

Integration zeitvariabler Energiekosten in die Belastungsorientierte Auftragsfreigabe

Integration of time variable energy costs in the Load-Oriented Order Release

Stefan Willeke
Sören Wesebaum
Georg Ullmann

IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH

In dem vorliegenden Beitrag wird ein Ansatz zur Integration von Energiekosten in bestehende Fertigungssteuerungsverfahren vorgestellt. Das entwickelte Verfahren basiert auf dem Ansatz der Belastungsorientierten Auftragsfreigabe (BOA) und berücksichtigt schwankende Strompreise aufgrund der zunehmenden Einspeisung regenerativer Energien in das Stromnetz. Die Weiterentwicklung ermöglicht besonders kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) die Einsparung von Energiekosten durch organisatorische Maßnahmen der Fertigungssteuerung ohne kapitalintensive Investitionen.

[Schlüsselwörter: Fertigungssteuerung, Energiekosten, Belastungsorientierte Auftragsfreigabe, Werkstattfertigung]

In this paper an approach for the integration of energy costs in manufacturing control algorithms is presented. The developed method is based on the Load-Oriented Order Release (LOOR) and considers fluctuating electricity prices due to the increasing supply of renewable energy in the power grid. The development allows particularly small and medium-sized enterprises (SME) to save energy costs by organizational methods of manufacturing control without capital-intensive investments.

[Keywords: manufacturing control, energy costs, Load-Oriented Order Release, job shop production]

Die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie wird in den kommenden Jahren durch die weiter steigenden Beschaffungskosten für Strom beeinflusst werden. Seit dem Jahr 2000 hat sich der Strompreis für die Industrie um den Faktor 2,5 erhöht. Dies ist vor allem eine Folge des Anstiegs an Steuern und Abgaben. Während im Jahre 2000 Steuern und Abgaben 5,5 Prozent der Erzeugungskosten einnahmen, ist dieser Anteil bis 2014 auf 44 Prozent gestiegen [BDE14].

Gleichzeitig nimmt die Volatilität der Strompreise sowohl im Tages- als auch im Jahresverlauf durch die zunehmende Integration erneuerbarer Energien, wie Wind- oder Solarstrom, stark zu [Kal12]. Die schwankenden Preise sind

eine Folge der unsicheren Erzeugungsleistung und der Wahrung der Netzstabilität durch einen Ausgleich von Angebot und Nachfrage. Aus diesem Grund hat die Forderung nach zeitvariablen, dynamischen Energiepreisen zur Nachfragesteuerung bereits Einzug in eine EU-Richtlinie [EnE12] und das Energiewirtschaftsgesetz [EnW14] gefunden. Unter Berücksichtigung dieser beiden Sachverhalte stellt die Fertigungssteuerung als Bestandteil der Produktionsplanung- und -steuerung (PPS) einen Ansatzpunkt zur Senkung der Energiekosten dar [Wil14].

1 GRUNDLAGEN DER FERTIGUNGSSTEUERUNG

Die Fertigungssteuerung ist Bestandteil der PPS, welche über einen Fertigungsplan festlegt, wann ein Auftrag auf einer bestimmten Maschine bearbeitet wird. Da eine vollständige Realisierung des Fertigungsplans aufgrund häufig unvermeidlicher Störungen nahezu unmöglich ist, besteht die Aufgabe der Fertigungssteuerung in der Durchsetzung der Vorgaben aus der Produktionsplanung. Sie hat somit einen hohen Einfluss auf die logistischen Zielgrößen Bestand, Durchlaufzeit, Auslastung und Termintreue [Wie97].

Die vier Aufgaben der Fertigungssteuerung lassen sich im Fertigungssteuerungsmodell von LÖDDING [Löd08] nachvollziehen (Abbildung 1). Die *Auftragserzeugung* generiert aus dem Fertigungsprogramm bzw. zusätzlichen Kunden- oder Lageraufträgen Fertigungsaufträge und legt die Plan-Werte für den Zugang, Abgang und die Reihenfolge dieser fest. Sie ist somit der Produktionsplanung zuzuordnen und wird daher im Weiteren nicht betrachtet. Den Zeitpunkt, an dem die Fertigung den Auftrag bearbeiten darf, wird durch die *Auftragsfreigabe*, häufig auch Verfügbarkeitsprüfung genannt [Wie14], festgelegt. Meist ist mit der Freigabe eine Bereitstellung des benötigten Materials verbunden. Die Auftragsfreigabe legt den Ist-Zugang des Auftrages in der Produktion fest. Die *Reihenfolgebildung* bestimmt, welcher Auftrag in der Warteschlange vor einem Arbeitssystem als nächstes bearbeitet wird. Anhand unterschiedlicher Kriterien wird eine Priorität des Auftrages determiniert. Die *Kapazitäts-*

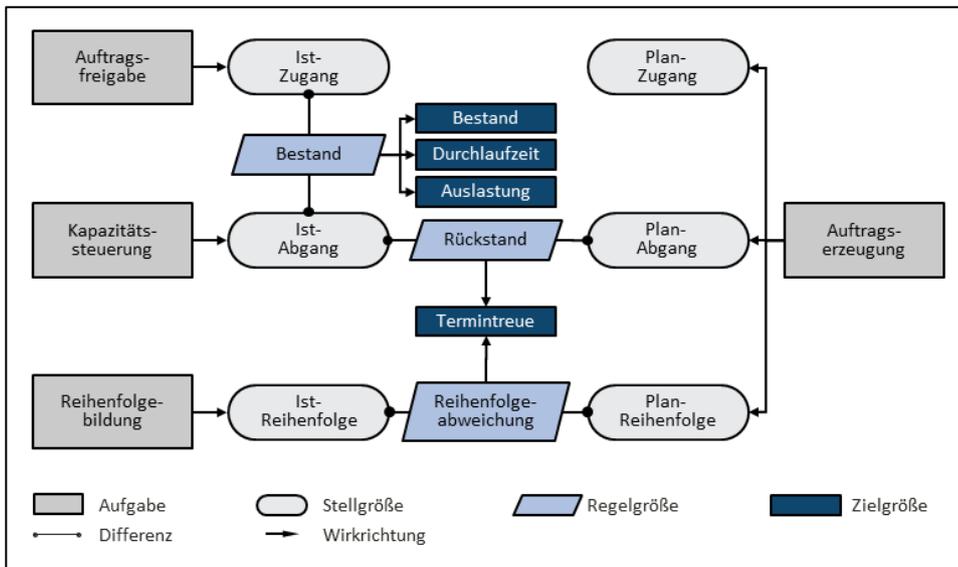


Abbildung 1. Modell der Fertigungssteuerung [Löd08]

steuerung bestimmt kurzfristig über den tatsächlichen Einsatz der Kapazitäten. Während die Kapazitätsplanung diese weit im Voraus plant, entscheidet die Kapazitätssteuerung in Abhängigkeit möglicher Rückstände konkret über Überstunden oder Arbeitszeitverkürzungen.

Das Modell von LÖDDING [Löd08] bildet weiterhin qualitative Wirkzusammenhänge zwischen den Aufgaben, Stellgrößen, Regelgrößen und den logistischen Zielgrößen ab. Die vier Aufgaben der Fertigungssteuerung beeinflussen sechs Stellgrößen. Aus der Differenz von zwei Stellgrößen ergibt sich eine Regelgröße. So ist die Differenz aus Ist-Zugang und Ist-Abgang der Bestand. Diese Regelgröße beeinflusst wiederum direkt die logistischen Zielgrößen [Löd08]. Beispielsweise hat ein hoher Bestand eine hohe Durchlaufzeit und gleichzeitig eine hohe Auslastung zur Folge. Eine vollständige Erreichung aller logistischen Zielgrößen ist jedoch nicht realistisch. Jedes Unternehmen muss sich in diesem aufgespannten Zustandsraum individuell positionieren.

Da der Energieverbrauch eines Arbeitssystems von einem Auftrag abhängen kann, ist durch die Fertigungssteuerung eine indirekte Beeinflussung des Energiebedarfs möglich, da die Fertigungssteuerung festlegt, wann welcher Auftrag bearbeitet wird und damit auch wann welcher Energieverbrauch anfällt. Sie bestimmt dadurch mittelbar das Energielastprofil eines Arbeitssystems. Wie

eigene Datenaufnahmen ergeben haben, nimmt bei einem Ofen zur Erwärmung von Schmiedeteilen bei einer Erhöhung des zu erwärmenden Bauteilgewichtes um 100 Prozent die mittlere elektrische Leistung um 30 Prozent zu. Da die Fertigungssteuerung beeinflusst, wann das leichtere und wann das schwere Bauteil bearbeitet bzw. erwärmt wird, kann das leichtere Bauteil durch eine angepasste Steuerung zu Zeiten hoher Strompreise bearbeitet werden. Das schwere Bauteil wird dementsprechend zu Zeiten niedriger Energiekosten bearbeitet. Somit wird eine Senkung der Energiekosten herbeigeführt.

Dieser Ansatz eröffnet ein neues Gestaltungsfeld, welches im energiekostenorientierten Regelkreismodell (vgl. Abbildung 2) dargestellt ist. So wird im Regelkreismodell eine Abweichung der durch die Produktionsplanung vorgegebenen Plan-Energiekosten und der geplanten logistischen Zielgrößen (Bestand, Durchlaufzeit, Auslastung, Termintreue) durch eine Energiekostenfunktion (Abschnitt 4), welche ein Bestandteil der weiterentwickelten Fertigungssteuerungsverfahren ist, sowie einer Betriebsdatenerfassung (BDE) erkannt. Eine Abweichung ist dabei durch Störungen des Arbeitsauftrages oder des Arbeitssystems möglich. Als Regler leitet die Fertigungssteuerung nun Maßnahmen ein (Änderung der Auftragsfreigabe und -reihenfolge, Veränderung der Kapazität). Über die Fertigungssteuerungsverfahren mit ihren Verfahrensparametern sowie den resultierenden Stellgrößen wird das Stellglied (Arbeitsauftrag) beeinflusst, welches wiederum auf die Regelstrecke (Arbeitssystem), an der haupt-

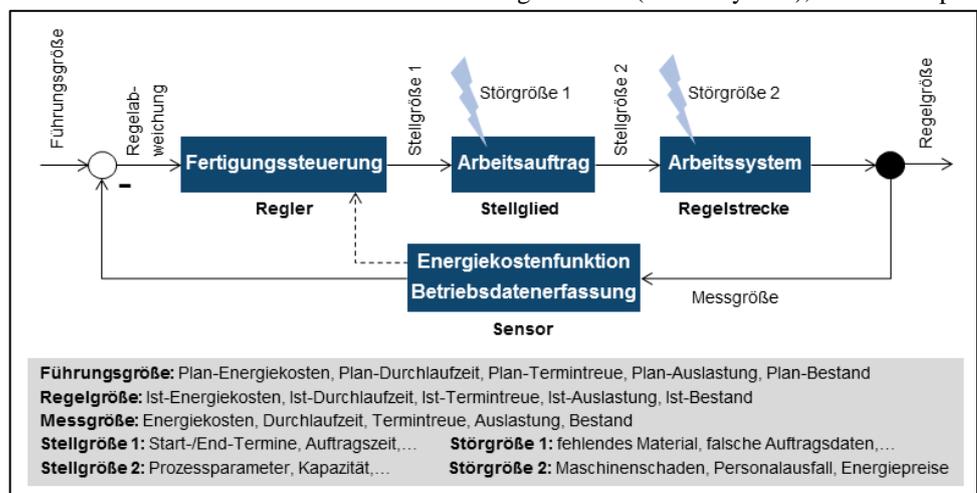


Abbildung 2. Energiekostenorientiertes Regelkreismodell der Fertigungssteuerung

sächlich die Energiekosten anfallen, wirkt. So ist ein Abgleich von Soll- und Ist-Zielgrößen, speziell der Energiekosten möglich, wobei durch unerwartet niedrige Energiepreise auch geringere Energiekosten als geplant denkbar sind.

2 DIE BELASTUNGSORIENTIERTE AUFTRAGSFREIGABE

Aufgrund der hohen Arbeitsintensität und der geringen Arbeitsteilung ist die Produktion von KMU häufig nach dem Werkstattprinzip organisiert, woraus sich eine hohe Materialflusskomplexität ergibt. Dies ist häufig bei dieser Einzel- und Kleinserienfertigung der Fall, welche von einer großen Streuung bei der Anzahl an Arbeitsgängen und Auftragszeiten gekennzeichnet ist [Wie14]. Durch die Deckung individualisierter Nachfragen in einem schmalen Marktsegment stellen KMU zudem meist Einzel- oder Kleinserien mit einer hohen Variantenanzahl her [Pfo06]. Unter diesen Anwendungsvoraussetzungen findet die belastungsorientierte Auftragsfreigabe, welche 1980 von BECHTE [Bec80] erstmals vorgestellt wurde, trotz vieler akademischer Debatten in der industriellen Praxis einen weiten Einsatz. Das Verfahren, welches die logistische Prozessbeherrschung durch die direkte Regelung von Beständen fokussiert [Wie14], lässt sich in 3 Schritte aufteilen, welche im Weiteren näher ausgeführt werden:

- Rückwärtsterminierung aller Aufträge und Ermittlung der Dringlichkeit
- Abwertung der Buchungsauftragszeit und Zuordnung zu Bestandskonten
- Freigabe der Aufträge

Über eine *Rückwärtsterminierung* werden alle Aufträge ermittelt, die noch nicht freigegeben wurden und deren Plan-Starttermin innerhalb eines festgelegten Vorgriffshorizontes liegt (Dringlichkeitsprüfung). Als Ergebnis entsteht eine Liste dringlicher und nicht dringlicher Aufträge, wobei im Folgenden nur die dringlichen Aufträge betrachtet werden [Wie14].

Bei der BOA wird jedem Arbeitssystem ein Bestandskonto zugeordnet, welches mit der *Buchungsauftragszeit* (abgezinsten Plan-Auftragszeit angegeben in Stunden) von Aufträgen belastet wird. Dabei wird unterschieden, ob sich ein Auftrag im Direktbestand oder im Indirektbestand eines Arbeitssystems befindet. Aufträge, welche im Direktbestand des Arbeitssystems sind, werden mit der vollen Auftragszeit in das Bestandskonto eingebucht. Bestandskonten von Arbeitssystemen, welche Aufträge im Indirektbestand haben, sich also noch an vorhergehenden Arbeitssystemen befinden, werden mit einer abgezinsten Buchungsauftragszeit belastet. Dabei erfolgt die Abzinsung über einen Abzinsungsfaktor. Der Faktor beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Auftrag in der ersten Planperiode am nachfolgenden Arbeitssystem zur Verfügung steht [Wie97]. Er stellt dar, welcher prozentuale Anteil der Auftragszeit in das Bestandskonto des nachfol-

genden Arbeitssystems verbucht wird. Somit wird das Bestandskonto im Mittel richtig belastet. Die Buchungsauftragszeit $ZAU_{BK,n,m}$ [h] eines Auftrages n am betrachteten Arbeitssystem m lässt sich nun wie folgt berechnen [Löd08]:

$$ZAU_{BK,n,m} = \begin{cases} ZAU_{n,m} & \text{für } AktAS = m \\ ZAU_{n,m} \cdot \prod_{i=AktAS}^{m-1} \frac{ABFA_i}{100} & \text{für } AktAS \leq m \end{cases} \quad (1)$$

Dabei entspricht $ZAU_{n,m}$ [h] der Auftragszeit von Auftrag n an Arbeitssystem m und $ABFA_i$ dem Abzinsungsfaktor von Arbeitssystem i . $AktAS$ [-] ist der Index des aktuellen Arbeitssystems.

Die nach Plan-Starttermin sortierten Aufträge in der Liste dringlicher Aufträge werden nun in die Bestandskonten der Arbeitssysteme *eingebucht*. Eine Freigabe erfolgt jedoch nur für die Aufträge, bei denen die definierte Bestandsgrenze der belasteten Arbeitssysteme durch die Summe aller Buchungsauftragszeiten nicht überschritten ist. Ist eine Bestandsgrenze überschritten, wird das Arbeitssystem bis zum nächsten Planungszeitpunkt für weitere Freigaben gesperrt [Wie97].

Besonderer Bedeutung kommt der Berechnung der drei wichtigsten Verfahrensparameter Vorgriffshorizont, Abzinsungsfaktor und Bestandsgrenze bei. Die Berechnung dieser Parameter ergibt sich aus der logistischen Positionierung, welche von vielen Faktoren abhängig ist [Nyh12]. Sie wird in diesem Beitrag nicht weiter betrachtet.

Zur Anwendung der BOA müssen Aufträge mit realistischen Endterminen sowie Arbeitspläne mit Vorgabezeiten vorliegen. Gleichzeitig ist eine Verfügbarkeit an Material und Betriebsmitteln sicherzustellen. Zur richtigen Berechnung der Belastung der Bestandskonten müssen zudem die Kapazitäten der nächsten Planungsperiode sowie exakte Arbeitsrückmeldungen bekannt sein [Wie14].

3 ANSATZ EINER ENERGIEKOSTEN- UND BELASTUNGSORIENTIERTEN AUFTRAGSFREIGABE

Um schwankende Energiepreise in der Fertigungssteuerung berücksichtigen zu können, wurde die Energiekosten- und belastungsorientierte Auftragsfreigabe (eBOA) entwickelt. Um den Kerngedanken der Bestandsregelung der BOA nicht zu verändern, wurden die drei Verfahrensschritte Rückwärtsterminierung, Abwertung und Freigabe beibehalten und nur leicht verändert.

Wie auch bei der BOA werden über eine *Rückwärtsterminierung* (Schritt 1 in Abbildung 3) alle Aufträge ermittelt deren Plan-Starttermin innerhalb des Vorgriffshorizontes liegt.

Für die dringlichen Aufträge wird nun eine *Termingrenze* geprüft, um auch Aufträge mit hohen Energiekosten freigeben zu können (Schritt 2a). Die Termingrenze kann

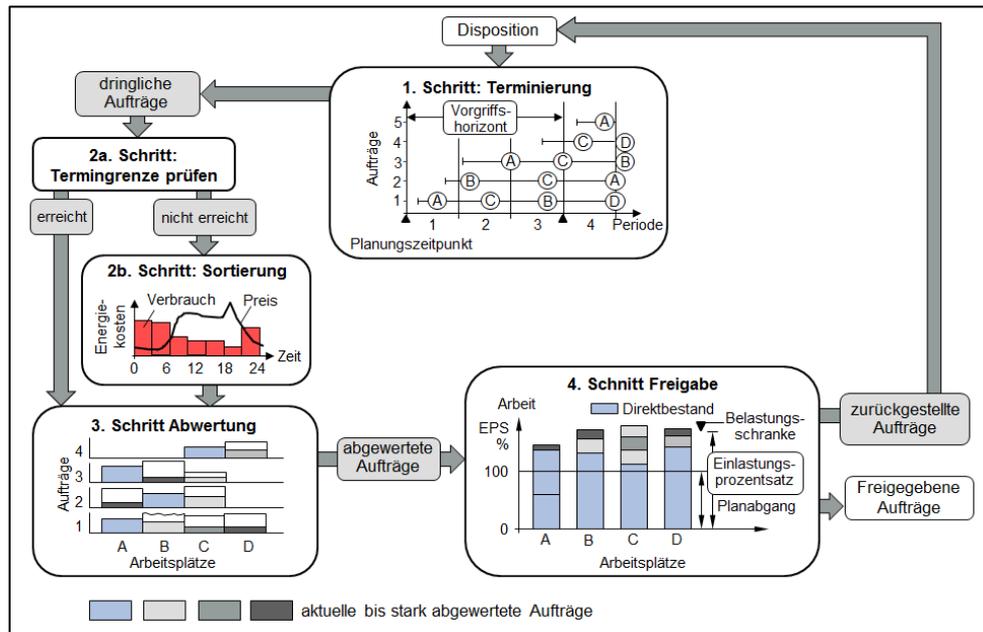


Abbildung 3. Verfahrensschritte der eBOA (in Anlehnung an [Bechte, IFA])

beispielsweise der späteste Plan-Starttermin sein. Ist die Termingrenze erreicht, wird dem Auftrag die Priorität eins zugeordnet, ansonsten die Priorität zwei. Zeitgleich erfolgt eine Aktualisierung aller Bestandskonten unter Berücksichtigung des aktuellen Arbeitsfortschritts. Die Termingrenze wird benötigt um auch Aufträge mit hohen Energiekosten freizugeben.

Die *dringlichen Aufträge der Priorität eins* werden nun ohne Berücksichtigung der möglichen Überschreitung der Bestandsgrenze mit den teilweise abgezinsten Buchungsauftragszeiten in die Bestandskonten aller belasteten Arbeitssysteme eingebucht (Schritt 3) und damit freigegeben (Schritt 4). Dabei wird mit den Aufträgen der höchsten Dringlichkeit (beispielsweise Rückstand gegenüber SPS) begonnen.

Für die *dringlichen Aufträge der Priorität zwei* werden über die unter Abschnitt 4 vorgestellte Energiekostenfunktion die spezifischen Energiekosten je Auftrag berechnet (Schritt 2b), wobei zur Berechnung der Energiekosten nur die ersten 3 auftragspezifischen Arbeitssysteme betrachtet werden. Im Folgenden werden die Aufträge mit den geringsten spezifischen Energiekosten zuerst eingebucht. Es wird zeitgleich überprüft, ob bei allen belasteten Arbeitssystemen die Bestandsgrenze unterschritten ist. Ist dies der Fall werden die Buchungsauftragszeiten über die Abzinsungsfaktoren analog zur BOA berechnet, die Aufträge eingebucht (Schritt 3) und freigegeben (Schritt 4).

Unter Berücksichtigung der nun veränderten Buchungsauftragszeiten in den Bestandskonten und damit späteren möglichen Startzeitpunkten werden erneut die spezifischen Energiekosten berechnet und der Auftrag mit den geringsten spezifischen Energiekosten auf eine Einbuchung überprüft. Der Freigabezyklus endet, wenn kein Auftrag mehr eingebucht werden kann, da die Bestands-

grenzen aller relevanten Arbeitssysteme überschritten sind.

Besondere Anwendungsvoraussetzungen der eBOA gegenüber der BOA ist die Kenntnis der benötigten durchschnittlichen elektrischen Leistung je Auftrag und Arbeitssystem. Diese ist anhand von Messgeräten zur Leistungsaufnahme festzustellen. Des Weiteren eignet sich die eBOA nur bei relativ stabilen Produktionsprozessen und kurzen Durchführungszeiten je Arbeitssystem. Durchführungszeiten je Arbeitssystem, welche sich über mehrere Tage erstrecken, werden dem volatilen Preis, welcher im Tagesverlauf stark schwanken kann, nicht gerecht.

Bei häufigen Störungen oder Prozessfehlern wie Reihenfolgevertauschungen kann die durch die Freigabe erzeugte Auftragsreihenfolge in Verbindung mit den schwankenden Energiepreisen negative Auswirkungen auf die Energiekosten und die logistischen Zielgrößen haben. Daher ist über eine Kombination mit der FIFO (First-In-First-Out)-Reihenfolgeregel die Einhaltung der durch die eBOA erzeugten Reihenfolge sicherzustellen. Zudem haben Untersuchungen der BOA ergeben, dass die FIFO-Reihenfolgeregel die geringsten Durchlaufzeitstreuungen im Vergleich zu anderen Reihenfolgeverfahren verursacht [Wie87].

4 DIE ENERGIEKOSTENFUNKTION DER ENERGIEKOSTEN- UND BELASTUNGSORIENTIERTEN AUFTRAGSFREIGABE

Kerngedanke der eBOA ist die Freigabe in Abhängigkeit der Sortierung nach spezifischen Energiekosten. Diese Sortierung erfolgt bei der ursprünglichen BOA nach Plan-Starttermin.

Für die Energiekosten- und Belastungsorientierte Auftragsfreigabe wird aus der Menge aller zur Freigabe möglichen Aufträge $\tilde{\mathcal{N}} = \{\tilde{n} | \tilde{n} \in \mathbb{N} \wedge 1 \leq \tilde{n} \leq \tilde{N}\}$ der Auftrag $a \in \tilde{\mathcal{N}}$ aus \tilde{N} Aufträgen ausgewählt, der minimale spezifische Energiekosten K_{sa} , aufweist. Die spezifischen Energiekosten $K_{s\tilde{n}} = K_{\tilde{n}} / ZDF_{\tilde{n}}$ [ct/h] stellen die absoluten Energiekosten $K_{\tilde{n}}$, normiert auf die Durchführungszeit des Auftrages $ZDF_{\tilde{n}}$ für einen zur Freigabe möglichen Auftrag $\tilde{n} \in \tilde{\mathcal{N}}$ dar und sind in der Menge aller möglichen spezifischen Energiekosten \mathcal{K} enthalten.

$$K_{sa} = \frac{K_a}{ZDF_a} = \min(\mathcal{K})$$

$$\forall \tilde{n} \in \tilde{\mathcal{N}} : \frac{K_a}{ZDF_a} = K_{sa} \leq K_{s\tilde{n}} = \frac{K_{\tilde{n}}}{ZDF_{\tilde{n}}} \quad (2)$$

Die Energiekosten eines Auftrages $K_{\tilde{n}}$ [ct] ergeben sich dabei allgemein aus dem Integral über die zeit- und auftragsabhängige Kosten, die sich aus der Multiplikation der auftragsabhängigen elektrischen Leistungsaufnahme $p_{\tilde{n}}(t)$ [W] und der zeitabhängigen Energiepreisfunktion $k(t)$ [ct/kWh] zusammensetzt. Letzteres stellt die aktuellen Energiepreise zu einem Zeitpunkt t dar. Die Zeit t ergibt sich dabei aus der seit Beobachtungsbeginn vergangenen Zeit, wobei Pausenzeiten nicht betrachtet werden. Beispielsweise beginnt die Schicht jeden Tag um 8 Uhr und endet um 18 Uhr. Dann entspricht 10 Uhr am ersten Tag $t=2$ h und 10 Uhr am zweiten Tag $t=12$ h.

$$K_{\tilde{n}} = \int_{-\infty}^{\infty} p_{\tilde{n}}(t) \cdot k(t) dt \quad (3)$$

Die auftragsabhängige elektrische Leistung $p_{\tilde{n}}(t)$ ist weiterhin stückweise ungleich null und entspricht in diesen Intervallen der benötigten elektrischen Leistung des Auftrages \tilde{n} am Arbeitssystem m , $p_{\tilde{n},m}(t)$, wobei die Menge $\mathcal{M} = \{m | m \in \mathbb{N} \wedge 1 \leq m \leq M\}$ die Menge aller M Arbeitssysteme umfasst:

$$K_{\tilde{n}} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \int_{-\infty}^{\infty} p_{\tilde{n},m}(t) \cdot k(t) dt \quad (4)$$

Die benötigte elektrische Leistung des Arbeitssystems m für einen Auftrag \tilde{n} $p_{\tilde{n},m}(t)$ ist immer null, mit Ausnahme der Zeit, in welcher Auftrag \tilde{n} am Arbeitssystem m bearbeitet wird. Dadurch müssen lediglich die einzelnen Integrale im Zeitintervall $T_{start,\tilde{n},m} \leq t \leq T_{ende,\tilde{n},m}$ betrachtet werden. Dabei entspricht $T_{start,\tilde{n},m}$ [h] dem Bearbeitungsbeginn und $T_{ende,\tilde{n},m}$ [h] dem Bearbeitungsende des Auftrages \tilde{n} am Arbeitssystem m . Die Länge des Intervalls stimmt dabei genau mit der Durchführungszeit des Auftrages \tilde{n} am Arbeitssystem m , $ZDF_{\tilde{n},m} = T_{ende,\tilde{n},m} - T_{start,\tilde{n},m}$ überein. Für bekannte Durchführungszeiten $ZDF_{\tilde{n},m}$ [h] des Auftrages \tilde{n} am Arbeitssystem m ergibt sich folglich die obere Grenze des Integrals zu $T_{ende,\tilde{n},m} = T_{start,\tilde{n},m} + ZDF_{\tilde{n},m}$.

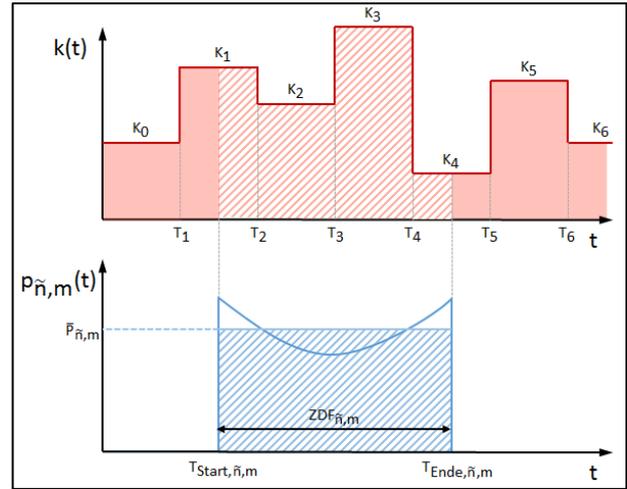


Abbildung 4. Funktionsweise der Energiekostenfunktion

Der Startzeitpunkt ist der frühestmögliche Zeitpunkt, nachdem der Auftrag sowohl das vorherige Arbeitssystem verlassen hat (Startzeitpunkt am vorherigen Arbeitssystem erweitert um die Durchführungszeit am vorherigen Arbeitssystem), als auch das Arbeitssystem für neue Aufträge zur Verfügung steht. Dieses ist gewährleistet, sobald alle bereits eingeplanten Durchführungszeiten $ZDF_{ein,m}$ [h] am Arbeitssystem m abgearbeitet wurden. Diese Summe der Durchführungszeiten stellt somit die Wartezeit vor dem Arbeitssystem dar, sofern keine Störungen auftreten. Diese ergibt sich aus der Summe der eingeplanten Durchführungszeiten $ZDF_{\tilde{n},m}$ beziehungsweise der Summe der eingeplanten Auftragszeiten $ZAU_{\tilde{n},m}$ [h] und der maximalen Arbeitssystemleistung $L_{max,m}$ [h/h]:

$$ZDF_{ein,m} = \sum_{\tilde{n} \in \tilde{\mathcal{N}}} ZDF_{\tilde{n},m} = \sum_{\tilde{n} \in \tilde{\mathcal{N}}} \frac{ZAU_{\tilde{n},m}}{L_{max,m}} \quad (5)$$

Dabei beinhaltet die Menge $\hat{\mathcal{N}} = \{\hat{n} | \hat{n} \in \mathbb{N} \wedge 1 \leq \hat{n} \leq \hat{N}\}$ alle \hat{N} bereits freigegebenen Aufträge aus der Menge aller existenten Aufträge $\mathcal{N} = \hat{\mathcal{N}} \cup \tilde{\mathcal{N}}$. Die maximale Leistung $L_{max,m}$ eines Arbeitssystems m kann ungleich 1 h/h sein, wenn beispielsweise ein weiterer Mitarbeiter dem Arbeitssystem zugeordnet wird. In diesem Fall kann eine Leistung von 2 h/h erreicht werden. Ein Auftrag mit der Auftragszeit von 5 Stunden wird somit in einer Durchführungszeit von 2,5 (Zeit-)Stunden fertiggestellt. Dadurch ergibt sich die Nebenbedingung für den Startzeitpunkt $T_{start,\tilde{n},m}$ des Auftrages \tilde{n} am Arbeitssystem m zu:

$$T_{start,\tilde{n},m} = \max \{ZDF_{ein,m}, T_{ende,\tilde{n},m-1}\} \quad (6)$$

$$T_{ende,\tilde{n},m-1} = T_{start,\tilde{n},m-1} + ZDF_{\tilde{n},m-1} \quad (7)$$

Daraus folgen die Energiekosten $K_{\tilde{n}}$ mit

$$K_{\tilde{n}} = \sum_{m \in M} \int_{T_{start,\tilde{n},m}}^{T_{start,\tilde{n},m} + ZDF_{\tilde{n},m}} p_{\tilde{n},m}(t) \cdot k(t) dt \quad (8)$$

Geht man davon aus, dass die elektrische Leistung $p_{\tilde{n},m}(t)$ eines Arbeitssystems m für einen Auftrag \tilde{n} , näherungsweise konstant ist, vereinfacht sich das Integral unter Zuhilfenahme der durchschnittlichen elektrischen Leistung $\bar{P}_{\tilde{n},m}$ der Maschine m für Auftrag \tilde{n} zu:

$$K_{\tilde{n}} = \sum_{m \in M} \bar{P}_{\tilde{n},m} \int_{T_{start,\tilde{n},m}}^{T_{start,\tilde{n},m} + ZDF_{\tilde{n},m}} k(t) dt \quad (9)$$

Die durchschnittliche elektrische Leistung $\bar{P}_{\tilde{n},m}$ berechnet sich dabei wie folgt:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{\tilde{n},m} &= \frac{1}{ZDF_{\tilde{n},m}} \int_{T_{start,\tilde{n},m}}^{T_{start,\tilde{n},m} + ZDF_{\tilde{n},m}} p_{\tilde{n},m}(t) dt \\ &= \frac{1}{ZDF_{\tilde{n},m}} \int_0^{ZDF_{\tilde{n},m}} p_{\tilde{n},m}(t) dt \end{aligned} \quad (10)$$

Die Energiepreisfunktion $k(t)$, welche jeweils in einem Intervall $T_{k,i} = T_{i+1} - T_i$ von mindestens 15 Minuten konstant ist, lässt sich definieren über:

$$k(t) = \begin{cases} K_0 & T_0 \leq t < T_1 \\ K_1 & T_1 \leq t < T_2 \\ \dots & \dots \end{cases} \quad (11)$$

$$k(t) = K_i \quad T_i \leq t < T_{i+1} \quad (12)$$

Hierbei gilt $i \in \mathbb{N}_0, T_0 = 0$ min und die Nebenbedingung der Intervalllänge, die ein Vielfaches von 15 Minuten ist, findet ihren Niederschlag in:

$$T_{k,i} \bmod 15 [min] = 0 \quad (13)$$

mit dem Modulo-Operator (mod). Das Integral vereinfacht sich mit Hilfe von numerischen Verfahren zur Integralberechnung mit Exaktheitsgraden von mindestens 0, beispielsweise der Mittelpunkts-, Trapez-, oder Simpson-Regel, zu der Summe:

$$K_{\tilde{n}} = \sum_{m \in M} \bar{P}_{\tilde{n},m} \sum_{i \in I_{\tilde{n},m}} K_i \cdot (\min\{T_{i+1}, T_{ende,\tilde{n},m}\} - \max\{T_i, T_{start,\tilde{n},m}\}) \quad (14)$$

Die Indizes aller Intervalle der Energiepreisfunktion $k(t)$, die mindestens teilweise mit der Produktionszeit eines Auftrages einer Maschine zusammenfallen, umfasst die Menge $I_{\tilde{n},m} = \{i | i \in \mathbb{N}_0 \wedge ((T_i \geq T_{start,\tilde{n},m} \wedge T_i < T_{ende,\tilde{n},m}) \vee (T_{i+1} \leq T_{ende,\tilde{n},m} \wedge T_{i+1} > T_{start,\tilde{n},m}))\}$.

Vereinfacht wird demnach das Produkt aus der durchschnittlichen elektrischen Leistung der Maschine m für den Auftrag \tilde{n} , $\bar{P}_{\tilde{n},m}$ [W], und den Energiepreisen während der Bearbeitungszeit, über alle Maschinen aufsummiert. Letztere stellt die Summe über alle Energiepreisintervalle i , in denen die Maschine aktiv ist, dar.

Es wird empfohlen, die Berechnung der Energiekosten nur auf die ersten drei Arbeitssysteme eines Auftrages zu beziehen, da die Wahrscheinlichkeit des Eintretens der angenommenen Energiepreise und Startzeitpunkte an den Arbeitssystemen mit zunehmender zeitlicher Entfernung vom Zeitpunkt der Auftragsfreigabe stark abnimmt.

5 BEISPIELHAFTER DARSTELLUNG DER ENERGIEKOSTEN- UND BELASTUNGSORIENTIERTEN AUFTRAGSFREIGABE

Betrachtet wird eine Fertigung mit den Arbeitssystemen (AS) 1, 2 und 3, deren Ausgangssituation in Abbildung 5a dargestellt wird. In den Bestandskonten sind die freigegebenen, aber noch nicht fertig gestellten Aufträge mit ihrer Buchungsauftragszeit $ZAU_{BK,\tilde{n},m}$ und der Auf-

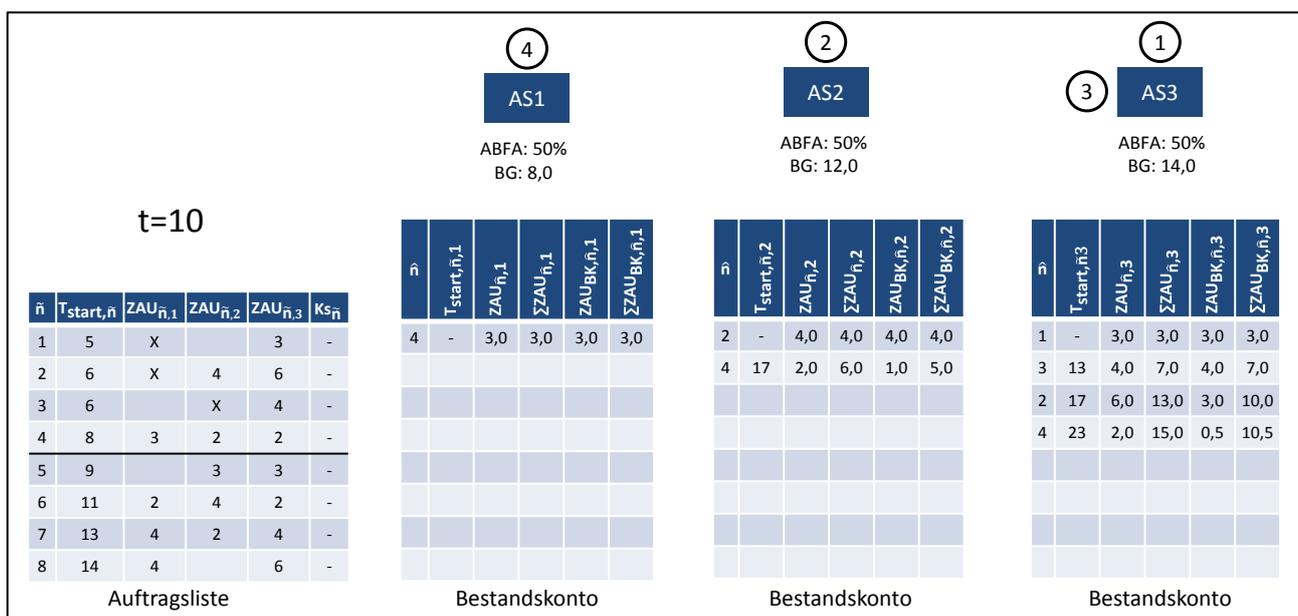


Abbildung 5a. Funktionsweise der eBOA (Ausgangssituation)

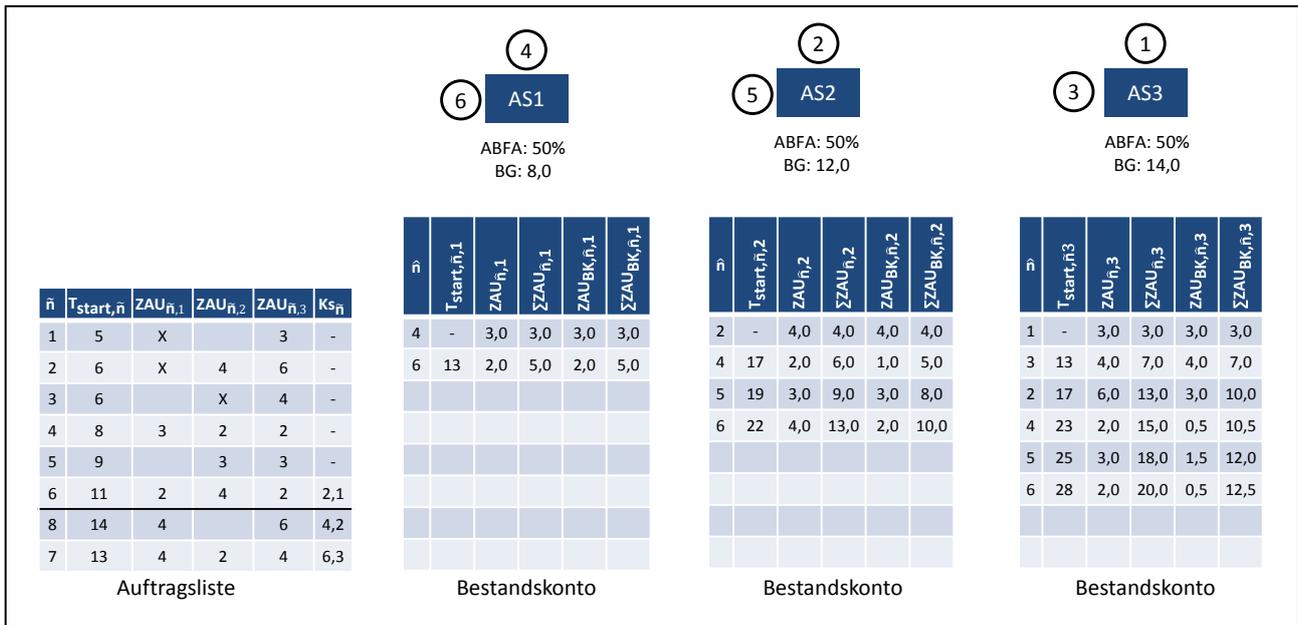


Abbildung 5b. Funktionsweise der eBOA (Freigabe der Aufträge 5 und 6)

tragszeit $ZAU_{\bar{n},m}$ abgebildet. Die Kreise an den Arbeitssystemen stellen den Direktbestand dar, wobei sich der Auftrag über dem Arbeitssystem gerade in Bearbeitung befindet. Ist eine Zeile fett gedruckt, so ist die Bestandsgrenze des Arbeitssystems erreicht. Zudem enthält die Abbildung links einer Liste mit Aufträgen, welche bereits freigegeben sind (über der horizontalen Linie) oder aufgrund des Vorgriffhorizontes in der Planungsperiode noch freigegeben werden sollen (unter der horizontalen Linie). Die Liste beinhaltet zudem die Plan-Starttermine $T_{start,\bar{n}}$, die Auftragszeiten $ZAU_{\bar{n},m}$ an den Arbeitssystemen und ggf. die spezifischen Energiekosten $Ks_{\bar{n}}$. Insgesamt wird von einer Leistung $L_{max,m}$ aller M Arbeitssysteme von 1 h/h ausgegangen, wodurch die Durchführungszeit der Auftragszeit entspricht. Ist die Bear-

beitung eines Auftrages an einem Arbeitssystem bereits abgeschlossen wird dies in der Auftragsliste mit einem X vermerkt.

Da die Rückwärtsterminierung bereits erfolgt ist wird im zweiten Schritt die Termingrenze (hier Planungszeitpunkt $t=10$) geprüft. Der Plan-Starttermin von Auftrag 5 ($t=9$) ist bereits überschritten (er wird somit in die Liste dringlicher Aufträge Priorität eins verschoben), wodurch der Auftrag unabhängig von Bestandsgrenzen in die Arbeitssysteme 2 und 3 eingebucht wird (Abbildung 5b). Dabei wird die Auftragszeit an Arbeitssystem 3 um 50 Prozent abgezinst, wodurch nach Gleichung (1) nur $ZAU_{BK,5,3} = 3,0h * 0,5 = 1,5h$ eingebucht werden.

Da keine weiteren Termingrenzen überschritten wurden, werden für die drei verbleibenden Aufträge (dringliche

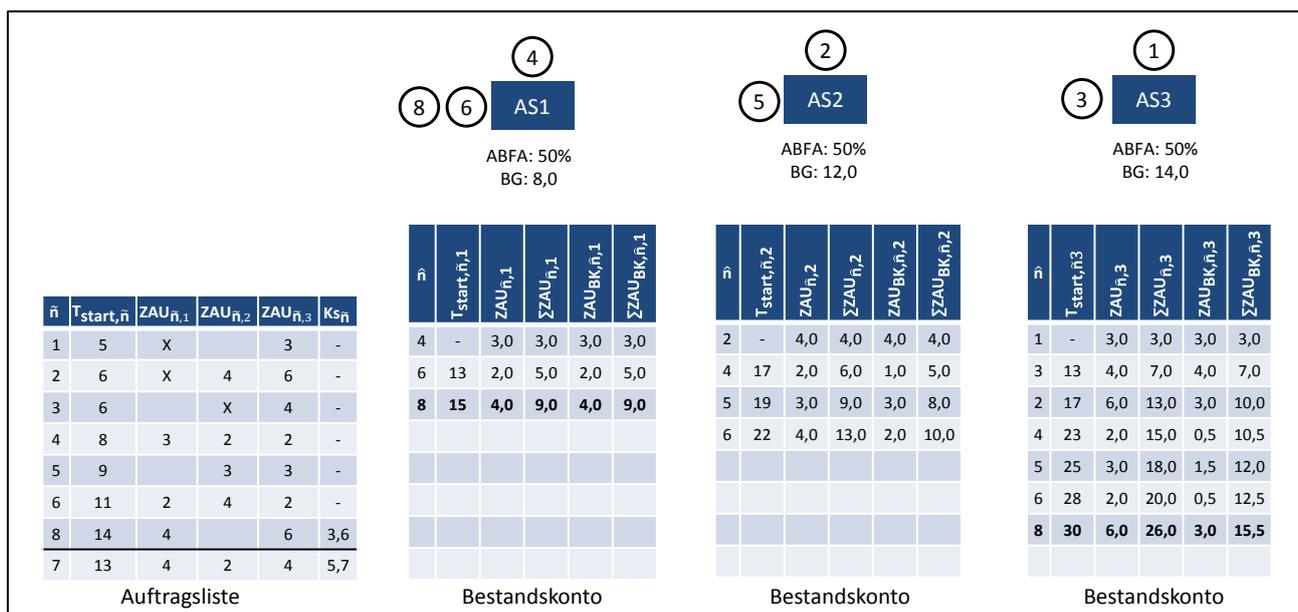


Abbildung 5c. Funktionsweise der eBOA (Freigabe des Auftrages 8)

Aufträge der Priorität zwei) über die Energiekostenfunktion unter Berücksichtigung der aktuellen Energiepreisfunktion $k(t)$ die spezifischen Energiekosten berechnet. Da Auftrag sechs die geringsten spezifischen Energiekosten besitzt, wird er als erstes in die Bestandskonten aller drei Arbeitssysteme eingebucht und damit freigegeben (Abbildung 5b). Auch hier wird die Buchungsauftragszeit an Arbeitssystem 2 und 3 um 50 bzw. 75 Prozent reduziert ($ZAU_{BK,6,2} = 4,0h * 0,5 = 2,0h$ und $ZAU_{BK,6,3} = 2,0h * 0,5 * 0,5 = 0,5h$).

Da an keinem Arbeitssystem die Bestandsgrenze erreicht ist werden für die verbleibenden zwei Aufträge die spezifischen Energiekosten erneut berechnet. Dies ist nötig, da sich durch die Einbuchung des vorherigen Auftrages 6 der frühestmögliche Startzeitpunkt an Arbeitssystem 1 um die Durchführungszeit von Auftrag 5 (2 Stunden) nach hinten verschoben hat. Daher kann der nächste Auftrag nicht mehr ab $t=13$ sondern erst ab $t=15$ bearbeitet werden, woraus bei schwankenden Energiepreisen andere Energiekosten resultieren würden. Nun weist Auftrag 8 die geringsten spezifischen Energiekosten auf. Durch die (teilweise abgezinste) Einbuchung der Buchungsauftragszeiten werden an den Arbeitssystemen 1 und 3 die Bestandsgrenzen erreicht bzw. überschritten und damit die Arbeitssysteme für weitere Einbuchungen gesperrt (Abbildung 5c). Da der letzte verbliebene Auftrag 7 ebendiese Arbeitssysteme belasten würde, kann er in diesem Planungszyklus nicht freigegeben werden und wird somit zurückgestellt.

Somit wurden durch die eBOA die Aufträge in der Reihenfolge 5, 6, 8 freigegeben. Die ursprüngliche BOA hätte die dagegen statt des Auftrages 8 aufgrund des früheren Plan-Starttermins den Auftrag 7 freigegeben (Reihenfolge der Aufträge nun 5, 6, 7). In einer Erweiterung des Beispiels liegen eine zwischen 15 und 30 cent/kWh schwankende Energiepreisfunktion sowie durchschnittliche Energieverbräuche von 100W bei Auftrag 6, 200W bei Auftrag 5 und 8 sowie 300W bei Auftrag 7 vor. So werden die durch die drei freigegebenen Aufträge (Auftrag 5,6 und 8 bzw. 5, 6 und 7) verursachten Energiekosten durch die eBOA um 17 Prozent gegenüber der BOA reduziert.

6 ZUSAMMENFASSUNG

In dem vorliegenden Beitrag wurde ein Ansatz zur Integration zeitvariabler Energiekosten in ein bestehendes Verfahren der Auftragsfreigabe (BOA) beschrieben. Wesentlichen Inhalt des vorgestellten Ansatzes bildet die Sortierung der Aufträge nach auf die Auftragszeit bezogenen spezifischen Energiekosten. Diese werden über eine Energiekostenfunktion in Abhängigkeit der Preisstufen und des Energieverbrauches berechnet. Das entwickelte Verfahren bietet den anwendenden Unternehmen die Möglichkeit über rein organisatorische Maßnahmen der

Fertigungssteuerung Energiekosten zu sparen ohne dabei die logistischen Zielgrößen zu gefährden. Im weiteren Verlauf muss das Verfahren noch in Simulationen gegenüber der ursprünglichen BOA validiert werden, um zusätzliche Potentiale und auch Anwendungsgrenzen aufzeigen zu können. Zudem ist eine Quantifizierung der Einsparung an Energiekosten vorzunehmen.

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts „Integration von Energiekosten in Fertigungssteuerungsverfahren“. Das IGF-Vorhaben (17900 N) der Forschungsvereinigung (BVL e.V.) wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

- [Bec80] Bechte, W.: Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung. Diss. Universität Hannover, Hannover 1980.
- [BDE14] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Hrsg.): BDEW-Strompreisanalyse Juni 2014 – Haushalte und Industrie, Berlin, 2014.
- [EnW14] EnWG: Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz), vom 21.07.2014, BGBl. I, S. 1066-1132.
- [EnE12] Richtlinie 2012/27/EU: Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG (EnEff-RL), vom 25.10.2012, ABl. EU Nr. L 315, 1.
- [Kal12] Kals, J.: Neue Anforderungen an die PPS in Folge der Energiewende. In: PRODUCTIVITY Management, GITO-Verlag, 17. Jg. (2012), H. 4, S. 17 - 19.
- [Löd08] Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung – Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 2. Aufl., Springer Verlag, Berlin u.a., 2008.
- [Nyh12] Nyhuis, P., Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. 3. Aufl., Springer Verlag, Berlin u.a., 2012.

- [Pfo06] Pfohl, H.-C.; Arnold, U.: Betriebswirtschaftslehre der Mittel- und Kleinbetriebe. Größenspezifische Probleme und Möglichkeiten zu ihrer Lösung. 4. Aufl., Schmidt Verlag, Berlin, 2006.
- [Wie87] Wiendahl, H.-P.: Belastungsorientierte Fertigungssteuerung. Grundlagen, Verfahrensaufbau, Realisierung. Carl Hanser Verlag, München, Wien: 1987.
- [Wie97] Wiendahl, H.-P.: Fertigungsregelung. Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1997.
- [Wie14] Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 8. Aufl., Carl Hanser Verlag, München, 2014.
- [Wil14] Willeke, S., Wesebaum, S., Ullmann, G., Nyhuis, P.: Energiekosteneffiziente Fertigungssteuerung. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Carl Hanser Verlag, 109. Jg. (2014), H. 5, S. 328-331.

M. Sc. Stefan Willeke, Jahrgang 1988, ist Projektingenieur am IPH – Institut für Integrierte Produktion gemeinnützige GmbH.

Dipl.-Wirtsch.-Ing Sören Wesebaum, Jahrgang 1986, ist Projektingenieur am IPH – Institut für Integrierte Produktion gemeinnützige GmbH.

Dr.-Ing. Georg Ullmann, Jahrgang 1979, ist Geschäftsführer des IPH – Institut für Integrierte Produktion gemeinnützige GmbH.

Adresse: Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH,
Hollerithallee 6, 30419 Hannover,
Tel.: + 49 511 / 279 76-442,
E-Mail: willeke@iph-hannover.de,
URL: <http://www.iph-hannover.de>