalen Leistung  $P_{max} = 70,5 \text{ kW}$  verbraucht. Aus (19) ergeben sich Energiekosten von 749,6 €. Die enorme Kostenersparnis von 445 € kommt allein durch den höheren Leistungspreisanteil zu Stande. Die Kosten für verbrauchte Energie, welche den Arbeitspreisanteil bilden, sind in beiden Fällen identisch.

Abschließend werden die Leistungskurven der optimalen und der konventionellen Lösung des Sommerszenarios verglichen. Die Leistungsverläufe sind in Bild 3 zu finden. Im Gegensatz zur konventionellen Lösung treten bei der optimalen Lösung keine unerwünschten Lastspitzen auf. Diese entstehen unter anderem dadurch, dass beide Lüftungen gleichzeitig aktiv sind.

Es folgt die Auswertung des Winterszenarios. Die Außentemperatur  $T_{ext}(i)$  liegt im Bereich zwischen  $-3 \text{ °C}$  und  $2 \text{ °C}$ . Das Gantt-Chart des Produktionsprozesses ist in Bild 4 und die Temperaturverläufe sind in Bild 5 dargestellt.

Die Produktion der fünf Exemplare ist gleichmäßig verteilt, um die dabei auftretende Wärmeabgabe bei der hier betrachteten kalten Jahreszeit effektiv zu nutzen. Der Einsatz der Heizung ist in diesem Fall erforderlich. Sie ist fast immer aktiv und kann nur dann ausgeschaltet werden, wenn die wärmeintensiven Produktionsschritte zwei und vier aktiv sind. Die Lüftungsaktivitäten beschränken sich auf den Mindestluftwechsel. Die Lüftung ist hauptsächlich in Intervallen eingeschaltet, in denen keine Produktion stattfindet. Findet eine Überschneidung von Lüftung und Produktion statt, dann nur mit dem wärmeintensiven Produktionsschritt vier, damit die kühlende Wirkung der Lüftung auf die Halleninnentemperatur gering gehalten wird. Sie liegt mit durchschnittlich  $20,5 \text{ °C}$  an der unteren Grenze.

Während des Winterszenarios werden in 48 h  $E_{ges} = 1027,3 \text{ kWh}$  bei einer maximalen Leistung  $P_{max} = 30,1 \text{ kW}$  verbraucht. Aus (19) ergeben sich Kosten von 352,36 €.

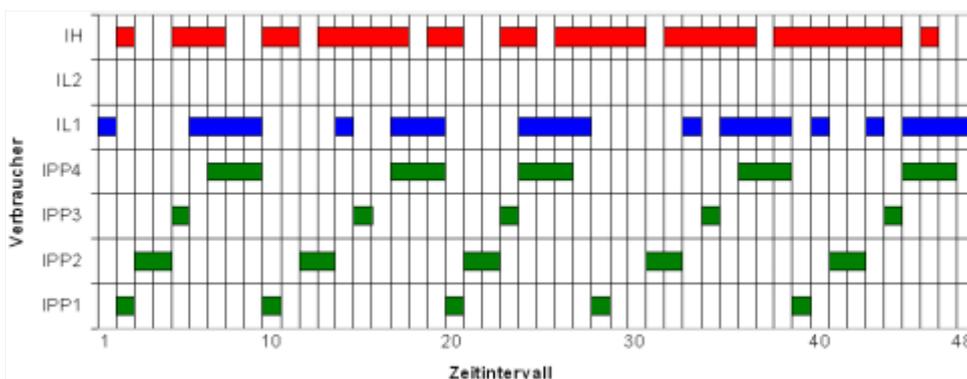
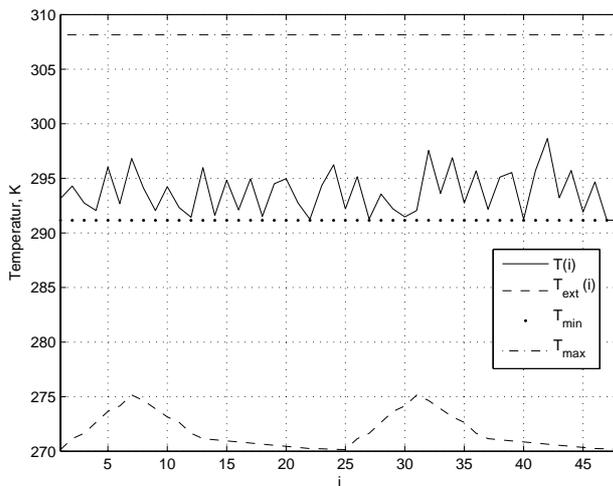


Bild 4 Gantt-Chart des Produktionsprozesses, Winterszenario.



**Bild 5** Temperaturverlauf, Winterszenario.

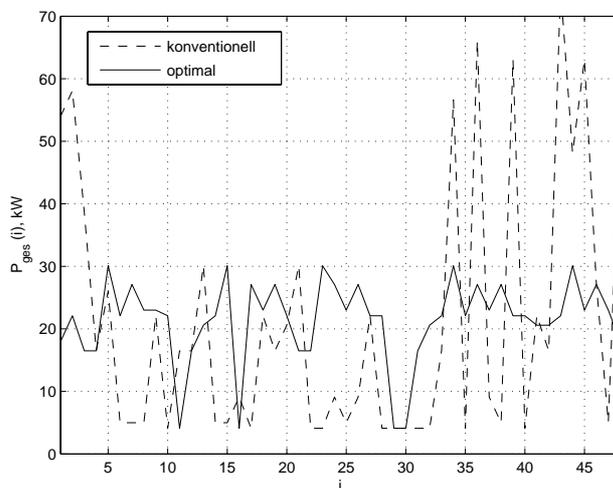
Die ermittelten Ergebnisse werden wiederum mit einer konventionellen Lösung ( $J = E_{ges}$ ) verglichen.

In 48 h werden  $E_{ges} = 1019,1$  kWh bei einer maximalen Leistung  $P_{max} = 74,6$  kW verbraucht. Aus (19) werden Kosten von 796,95 € errechnet. Es ergibt sich eine Einsparung von 444,59 €.

In Bild 6 ist der Vergleich der Leistungskurven der optimalen und konventionellen Lösung des Winterszenarios zu finden. Er ist wiederum dadurch gekennzeichnet, dass bei der optimalen Lösung keine unnötigen Lastspitzen auftreten.

Anhand der Optimierungsergebnisse der beiden Szenarien können die folgenden zwei Aussagen verdeutlicht werden.

- Durch ‚geschickte‘ Wahl der Ein/Ausschaltzeiten aller Verbraucher (Produktion, Heizung, Lüftung), was die Vermeidung unnötigen Aktivierens der Nebenverbraucher (Heizung, Lüftung) einschließt, kann der Energieverbrauch und somit der Arbeitspreisanteil minimiert werden.



**Bild 6** Leistungsverlauf, Winterszenario.

- Durch zusätzliches ‚geschicktes‘ Verteilen der aktiven Betriebsintervalle aller Verbraucher (dynamische Lastverteilung) können unnötige Lastspitzen vermieden und dadurch die Gesamtenergiekosten, bestehend aus Arbeits- und Leistungspreisanteil, minimiert werden.

## 5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird ein Energie-Management-System für einen Produktionsbetrieb vorgestellt. Dabei werden die Energiekosten durch eine dynamische Lastverteilung minimiert. Dazu ist die mathematische Modellierung des Produktionsprozesses notwendig. Anhand einer Optimierung wird ermittelt, zu welchen Zeitpunkten Haupt- und Nebenverbraucher aktiv sind, um minimale Energiekosten zu erzielen.

Es ergibt sich ein neues Scheduling-Problem, welches die Zielsetzung Minimierung der Energiekosten unter Einhaltung zusätzlicher Pfadbeschränkungen verfolgt.

Die vorgeschlagene Strategie wird an einem Beispiel demonstriert. Durch ‚geschickte‘ Inbetriebnahme der Verbraucher lässt sich der Energieverbrauch verringern und unnötige Lastspitzen vermeiden. Beides führt zur Minimierung der Energiekosten. Aufgrund der positiven Ergebnisse wird deutlich, dass das vorgeschlagene Energie-Management-System eine effektive Strategie zur Senkung des Energieverbrauchs und der Energiekosten ist, ohne dabei die Produktion negativ zu beeinflussen.

Erstes Ziel weiterer Arbeiten ist die Betrachtung des vollständigen Prozesses. Somit kann dem Betreiber ein Werkzeug an die Hand gegeben werden, um Energiekosten einzusparen. Zusätzlich sollen aktuelle Messinformationen, wie zum Beispiel die Außentemperatur oder die Sonneneinstrahlung in Kombination mit dem aufgestellten mathematischen Modell zur Re-Optimierung genutzt werden. Dies ermöglicht die Prädiktion von Lastanforderungen.

## Literatur

- [1] S. Ashok, R. Banerjee, *An Optimization Mode for Industrial Load Management*. In: IEEE Transactions on Power Systems 16 (2001), S. 879–884.
- [2] J. Böhm, *Entwicklung eines Energiemanagement-Systems für den Produktionsablauf der Firma ENERCON in Magdeburg/Rothensee*. Dipl.-Arb., Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg 2008.
- [3] GAMS – *The Solver Manuals*. GAMS Development Corporation Washington 2008.
- [4] R. L. Graham, E. L. Lawler, J. K. Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan, *Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: A survey*. In: Annals of Discrete Mathematics 5 (1979), S. 287–326.
- [5] M. G. Ierapetritou, D. Wu, J. Vin, P. Sweeney, M. Chigirinsky, *Cost Minimization in an Energy Intensive Plant Using Mathematical Programming Approaches*. In: Ind. Eng. Chem. Res. 41 (2002) Nr. 21, S. 5262–5277.
- [6] T. Latz, *Entscheidungsmodelle der Ablaufplanung*. Deutscher Universitäts-Verlag Wiesbaden 1997.
- [7] K. Marik, Z. Schindler, P. Stluka, *Decision support tools for advanced energy management*. In: Energy 33 (2008), S. 858–873.
- [8] R. Rosenthal, *GAMS – A User's Guide*. GAMS Development Corporation Washington 2008.

- [9] H. K. Sarimveis, A. S. Angelou, T. R. Retsina, S. R. Rutherford, G. V. Bafas, *Optimal energy management in pulp and paper mills*. In: *Energy Conversion and Management* 44 (2003). S. 1707–1718.
- [10] P. Schoner, *Operative Produktionsplanung in der verfahrenstechnischen Industrie*. Kassel University Press 2008.
- [11] S. Sommer, J. Böhm, A. Kienle, *Energie-Management-System für einen Produktionsbetrieb*. – Tagungsband EKA 2008 Magdeburg, S. 109–120.

Manuskripteingang: 23. Februar 2009



**Dr.-Ing. Steffen Sommer** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungstechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Hauptarbeitsgebiete: Regelung von Reaktivdestillationskolonnen, Energie-Management.

Adresse: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Uni-Platz 2, 39106 Magdeburg,  
E-Mail: steffen.sommer@ovgu.de



**Dipl.-Ing. Jens Böhm** ist Betriebsingenieur im Bereich Energie-Management der Rothenseer Generatorenfertigung GmbH, Magdeburg.

Adresse: Rothenseer Generatorenfertigung GmbH, August-Bebel-Damm 24–30, 39126 Magdeburg,  
E-Mail: jens.boehm@enercon.de



**Prof. Dr.-Ing. Achim Kienle** ist Leiter des Lehrstuhls Automatisierungstechnik/Modellbildung am Institut für Automatisierungstechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und Fachgruppenleiter am Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme. Hauptarbeitsgebiete: Modellierung und Regelung chemischer und biologischer Systeme, Energie-Management.

Adresse: siehe oben,  
E-Mail: achim.kienle@ovgu.de

## Vorschau auf Heft 12/2009

Unsere nächste Ausgabe ist ein Schwerpunktheft zum Thema: „Automation in der Wasser- und Abwasserbranche“ und enthält insbesondere folgende Beiträge:

- *B. Scharaw, S. Röhl, T. Westerhoff, S. Hopfgarten, P. Li*: Simulation und Optimierung eines Trinkwasserversorgungssystems im Rahmen eines IWRM
- *A. Meßmer, M. Papageorgiou*: Ein generischer Regelungsansatz auf der Basis nichtlinearer Optimierung für komplexe Prozesse – Anwendungsbeispiel Verbundsteuerung in Mischwasserkanalnetzen
- *J. Alex, U. Jumar*: Benchmark-Modell für anlagenweite Kläranlagenregelungen

Weitere Informationen über geplante Hefte, ausführliche Informationen über die in den letzten Heften der **at** erschienenen Beiträge sowie Hinweise für Autoren finden Sie im Internet unter <http://www.at-automatisierungstechnik.de>.