Wirtschaftliche Analyse von Handlungsalternativen am Beispiel der energiesensitiven Koordination von Robotern in getakteten Fertigungsstraßen

Economic analysis of design options using the example of an energy-sensitive coordination of robots in clocked production lines

Krönert, S.[1]; Fischer, A.[2]; Fischer, F.[2]; Götze, U.[1]

[1] *TU Chemnitz, Professur für Unternehmensrechnung und Controlling*

[2] *TU Chemnitz, Professur Algorithmische und Diskrete Mathematik*

Abstract

Die Verbesserung der Energieeffizienz stellt aktuell eine große Herausforderung für die Planung und Steuerung von Fertigungssystemen dar. Der Ursprung einer energieeffizienten Fertigung liegt in der Planung des Fertigungssystems. Durch die Optimierung von Verfahren, Auswahl effizienter Maschinen, zeitliche Abstimmung etc. wird der Energieverbrauch im späteren Betrieb des Fertigungssystems in beträchtlichem Maße vorbestimmt. Für die Vorbereitung entsprechender Entscheidungen existieren bisher aber kaum geeignete betriebswirtschaftliche und mathematische Methoden. Um diese Lücke zu schließen, wird zum einen die Grundstruktur eines energiebezogenen Kennzahlensystems hergeleitet, das sich zur Zielbildung, Analyse, Prognose, Bewertung und Kontrolle bei energiebezogenen Problemstellungen nutzen lässt, und zum anderen ein mathematisches Modell zur Minimierung der Lastspitzen bzw. Nivellierung des Lastverlaufs bei gegebener Taktzeit präsentiert. Ein Fallbeispiel zur energiebezogenen zeitlichen Abstimmung von Robotern in getakteten Fertigungsstraßen dient dazu, die zunächst allgemein gehaltenen Ausführungen zu veranschaulichen.

Currently, one of the main challenges of planning and controlling of production systems is the improvement of their energy efficiency. In general, the basis of an energy efficient production is the planning of the production system. Here, the energy demand of the production system's use phase is significantly determined by the prior optimization of

R. Neugebauer, U. Götze, W.-G. Drossel (Hrsg.), Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD, Tagungsband zum 1. und 2. Methodenworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1 „Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung" des Spitzentechnologieclusters eniPROD, Wissenschaftliche Scripten, Auerbach, 2013.
URN: http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-105232

production methods, the selection of efficient machines, and the time-related coordination of processes, etc. But, at the moment, there are hardly any adequate economic and mathematical methods that support the decision-making process. To fill this gap, the article derives the basic structure of an energy-related performance measurement system, which enables an adequate goal setting, analysis, forecast, appraisal and monitoring, for the first time. Secondly, it presents a mathematical model for minimizing peak loads and leveling load curves under the condition of a given cycle time. Finally, the case study of an energy- and time-related coordination of robots in a clocked production line iks presented in order to exemplify the theoretical explanations.

Keywords:

Kennzahlensystem, Produktion, getaktete Fertigungsstraße, energiesensitive Optimierung

performance measurement system, production, clocked production lines, energy-oriented optimization

1 Einleitung

Steigende Energiepreise und der gesellschaftliche Druck zur nachhaltigen Produktion lassen seit geraumer Zeit eine Verbesserung der Energieeffizienz in den Mittelpunkt von Diskussionen sowohl in der Forschung als auch in der betrieblichen Praxis rücken. Neben den klassischen Zielgrößen der Produktion wie hoher Output, geringe Kosten, kurze Durchlaufzeiten und hohe Qualität nimmt die Energieeffizienz einen immer größeren Stellenwert im produktionswirtschaftlichen Zielsystem ein. Für die Herstellung von Industriegütern wird davon ausgegangen, dass mittelfristig Energieeinsparungen von 20 % [1] bis zu 30 % [2] möglich sind.

Eine Verbesserung der Energieeffizienz ist zum einen während der Betriebsphase von Fertigungssystemen erreichbar, z. B. im Rahmen der Reihenfolge- und Losgrößenplanung. Zum anderen sollten entsprechende Überlegungen aber auch schon in der Planungsphase von Produktionssystemen ansetzen. So kann bei Fließfertigungssystemen neben der Optimierung von Verfahren und der Auswahl effizienter Maschinen bzw. Roboter auch deren Auslegung (von einem weiten Begriffsverständnis ausgehend umfasst die Dimensionierung auch die zeitliche Abstimmung von Fließfertigungssystemen) durch Nivellierung des Lastverlaufs und durch Lastspitzenreduzierungen einen Beitrag zur Verringerung der Energiekosten leisten. Die gezielte Erschließung der entsprechenden Potentiale mittels betriebswirtschaftlicher und mathematischer Methoden steht im Mittelpunkt dieses Beitrags.

Einerseits wird die Grundstruktur eines energiebezogenen Kennzahlensystems hergeleitet, das sich zur Zielbildung, Analyse, Prognose, Bewertung und Kontrolle bei

energiebezogenen bzw. die Energieeffizienz betreffenden Problemstellungen nutzen lässt. Andererseits wird ein mathematisches Modell zur Minimierung der Lastspitzen bzw. Nivellierung des Lastverlaufs mittels geeigneter Abstimmung der Startzeitpunkte von Maschinen im Rahmen der Planungsphase präsentiert. Die zunächst allgemein gehaltenen Ausführungen werden dann an einem Fallbeispiel zur energiebezogenen Koordination der Startzeitpunkte von Robotern in getakteten Fertigungsstraßen veranschaulicht, an dem auch die Schnittstellen zwischen mathematischer Optimierung und betriebswirtschaftlicher Kennzahlenbildung und -auswertung verdeutlicht werden.

2 Kennzahlensystem zur energiebezogenen Steuerung von Fertigungssystemen

Die erste Frage, die sich im Hinblick auf die Steuerung eines Fertigungssystems stellt, ist die nach den Zielen, die mit diesem Fertigungssystem verfolgt werden. Wie bereits angedeutet, liegen zumeist mehrere Produktionsziele vor. Bild 1 zeigt einerseits, dass sich die Produktionsziele verschiedenen Zielbereichen zuordnen lassen (die je nach Relevanz um weitere Zielbereiche, wie Flexibilität, Sicherheit sowie Ökologie, ergänzt werden könnten), andererseits enthält es beispielhaft ausgewählte Zielgrößen aus diesen Bereichen. So können im Bereich der Energie(-ziele) die Minimierung des Energieverbrauchs, der Energieverluste und der Lastspitze sowie die Nivellierung des Lastverlaufs und die verstärkte Rückführung von Energie als Ziele verfolgt werden.

Effizienz in der Produktion

Quantität	Kosten	Qualität	Zeit	**Energie**
- Produktionsmenge - Abfallmenge - Anzahl standardisierter Teile - Anzahl der Prozessschritte - …	- Materialkosten - Personalkosten - Fertigungskosten - Energiekosten - Umweltkosten - …	- Ausschussquote - Lieferservice - Reklamationsquote - Störfälle - Auslastung - …	- Bearbeitungszeit - Rüstzeit - Ausfallzeit - Wartezeit - Produktions-Durchlaufzeit - …	- Energieverbrauch - Energieverluste - Lastspitze - Leistungsspanne - „Energierecycling“ - …

Bild 1: Zielbereiche und Teilgrößen der Produktion

Die Steuerung von Fertigungssystemen hinsichtlich solcher Ziele wird dadurch erschwert, dass zwischen ihnen vielfältige Beziehungen bestehen. So beeinflussen Maßnahmen zur Verfolgung einzelner energiebezogener Ziele typischerweise die Erreichung von weiteren energiebezogenen Zielen, aber auch von Zielen anderer Bereiche, wobei jeweils sowohl komplementäre als auch konfliktäre Zielbeziehungen auftreten können. Beispielsweise führt eine Reduktion der Energieverluste auch zu einer Minderung von Energieverbräuchen, hingegen können bei der Minimierung der Lastspitze und der Leistungsspanne Zielkonflikte auftreten. Des Weiteren wird die Minderung von Energieverbräuchen eine Senkung der Energiekosten bewirken, kann

aber auch zu einer Erhöhung anderer Kostenbestandteile und damit der Gesamtkosten führen. Soll die Senkung der Energieverbräuche mittels einer Verlangsamung von Prozessen (beim Bearbeiten, Rüsten, Transportieren etc.) erreicht werden, wie dies durchaus naheliegend erscheint, dann erhöht dies tendenziell die Durchlaufzeiten und verringert zudem – bei gleicher Einsatzzeit – den Output.

Inwiefern können nun Kennzahlen/-systeme die Steuerung von Fertigungssystemen hinsichtlich der Erreichung eines Bündels konfliktärer und komplementärer Ziele unterstützen? Kennzahlen, d. h. Größen, die quantitativ erfassbare Sachverhalte in konzentrierter Form erfassen [3], dienen unter anderem der Operationalisierung von – nicht per se messbaren – Zielen. Diese erfolgt, indem entweder das Ziel in eine messbare Zielgröße (als Kennzahl) überführt oder ein adäquater Indikator (wiederum eine Kennzahl) für die Messung der Zielerreichung verwendet wird. Des Weiteren lassen sich Kennzahlen zur Zielvorgabe, zur Analyse von Sachverhalten einschließlich der Identifizierung von Ursachen und des Vergleichs mit ähnlichen Sachverhalten, zur Prognose, als Entscheidungsprämissen, zur Bewertung von Handlungsalternativen sowie Unternehmensbereichen und zur Kontrolle einschließlich Frühaufklärung nutzen. Sie unterstützen demgemäß in vielfältiger Weise die Führungsprozesse der Planung, Durchsetzung und Realisation sowie Kontrolle [4]. Allerdings kann mittels einzelner Kennzahlen nur eine begrenzte Aussagekraft erzielt werden. Über die Zusammenführung einander ergänzender und/oder erklärender Kennzahlen in Kennzahlensystemen lässt sich die Aussagekraft im Hinblick auf die Abbildung und Analyse von Zielbeziehungen, den Umfang der abbildbaren Sachverhalte, die Ursachenanalyse etc. deutlich erhöhen.

In den zahlreichen publizierten Kennzahlensystemen für den Produktionsbereich nimmt der Energiebereich gar keine oder eine eher untergeordnete Rolle ein [z. B. 5-8]. Sofern Energiekennzahlen berücksichtigt werden, lässt sich in erster Linie eine Konzentration auf die Erfassung des reinen Energieverbrauchs feststellen. Dieser wird typischerweise in Summe für den gesamten Fertigungsbereich abgebildet, mehr oder minder nach Einsatzzwecken und Energieträgern aufgeschlüsselt und mit den Bezugskosten bewertet. Um die energetischen Wirkzusammenhänge der Produktion umfassend darzulegen und entsprechende Steuerungsmaßnahmen entwickeln zu können, sind jedoch weitere Verfeinerungen sowie die Berücksichtigung einer Vielzahl von Einflussfaktoren erforderlich. Neben der ausschließlichen Nutzung der Energie sollte auch deren Erzeugung, Umwandlung, Verteilung, Speicherung oder auch Rückgewinnung bzw. Nachnutzung einbezogen und durch geeignete Kennzahlen abgebildet werden. Diese energiebezogenen Aktivitäten dienen zwar nicht direkt der betrieblichen Wertschöpfung im eigentlichen Sinne, stellen aber die notwendige Voraussetzung zur produktionsbedingten Energienutzung dar und bergen unter Umständen erhebliche Optimierungspotentiale. Zudem sollte bei der wertmäßigen Bewertung nicht nur auf die Bezugskosten der Energie abgestellt werden; es sollten vielmehr auch die Kostenarten und Kostenstellen einbezogen werden, die im Zusammenhang mit den Anlagen für

sämtliche der oben genannten energiebezogenen Aktivitäten relevant sind.

Eine denkbare Basis für die energiebezogene Steuerung von Fertigungssystemen stellen zudem die bisher vorliegenden energiebezogenen Kennzahlensysteme dar. Diese umfassen ein allgemein gehaltenes Kennzahlensystem zum betrieblichen Energiemanagement [9], welches sehr global und ohne weitere Spezifizierung für den Produktionsbereich nicht nutzbar ist. Daneben existieren stärker produktionsbezogene Energiekennzahlensysteme, die der Einteilung in die Kennzahlenbereiche Input, Throughput und Output (ITO) folgen [10, 11]. Im Vordergrund steht dabei das Mengengerüst der Energieverbräuche und -verluste, das mittels Beziehungszahlen abgebildet wird. Der Vorteil dieser ITO-Struktur besteht darin, dass verschiedene Bilanzierungsgrenzen gezogen und damit unterschiedliche Ebenen des Fertigungssystems energetisch analysiert, bewertet etc. werden können. Der Nachteil ist, dass aufgrund der Beschränkung auf Energiekennzahlen die im ersten Abschnitt beschriebenen Zusammenhänge zu anderen produktionswirtschaftlichen Zielen nicht erfasst werden und damit eine integrierte Steuerung der Produktion im Hinblick auf Energie- und andere Ziele nur eingeschränkt unterstützt werden kann.

Aus den obigen Ausführungen ergibt sich, dass einerseits umfassende, verschiedene Zielbereiche und -größen sowie deren Einflussgrößen einbeziehende Kennzahlensysteme für die Produktion wünschenswert sind, andererseits hierfür bisher aber kaum Konzepte existieren. Dies motiviert dazu, nachfolgend die Grundstruktur eines entsprechenden Kennzahlensystems vorzuschlagen.

Diese in Bild 2 dargestellte Grundstruktur ist dadurch gekennzeichnet, dass zum einen eine hierarchische Untergliederung erfolgt, die beispielhaft von der Maschine bis hin zur Supply Chain reicht. Zum anderen ist die zeitliche Strukturierung mit einer Spannweite von sehr kurzen Betrachtungszeiträumen bis hin zu Lebenszyklen vorgesehen. Für jedes der sich aus der Kombination dieser Dimensionen ergebenden potentiellen Betrachtungsobjekte lässt sich ein (Sub-) Kennzahlensystem bilden (z. B. für einen Fertigungsbereich an einem Standort über ein Jahr). Für die entsprechenden Kennzahlensysteme wiederum ist jeweils eine grundlegende Struktur vorgesehen, die sich aus der Kombination von Input, Throughput, Output (ergänzt um Produktivitäten als Output/Input-Verhältnis) und den angesprochenen Zielbereichen ergibt [12].

Kennzahlen können so je nach Systemebene und zeitlicher Struktur in unterschiedlichem Maße verdichtet werden und es wird möglich, die Ableitung von Zielen, Handlungsbedarfen und Maßnahmen sowie deren Bewertung und die Kontrolle der Zielerreichung differenziert auf den Ebenen einzelner Maschinen, Anlagen, Fertigungsbereiche etc. zu unterstützen.

Hier kann allerdings nur die Grundstruktur eines solchen Systems dargestellt werden. Davon ausgehend ist im konkreten Anwendungsfall das Kennzahlensystem unternehmensindividuell auszugestalten, da einerseits sehr verschiedene Typen von Produktionssystemen existieren und andererseits die Zielbereiche und Ziele sowie deren

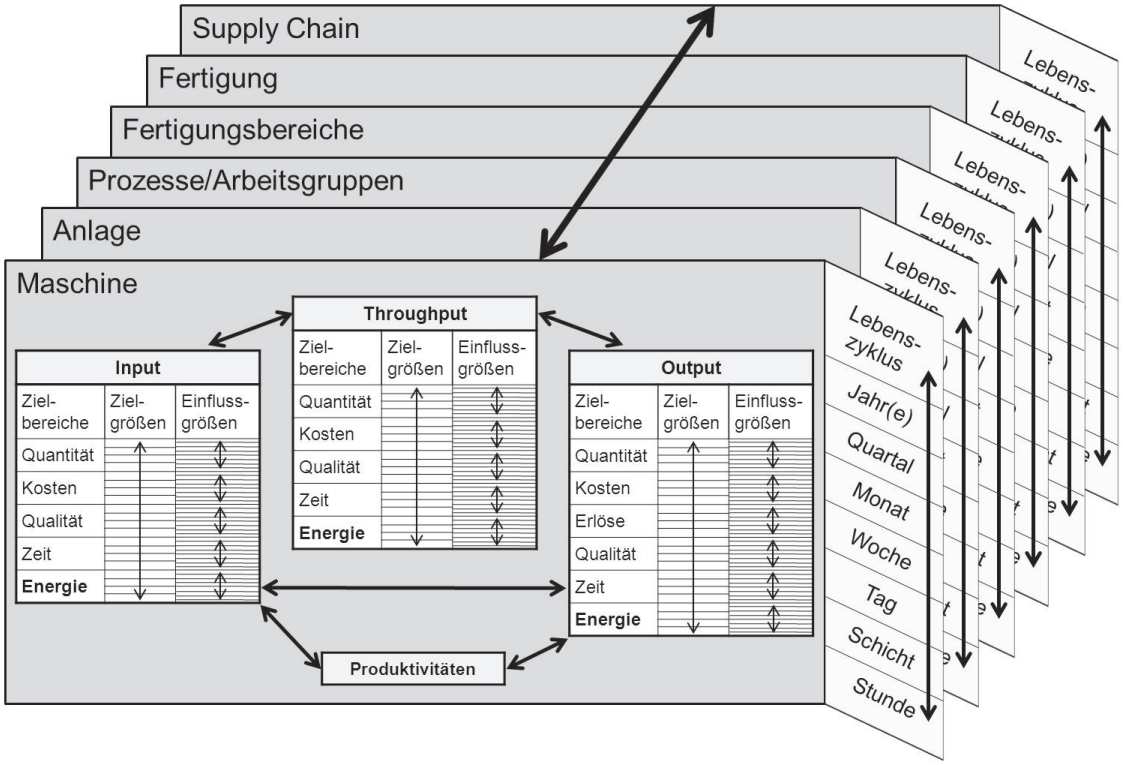


Bild 2: Grundstruktur eines energiebezogenen Produktionskennzahlensystems

Ausprägungen und Wirkungen sich von Unternehmen zu Unternehmen unterscheiden. Ein entsprechendes Vorgehensmodell hierfür ist an anderer Stelle vorgeschlagen worden [12].

In einem konkreten Kennzahlensystem für den Fertigungsbereich können energiebezogene Ziele und Einflussgrößen – unter Rückgriff auf entsprechende existierende Kennzahlen (-systeme) – (weiter) spezifiziert sowie deren Beziehungen zu anderen Zielgrößen erfasst werden. Dies kann unter anderem den Gesamtenergieverbrauch, Lastspitzen, Emissionen und/oder Energieverluste sowie deren Einflussgrößen umfassen. Damit lässt sich eine Grundlage für (auch) energiebezogene Optimierungen schaffen, indem Informationen über die relevanten Zielgrößen, Einflussgrößen/Beschränkungen sowie Zusammenhänge zwischen diesen Größen bereitgestellt werden. Nach erfolgter Optimierung können deren Ergebnisse wiederum Eingang in das Kennzahlensystem finden, um ihre – angesichts der Notwendigkeit des Treffens vereinfachender Modellannahmen immer zu hinterfragende – „Richtigkeit“ zu beobachten, Anstöße für Modellanpassungen zu geben sowie Hinweise auf das Fertigungssystem bezogene Anpassungsbedarfe zu generieren. Ein konkretes Optimierungsmodell mit Energiebezug wird nachfolgend vorgestellt, um anschließend dessen Anwendung in einem Fallbeispiel zu demonstrieren und dabei auch die Verbindung zu Kennzahlensystemen aufzuzeigen.

3 Reduzierung der Lastspitzen bzw. Nivellierung des Lastverlaufs mittels Optimierung

In diesem Beitrag wird ein Ausschnitt der Fertigung betrachtet. Es wird aufgezeigt, wie man die Spitzenlast reduzieren bzw. das Niveau des Lastverlaufs einer getakteten Fließfertigung steuern kann. Dazu werden die Arbeitsschritte der verwendeten Maschinen aufeinander abgestimmt. Die Produktionslinie sei wie folgt aufgebaut. Es befinden sich Maschinen und Stationen im betrachteten Produktionsbereich. Jede Maschine hat eine fest vorgegebene Reihenfolge, in der sie Arbeitsschritte auf den Stationen auszuführen hat. Dabei ist es möglich, dass eine Maschine mehrfach für die Produktion einer Komponente auf einer ihr zugeordneten Stationen arbeitet und dass sie einen einzelnen Prozess in unterschiedlichen Geschwindigkeiten und damit mit unterschiedlichen Energieprofilen durchführen kann. Ebenso gibt es eine feste Reihenfolge, in der die Maschinen auf einer einzelnen Station arbeiten. Die Produktion läuft im Normalfall so ab, dass eine Maschine vor ihrer nächsten Station wartet, bis diese Station frei wird, da maximal eine Maschine gleichzeitig auf einer Station arbeiten kann, und die Maschine an der Reihe ist. Dann arbeitet die Maschine alle Einzelschritte dieses Schrittes auf der Station ohne weitere Unterbrechung ab.

Ein Ziel des Beitrags ist, zu untersuchen, wie es sich auswirkt, wenn bei vorgegebener Taktzeit die Wartezeiten der Maschinen vor den Stationen geschickt angepasst werden und zusätzlich unterschiedliche Prozessgeschwindigkeiten zur Wahl stehen. Dazu wird ein mathematisches Modell aufgestellt, mit dem bei gegebener Taktzeit ein Produktionsplan für einen Takt erstellt wird, der die Restriktionen zwischen Maschinen und Stationen einhält und die Maximallast minimiert bzw. die Schwankungen im Lastverlauf reduziert. Die Bewertung der Lösungen, insbesondere bei unterschiedlichen Taktzeiten, bezüglich des gesamten Zielsystems erfolgt im nächsten Abschnitt.

Das aufgestellte Modell stellt eine Erweiterung des in [14] vorgestellten Modells dar. So besteht hier die Möglichkeit mehrerer Prozessgeschwindigkeiten und es ist erlaubt, dass eine Maschine mehrfach innerhalb eines Taktes Arbeiten auf einer Station ausführt. Außerdem wurde in [14] nur eine Zielfunktion zur Minimierung der Maximallast vorgestellt. Darüber hinaus wird in dieser Arbeit ein weiterer Ansatz verfolgt, um den Lastverlauf anzupassen. Dieser basiert auf einer stückweise linearen konvexen Zielfunktion und berücksichtigt den Energieverbrauch zu jedem Zeitpunkt.

Das Optimierungsmodell nutzt periodische zeitdiskretisierte Netzwerkflüsse. (Für einen Überblick über Lösungsansätze für dynamische Netzwerkflussprobleme siehe [13].) In einer Lösung wird jedem Prozessschritt ein genauer Zeitpunkt innerhalb der gegebenen Taktzeit T_Z zugewiesen. Dieser zeitliche Ablaufplan wird zyklisch wiederholt. Die Steuerungsmöglichkeiten betreffen die Zeitpunkte der Prozesse, die Länge der Wartezeiten der Maschinen vor den einzelnen Stationen sowie die Auswahl von unterschiedlichen Prozessvarianten.

Sei M die Menge der Maschinen und S die Menge der Stationen. Aus den Arbeitsschrittreihenfolgen wird für jede Maschine $m \in M$ und für jede Station $s \in S$ ein Graph konstruiert. Für jede Maschine $m \in M$ stellt dieser Graph die Abfolge der Stationen dar, die diese nacheinander besucht. Entsprechend symbolisiert der Graph einer Station die Reihenfolge der Maschinen, in der diese auf der Station arbeiten. Bei beiden Graphvarianten handelt es sich um so genannte gerichtete Kreise, da zum einen eine Maschine gleichzeitig auf maximal einer Station Prozesse ausführen kann und zum anderen maximal eine Maschine gleichzeitig auf einer Station arbeiten kann, da sich mehrere Maschinen gegenseitig blockieren.

Die Reihenfolge der $k_m \in \mathbb{N}$ Stationen, die die Maschine $m \in M$ nacheinander besucht, wird mit $o_m = ((s_0^m, 0), (s_1^m, 1), \dots, (s_{k_m-1}^m, k_m-1))$, $s_0^m, s_1^m, \dots, s_{k_m-1}^m \in S$, wobei $s_i^m, s_j^m \in S$ nicht verschieden sein müssen, bezeichnet. Es ist zu beachten, dass für eine Maschine auf einer Station alle Einzelschritte zu einem Schritt zusammengefasst werden, wenn diese Prozessfolge nicht unterbrochen werden darf. Der zugehörige Graph $G_m = (V_m, A_m)$ einer Maschine $m \in M$ setzt sich aus der Knotenmenge $V_m = \{(s_0^m, 0), (s_1^m, 1), \dots, (s_{k_m-1}^m, k_m-1)\}$ und Kantenmenge $A_m = \{((s_i^m, i), (s_{(i+1) \bmod k_m}^m, (i+1) \bmod k_m)) \colon i = 0, \dots, k_m - 1\}$ zusammen.

Für eine Station $s \in S$ sei $o_s = ((m_0^s, j_0^s, 0), (m_1^s, j_1^s, 1), \dots, (m_{k_s-1}^s, j_{k_s-1}^s, k_s - 1))$, $m_0^s, m_1^s, \dots, m_{k_s-1}^s \in M$, $(s, j_i^s) \in V_{m_i^s}$, $i = 0, 1, \dots, k_s - 1$, die Abfolge der k_s Maschinen auf s. Daraus werden die Stationsgraphen $G_s = (V_s, A_s)$ für eine Station $s \in S$ mit Knotenmenge $V_s = \{(m_0^s, j_0^s, 0), (m_1^s, j_1^s, 1), \dots, (m_{k_s-1}^s, j_{k_s-1}^s, k_s-1)\}$ und Kantenmenge $A_s = \{((m_i^s, j_i^s, i), (m_{(i+1) \bmod k_s}^s, j_{(i+1) \bmod k_s}^s, (i+1) \bmod k_s)) \colon i = 0, \dots, k_s-1\}$ abgeleitet.

Die Graphen G_m, $m \in M$, und G_s, $s \in S$, werden nun zeitlich expandiert. Das erlaubt es später, jedem Prozess einen konkreten Zeitpunkt innerhalb eines Taktes zuzuweisen. Bei der Zeitdiskretisierung spielt neben der Taktzeit T_Z die Diskretisierungsbreite T_B eine wichtige Rolle. Diese gibt an, welche zeitlichen Intervalle zu einem Zeitschritt zusammengefasst werden sollen. Die Anzahl der Zeitschritte n_T berechnet sich dann aus $n_T := \lceil T_Z / T_B \rceil$. Damit ergibt sich die Menge der Zeitschritte als $T := \{0, 1, \dots, n_T - 1\}$. Um die Zeitexpansion durchführen zu können, benötigt man noch die Anzahl der Zeitschritte $d_{i,k}^m$, die eine Maschine $m \in M$ für alle Arbeitschritte auf ihrer i-ten Station $s_i^m \in S$ im Modus $k \in \{0, \dots, n_{s_i^m}^d - 1\}$ braucht. Daneben ist noch die Transferzeit $w_{i,k}^m$ von Station s_i^m auf Station $s_{(i+1) \bmod k_m}^m$ im Modus $k \in \{0, \dots, n_{s_i^m}^w - 1\}$ von Bedeutung. Diese gibt die Anzahl der Zeitschritte der Maschine für den Wechsel zwischen den entsprechenden Stationen im Modus k an. Mithilfe der unterschiedlichen Modi lassen sich mehrere Geschwindigkeiten bzw. Energieprofile für einen Prozess hinterlegen. Man beachte, dass $d_{i,k}^m$, $w_{i,k}^m$ von der Diskretisierungsbreite T_B abhängen. Damit eine Lösung des diskretisierten Modells auch in der Praxis umgesetzt werden kann, sollte bezüglich der Anzahl der Zeitschritte, die sich als Quotient von Zeitdauer der Prozesse zu T_B ergibt, aufgerundet werden.

Der zeitexpandierte Graph $G_m^T = (V_m^T, A_m^T)$, $m \in M$, besteht aus der Knotenmenge $V_m^T = \{((s_i^m, i), t) \colon (s_i^m, i) \in V_m, t \in T\}$. Die Kantenmenge $A_m^T = A_{m,1}^T \cup A_{m,2}^T$ setzt

sich aus Wartekanten

$$A^T_{m,1} = \{(((s^m_i, i), t), ((s^m_i, i), (t+1) \bmod n_T))^{(0,0)} \colon (s^m_i, i) \in V_m, t \in T\} \quad (1)$$

sowie kombinierten Arbeits- und Transferkanten

$$\begin{aligned} A^T_{m,2} = \{(((s^m_i, i), t), ((s^m_j, j), (t + d^m_{i,k} + w^m_{i,k'}) \bmod n_T))^{(k,k')} \colon \\ j = (i+1) \bmod k_m, (s^m_i, i) \in V_m, t \in T, k \in \{0, \dots, n^d_{s^m_i} - 1\}, \\ k' \in \{0, \dots, n^w_{s^m_i} - 1\}\} \end{aligned} \quad (2)$$

zusammen. Für $G^T_s = (V^T_s, A^T_s), s \in S$, ergibt sich die Knotenmenge V^T_s als $V^T_s = \{((m^s_i, j^s_i, i), t) \colon (m^s_i, j^s_i, i) \in V_s, t \in T\}$ und die Kantenmenge $A^T_s = A^T_{s,1} \cup A^T_{s,2}$ besteht aus Wartekanten

$$\begin{aligned} A^T_{s,1} = \{(((m^s_i, j^s_i, i), t), ((m^s_i, j^s_i, i), (t+1) \bmod n_T))^0 \colon (m^s_i, j^s_i, i) \in V_s, \\ t \in T\} \end{aligned} \quad (3)$$

sowie Arbeitskanten

$$\begin{aligned} A^T_{s,2} = \{(((m^s_i, j^s_i, i), t), ((m^s_l, j^s_l, l), (t + d^{m^s_i}_{j^s_i,k}) \bmod n_T))^k \colon l = (i+1) \bmod k_s, \\ (m^s_i, j^s_i, i) \in V_s, t \in T, (s, j^s_i) \in V_{m^s_i}, k \in \{0, \dots, n^d_{m^s_i, s, j^s_i} - 1\}\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Das Optimierungsmodell basiert auf den zeitexpandierten Netzwerken. So besteht die Idee darin, dass man für jede Maschine $m \in M$ einen gerichteten Kreis in G^T_m bestimmt, der dann dem Ablaufplan der Maschine entspricht. Benutzt die Maschine in einem Zeitschritt $t \in T$ eine Wartekante, so entspricht dies der Situation, dass die Maschine vor dieser Station wartet. Entsprechend zeigen benutzte Arbeits- und Transferkanten, dass Schritte auf der zugehörigen Station ausgeführt werden bzw. sich die Maschine zur nächsten Station bewegt.

Für jede Kante $a \in A^T_m, m \in M$, wird eine Binärvariable $x^m_a \in \{0, 1\}$ und für jede Kante $a \in A^T_s, s \in S$, eine Binärvariable $y^s_a \in \{0, 1\}$ eingeführt mit der folgenden Interpretation. Für $x^m_a, a \in A^T_m, m \in M$, gilt

$$x^m_a = \begin{cases} 1 & \text{falls sich } m \in M \text{ im Kante } a \in A^T_m \text{ zugeordneten Zustand} \\ & \text{und Startzeitschritt befindet,} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5)$$

und für y_a^s, $a \in A_s^T$, $s \in S$, entsprechend

$$y_a^s = \begin{cases} 1 & \text{falls sich } s \in S \text{ im Kante } a \in A_s^T \text{ zugeordneten Zustand} \\ & \text{und Startzeitschritt befindet,} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \tag{6}$$

Im nächsten Schritt werden die Nebenbedingungen für die Maschinengraphen G_m^T, $m \in M$, hergeleitet. Diese erzwingen, dass es in der Lösung für jede Maschine $m \in M$ einen gerichteten Kreis gibt, wobei dieser für jedes s_i^m genau einmal eine der Kanten $(((s_i^m, i), t), ((s_{(i+1) \bmod k_m}^m, (i+1) \bmod k_m), (t + d_{i,k_1}^m + w_{i,k_2}^m) \bmod n_T))^{(k_1,k_2)} \in A_m^T$ benutzt. Die *Flusserhaltungsgleichungen*

$$\sum_{a=(((s_1,j_1),t_1),((s_2,j_2),t_2))^{(k,k')} \in A_m^T} x_a^m - \sum_{b=(((s_0,j_0),t_0),((s_1,j_1),t_1))^{(k,k')} \in A_m^T} x_b^m = 0,$$
$$m \in M, ((s_1, j_1), t_1) \in V_m^T, \tag{7}$$

besagen, dass der Eingangsgrad jedes Knotens $((s_1, j_1), t_1) \in V_m^T$, $m \in M$, gleich seinem Ausgangsgrad ist. Außerdem soll jeder Arbeitsschritt genau einmal innerhalb der Taktzeit ausgeführt werden

$$\sum_{a=(((s_1,j_1),t_1),((s_2,j_2),t_2))^{(k,k')} \in A_m^T} x_a^m = 1, \qquad ((s_1, j_1), (s_2, j_2)) \in A_m, m \in M, \tag{8}$$

und in jedem Zeitschritt genau ein Prozess stattfinden

$$\sum_{a=(((s_1,j_1),t_1),((s_2,j_2),t_2))^{(k,k')} \in A_m^T, t_1 < t_2} (t_2 - t_1) x_a^m +$$
$$\sum_{b=(((s_1,j_1),t_1),((s_2,j_2),t_2))^{(k,k')} \in A_m^T, t_1 > t_2} (n_T + t_2 - t_1) x_b^m = n_T, m \in M. \tag{9}$$

Analog erhalten wir als Bedingungen an die y_a^s, $a \in A_s^T$, $s \in S$,

$$\sum_{a=(((m_1,j_1,i_1),t_1),((m_2,j_2,i_2),t_2))^k \in A_s^T} y_a^s - \sum_{b=(((m_0,j_0,i_0),t_0),((m_1,j_1,i_1),t_1))^k \in A_s^T} y_b^s = 0,$$
$$s \in S, ((m_1, j_1, i_1), t_1) \in V_s^T, \tag{10}$$

$$\sum_{a=(((m_1,j_1,i_1),t_1),((s_2,j_2,i_2),t_2))^k \in A_s^T} y_a^s = 1, \qquad s \in S, (m_1, j_1, i_1) \in A_s, \tag{11}$$

$$\sum_{a=(((m_1,j_1,i_1),t_1),((m_2,j_2,i_2),t_2))^k \in A_s^T, t_1 < t_2} (t_2 - t_1) y_a^s +$$

$$\sum_{b=(((m_1,j_1,i_1),t_1),((m_2,j_2,i_2),t_2))^k \in A_s^T, t_1 > t_2} (n_T + t_2 - t_1) y_b^s = n_T, \quad s \in S. \tag{12}$$

Zum Schluss muss noch sichergestellt werden, dass die Maschinen- und Stationsgraphen in einem gewissen Sinne zueinander passen, das heißt, wenn eine Maschine $m \in M$ eine Arbeitskante auf einer Station $s \in S$ benutzt, so muss auch die entsprechende Kante im Stationsgraphen von s beim gleichen Zeitschritt beginnend den Wert eins annehmen. Die *koppelnden Nebenbedingungen* lauten

$$\begin{aligned}
&x^m_{(((s,i),t),((s',i'),(t+d^m_{i,l}+w^m_{i,l'}) \bmod n_T))^{(l,l')}} = y^s_{(((m,i,k),t),((m' j^s_{k'},k'),(t+d^m_{i,l}) \bmod n_T))^l},\\
&\text{für } m \in M, ((s,i),t) \in V^T_m, l \in \{0,\dots,n^d_s - 1\}, l' \in \{0,\dots,n^w_s - 1\},\\
&\text{mit } i' = (i+1) \bmod k_m, k' = (k+1) \bmod k_s, s = s^m_i, s' = s^m_{i'}, m = m^s_k,\\
&m' = m^s_{k'}.
\end{aligned} \tag{13}$$

Abschließend wird die Zielfunktion beschrieben. Für diese muss der Energieverbrauch $e^m_{((s^m_i,i),(k,k')),l}$ von Maschine $m \in M$ auf ihrer i-ten Station s^m_i (bzw. beim Transfer zur nächsten Station) im Modus (k,k') im l-ten Zeitschritt sowie der Warteenergieverbrauch e^m_w von Maschine $m \in M$ bekannt sein.

Für die Minimierung der Maximallast werden die Variable $z_t \in \mathbb{R}_+$, $t \in T$ und $z \in \mathbb{R}_+$ eingeführt, die über

$$\begin{aligned}
z_t = &\sum_{m \in M} \sum_{i=0}^{k_m-1} \sum_{k=0}^{n^d_{s^m_i}-1} \sum_{k'=0}^{n^w_{s^m_i}-1} \sum_{l=0}^{d^m_{i,k}+w^m_{i,k'}-1} \left(x^m_a \cdot e^m_{((s^m_i,i),(k,k')),l}\right)\\
&+ \sum_{m \in M} \sum_{i=0}^{k_m-1} \left(x^m_{(((s^m_i,i),t),((s^m_i,i),(t+1) \bmod n_T))} \cdot e^m_w\right),\\
&a = (((s^m_i,i),(t-l) \bmod n_T),((s^m_j,j),(t-l+d^m_{i,k}+w^m_{i,k'}) \bmod n_T))^{(k,k')},\\
&j = (i+1) \bmod k_m, t \in T
\end{aligned} \tag{14}$$

den Energieverbrauch zu jedem Zeitschritt angeben. Die Zielfunktion ergibt sich dann mit

$$z \geq z_t, \quad t \in T, \tag{15}$$

im ersten Fall als

$$\min z. \tag{16}$$

Im zweiten Fall wird der Energieverbrauch zu jedem Zeitschritt betrachtet und mit einer stückweise linearen Funktion bewertet, die an den Stützstellen die Werte einer quadratischen Funktion annimmt. Dazu werden die Variablen $q_t \in \mathbb{R}_+$, $t \in T$, eingeführt.

Sei p der Wert der ersten Stützstelle, d der Abstand zwischen den Stützstellen und r die Anzahl der Stützstellen an die quadratische Funktion, dann wird die quadratische Funktion über

$$\frac{(k+1)^2-k^2}{d} \cdot z_t - q_t \leq -\frac{(p+(k+1)d)k^2-(p+kd)(k+1)^2}{d}, k = 0, \dots, r-1, t \in T \qquad (17)$$

approximiert mit der Zielfunktion

$$\min \sum_{t \in T} q_t. \qquad (18)$$

Damit nimmt q_t für $z_t = p + kd$, $k = 0, \dots, r-1$, den Wert k^2 an.

Das vorgestellte Modell kann mit Standardlösern für ganzzahlige Optimierungsprobleme behandelt werden. Um die Lösung zu beschleunigen, sollte man die Symmetrie bezüglich des Taktes brechen, indem man festlegt, dass ein bestimmter Prozess einer Maschine zum Zeitschritt $t = 0$ beginnen soll.

4 Fallbeispiel zur energiesensitiven Optimierung und Analyse von Robotern in getakteten Fertigungsstraßen

Ausgangssituation

In diesem Fallbeispiel wird ein Ausschnitt einer getakteten Fließfertigung betrachtet. Zu dieser gehören Arbeitsstationen und Maschinen. Diese seien hier näher als Industrieroboter (nachfolgend kurz: Roboter) spezifiziert. Roboter werden hier als universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen verstanden, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei programmierbar und gegebenenfalls sensorgesteuert sind [15]. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen. Einmal programmiert, ist der Roboter in der Lage, einen Arbeitsablauf autonom durchzuführen oder die Ausführung der Aufgabe abhängig von Sensorinformationen in Grenzen zu variieren.

Die Planungen der Arbeitsstationen, der Anzahl der Roboter sowie deren Arbeitsschritte und Bewegungsabläufe seien bereits abgeschlossen. Im Mittelpunkt der folgenden (primär energiebezogenen) Betrachtung stehen die Roboter und die zeitliche Abstimmung ihrer Arbeitsprozesse innerhalb der Taktzeit, mittels derer die Lastspitze reduziert bzw. der Lastverlauf nivelliert werden soll.

Das Fertigungssystem stellt eine getaktete vollautomatisierte Fertigung mit elf Robotern und neun Stationen dar, wobei es sich bei der Station S0 um eine Lagerstation handelt. Innerhalb der Anlage wird der Materialfluss ohne spezielle Fördertechnik rea-

lisiert, das heißt, die Teile werden durch Roboter mit Greifern zwischen den Stationen bewegt. Dabei sind vier reine Handlingsroboter in Betrieb, bei denen die Bewegungsgeschwindigkeit zwei verschiedene Stufen annehmen kann. Eine zusammenfassende Darstellung des schematischen Aufbaus des Fertigungssystems enthält Bild 3.

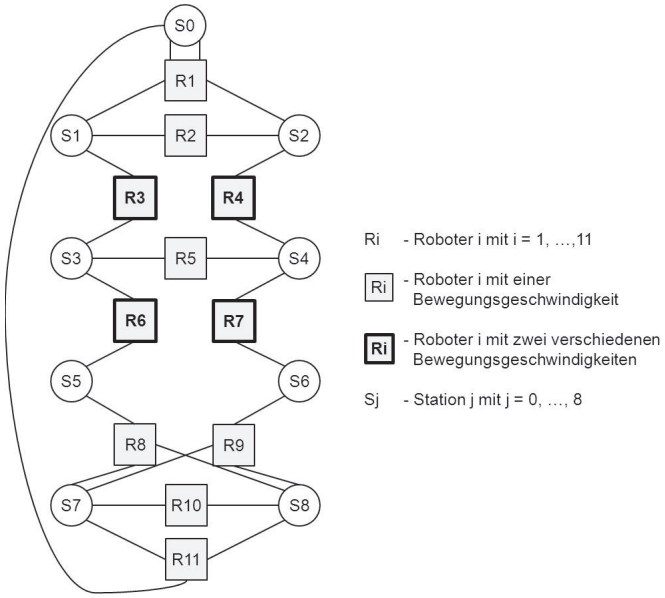


Bild 3: Aufbau des Fertigungssystems

Bezogen auf die energiebezogene Optimierung stellen die (Kennzahlen) maximale und minimale Leistung, die Leistungsspanne, aber auch der Energieverbrauch potentielle Zielgrößen dar. Bei der Verfolgung sind auf Roboter und Stationen gerichtete Restriktionen einzuhalten, die sich aus der einzuhaltenden Reihenfolge der Prozessschritte und den damit verbundenen Prozessdauern ergeben. Neben diversen anderen Parametern ist die Kenntnis des Energieverbrauchs der jeweiligen Prozessschritte erforderlich.

Die maximale Leistung, die in einem Fertigungssystem auftreten kann, ist näherungsweise über den Anschlusswert der Roboter ermittelbar. Der elektrische Anschlusswert eines Roboters beträgt ca. 8 kW. Über die gesamte Anlage ergibt sich also ein theoretischer Anschlusswert und somit eine maximale Leistung des Fertigungssystems von 88 kW. Da nicht alle Roboter gleichzeitig betrieben werden und die Lastspitze eines Roboters auch nur bei einem ganz bestimmten Prozess auftritt, sind die Lastspitzen während des Betriebs des Fertigungssystems weitaus geringer. Bei der Simulation des Fertigungssystems mit einer Taktzeit von 24 Sekunden fällt die Lastspitze mit einer Höhe von 31 kW deutlich geringer aus als der theoretische Anschlusswert. Innerhalb der Taktzeit wird elektrische Energie in Höhe von 537,43 kWs verbraucht. Die Spanne zwischen minimaler und maximaler Leistung beträgt 13,25 kW. Welchen Anteil die einzelnen Roboter am Gesamtenergieverbrauch haben, variiert von Roboter zu Roboter und hängt stark von der auszuführenden Aufgabe bzw. den auszuführenden

Prozessen ab. In die Optimierung muss daher Wissen über die Prozesse und den nutzungsabhängigen Energieverbrauch eingehen, welches mittels der Methode der zustandsbasierten Verbrauchsprofile hergeleitet worden ist [16]. In diesem Fallbeispiel werden die Betriebszustände Warten, Aufnehmen, Bewegen, Ablegen, Halten und Arbeiten für die Roboter definiert. Diese unterschiedlichen Betriebszustände bedingen eine unterschiedliche Energieaufnahme des Roboters und werden durch ein Energieverbrauchsprofil, welches die spezifische Energieaufnahme im Betriebszustand repräsentiert, charakterisiert [17]. Bis auf den Zustand Bewegen wurden für alle weiteren Zustände konstante Energieverbräuche in unterschiedlicher Höhe angenommen. Für das Bewegen wird, wie Bild 4 zeigt, ein M-förmiger Verlauf des Energieverbrauchs über die Zeit zugrunde gelegt, da dieser Zustand durch eine Phase der Beschleunigung, eine Phase mit relativ konstanter Geschwindigkeit und eine Phase des Abbremsens charakterisiert ist [14]. Für vier Roboter besteht die Möglichkeit, die Prozessdauer zu verdoppeln. Diese beiden Prozessdauervarianten unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich der Prozessgeschwindigkeit, sondern auch bezüglich des Energieverbrauchs.

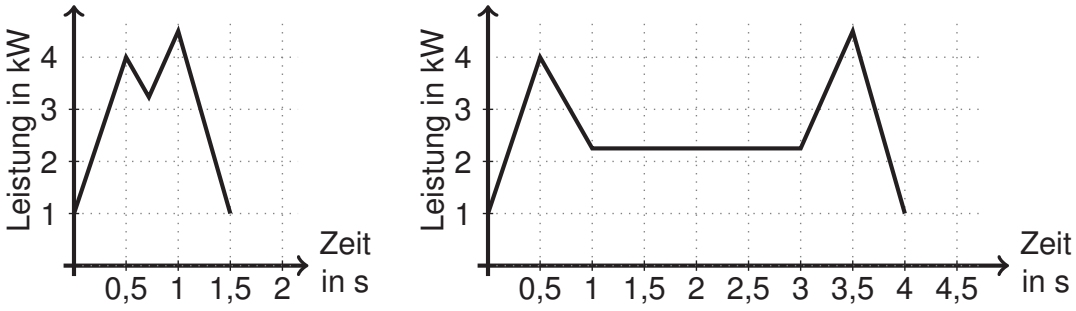


Bild 4: Visualisierung des M-förmigen Energieverbrauchs für Prozessdauern von 1,5 Sekunden (links) und 4 Sekunden (rechts) im Normalmodus der Roboter

In der Ausgangssituation arbeitet jeder Roboter seine Aufgabe so frühzeitig wie möglich ab. Zudem führen die Roboter, welche die Möglichkeit der Variation der Bewegungsgeschwindigkeit besitzen, die Bewegungsprozesse schnellstmöglich aus. Die zeitliche Verschiebung der Prozessstartzeitpunkte sowie die Nutzung der zeitlich verlängerten Bewegung sind nur realisierbar, wenn die Taktzeit größer ist als die Prozessdauer der Roboter. Dies sei hier der Fall, so dass Potentiale zur Reduzierung der Lastspitze bzw. zur Nivellierung des Lastverlaufs des Fertigungssystems bestehen.

Ergebnisse der Optimierung und Analyse

Zur Ermittlung der Ergebnisse wurde der Solver Gurobi 5.0 eingesetzt. Bei der Lösung dieser Probleme ist zu beachten, dass man die Diskretisierung nicht zu fein wählt, da sonst selbst die Berechnung der linearen Relaxation des Problems sehr viel Zeit benötigt. Für die Beispielrechnungen wurde daher folgendes Vorgehen gewählt: Zunächst erfolgt die Rechnung mit einer groben Diskretisierung. Dadurch erhält man einen Anhaltspunkt, wie die Prozesse ungefähr zeitlich liegen sollten. Das Problem

wird dann mit einer feineren Diskretisierung gelöst, wobei alle Variablen von Arbeits- und Transferkanten, die zeitlich entfernt von der Lösung bei grober Diskretisierung liegen, auf null gesetzt werden.

Für das vorliegende Fallbeispiel zeigt Bild 5 den Lastverlauf innerhalb der Taktzeit von 24 Sekunden nach der Optimierung hinsichtlich der Minimierung der Lastspitze (Zielfunktion 1, siehe (16) in Abschnitt 3) sowie bezüglich der Nivellierung des Lastverlaufs (Zielfunktion 2, siehe (18) in Abschnitt 3) im Vergleich zur Ausgangssituation.

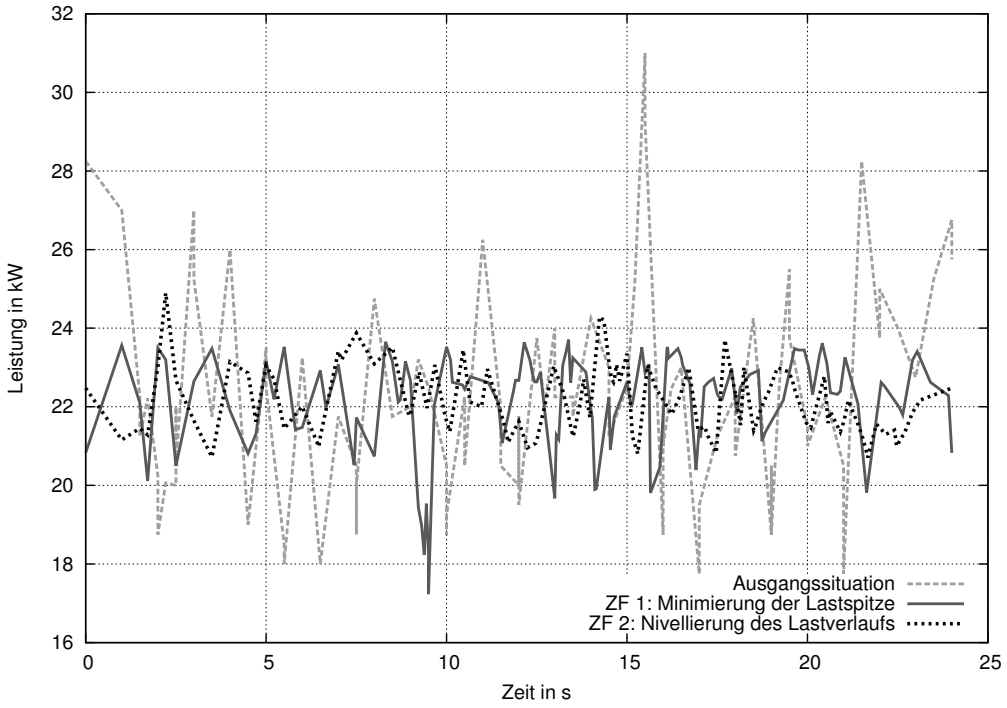


Bild 5: Vergleichende Darstellung der Lastverläufe vor und nach Optimierung

Es besteht demgemäß das Potential, durch Optimierung gemäß Zielfunktion 1 die Lastspitze innerhalb der Taktzeit um ca. 23 % gegenüber der Ausgangssituation zu senken. Auch weist in der entsprechenden Optimalkonstellation die minimale Last einen geringfügig kleineren Wert als in der Ausgangssituation auf. Bei Verfolgung der Zielfunktion 2 wird die Lastspitze gegenüber der Ausgangssituation lediglich um etwa 19 % gesenkt und zudem steigt der Minimalverbrauch um knapp 17 %. Jedoch birgt dies den Vorteil, dass die Spanne zwischen Minimal- und Maximallast um mehr als 68 % gegenüber der Ausgangssituation kleiner ist und somit der Energiebedarf des Fertigungssystems genauer und mit weniger Aufwand geplant werden kann. Außerdem können dadurch Preisvorteile bei der externen Energiebereitstellung sowie Vorteile bei der Auslegung und dem Betrieb von internen Energieversorgungssystemen entstehen. Durch die Ausnutzung der langsameren Bewegungsprozesse bei den zwei betrachteten Zielfunktionen sinkt der Gesamtenergieverbrauch pro Takt gegenüber der Ausgangssituation. Mit Hilfe der Zielfunktion 2 zur Nivellierung des Lastverlaufs werden

dabei höhere Energieeinsparungen als bei der Zielfunktion 1 zur Minimierung der Lastspitze erzielt. Die rechnerische Energieeinsparung fällt mit 0,84 % im Fallbeispiel relativ gering aus, da nur vier von elf Robotern die Möglichkeit haben, die Bewegungsgeschwindigkeit variabel durchzuführen, und die weiteren Prozessdauern der Roboter mit dem jeweiligen Energieverbrauch fest vorgegeben sind. Eine durchaus denkbare höhere Variabilität der Prozesse würde aber weitere Möglichkeiten zur Reduzierung der maximalen Leistung oder zur Nivellierung des Lastverlaufs unter anderem mittels verlangsamter Bewegungsprozesse der Roboter eröffnen. Insgesamt ist festzustellen, dass zwischen den Zielen „Minimierung der Lastspitze“, „Nivellierung des Lastverlaufs“ sowie „Minimierung des Energieverbrauchs“ weitgehend komplementäre, zum Teil aber auch konfliktäre Beziehungen bestehen.

Weiterhin soll im Folgenden untersucht werden, welche Auswirkungen die Variation der Taktzeit auf den Energieverbrauch, die Höhe der Lastspitze, die Größe der Leistungsspanne und weitere produktionswirtschaftlich relevante Größen hat. Dabei wird von der Zielfunktion 2 (zur Nivellierung des Lastverlaufs) ausgegangen, da diese, mit Ausnahme der etwas höheren Lastspitzen bei der Taktzeitvariation, zu besseren energiebezogenen Ergebnissen bezüglich Verbrauch und Leistungsspanne führt als die Zielfunktion 1 (zur Minimierung der Lastspitze). Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse wurden dabei die Auswirkungen der Variation der Taktzeit auf energie- und produktionswirtschaftliche Größen ermittelt. Die Ergebnisse wurden in Relation zur nicht optimierten Ausgangssituation mit einer Taktzeit von 24 Sekunden gesetzt und in Bild 6 graphisch aufbereitet.

Wie in Bild 6 erkennbar ist, führt eine Erhöhung der Taktzeit zu einer Erhöhung der Produktions-Durchlaufzeit, so dass pro Periode weniger Produkte hergestellt werden können. Zudem sinkt der Gesamtenergieverbrauch pro Periode, da in diesem Zeitraum weniger Takte und somit auch weniger Produktionsprozesse ablaufen. Bei einer Erhöhung der Taktzeit von 24 auf 30 Sekunden sinkt der Output pro Periode um 20 % und der Gesamtenergieverbrauch pro Periode um circa 11 %. Insgesamt lässt sich feststellen, dass mit zunehmender Taktzeit weniger energieintensive Prozesse parallel laufen und sich damit die Maximallast und die Spanne zwischen minimaler und maximaler Leistung verringern. Allerdings führt die Erhöhung der Taktzeit zwar zu einer Verringerung des Gesamtenergieverbrauchs pro Periode, jedoch steigt der Energieverbrauch pro Takt und damit auch pro Outputeinheit an. Die Energieverbrauchseinsparungen durch die Nutzung der langsameren Bewegungsprozesse fallen geringer aus als Energieverbräuche in den zusätzlichen Wartezeiten der Roboter.

Es zeigt sich also auch mit Blick auf die Veränderung der Taktzeit, dass komplementäre wie konfliktäre Beziehungen hinsichtlich der verschiedenen Energieziele bestehen. Gleiches gilt für weitere Produktionsziele, wie dies hier am Beispiel der Durchlaufzeit und des Outputs pro Periode deutlich wird. Daraus ergibt sich, dass die (energiesensitive) Steuerung von Fertigungssystemen der Bildung strukturierter Zielsysteme sowie der Analyse der Auswirkungen der bestehenden Handlungsal-

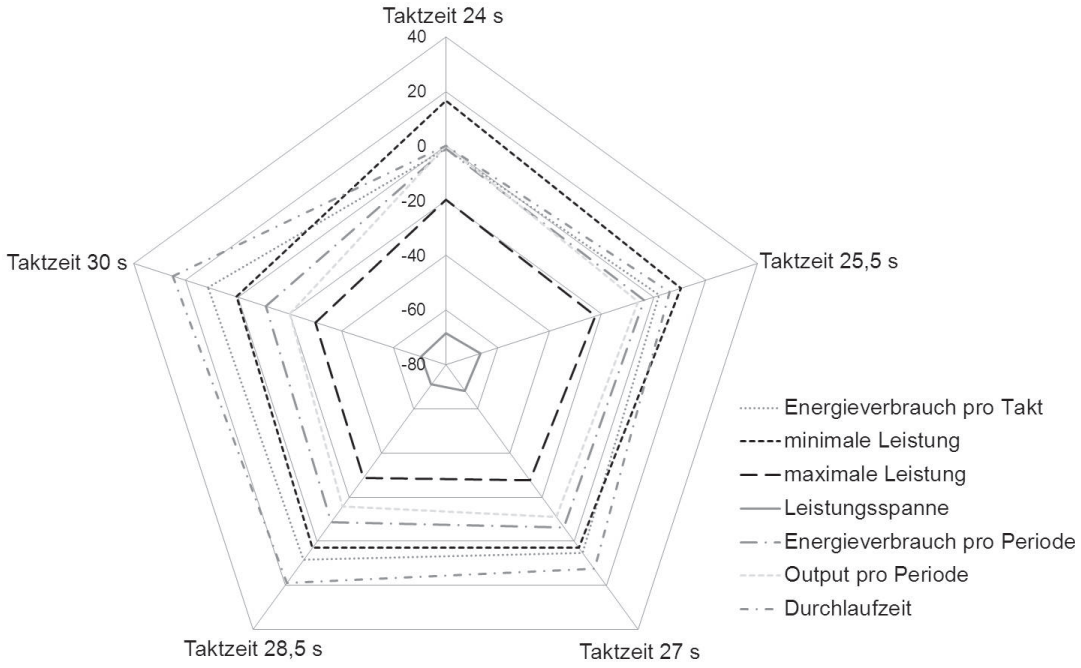


Bild 6: Veränderungen der Kennzahlen (in %) im Verhältnis zur Ausgangssituation bei Variation der Taktzeit unter Nutzung von Zielfunktion 2

ternativen auf die verschiedenen Elemente dieser Zielsysteme (bei denen es sich häufig um Kennzahlen handeln wird) erfordert. Kennzahlen sind zudem nützlich, um Einflussgrößen/Beschränkungen in den der Fertigungssteuerung dienenden Optimierungsmodellen zu berücksichtigen bzw. überhaupt Einflussgrößen zu identifizieren, deren gezielte Veränderung zu einer verbesserten Zielerreichung führen kann. Schließlich ermöglichen sie die laufende Erfassung realer Werte und deren Abgleich mit den Parametern und Zielwerten der Optimierungsmodelle, um diese validieren bzw. anpassen zu können.

5 Ausblick

Die in diesem Beitrag beschriebenen Untersuchungen sollten in mehrerer Hinsicht validiert, erweitert und vertieft werden. Bezogen auf die in Abschnitt 2 skizzierte Grundstruktur eines Kennzahlensystems erscheint dessen praktische Umsetzung (unter Nutzung des angesprochenen Vorgehensmodells) ebenso geboten wie die Vorstrukturierung (relativ) generischer energiebezogener Kennzahlensysteme für verschiedene Fertigungstypen und -bereiche und auch die vertiefte Untersuchung von Beziehungen zwischen Produktionszielen. Hinsichtlich des in Abschnitt 3 beschriebenen Optimierungsmodells gilt es, dieses um Robustheitsaspekte zu erweitern, damit Schwankungen im tatsächlichen Lastverlauf berücksichtigt werden können. Schließlich bietet auch das im vierten Abschnitt behandelte Fallbeispiel vielfältige Möglichkeiten

einer Erweiterung und Verfeinerung und zwar unter anderem hinsichtlich des zugrunde liegenden Fertigungssystems, der in diesem vorliegenden Handlungsmöglichkeiten, der Schnittstellen zur Logistik und auch der Auswirkungen auf die gesamten Fertigungskosten.

Acknowledgement

Die Autoren danken der europäischen Union (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) und dem Freistaat Sachsen für die Förderung des Spitzentechnologieclusters „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“ (eniPROD®).





Literaturverzeichnis

[1] *Prognos AG: Potenziale für Energieeinsparung und Energieeffizienz im Lichte aktueller Preisentwicklungen, Basel, Berlin, 2007*

[2] *Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.: Energieeffizienz in der Produktion – Untersuchung zum Handlungs- und Forschungsbedarf, im Auftrag des Bundesumweltministerums für Bildung und Forschung, Chemnitz, 2008*

[3] *Reichmann, T.: Controlling mit Kennzahlen. Die Systemgestützte Controlling-Konzeption mit Analyse und Reportinginstrumenten, 8. Aufl., München, 2011*

[4] *Troßmann, E.: Kennzahlen als Instrument des Produktionscontrolling. In: Corsten H. (Hrsg.): Handbuch Produktionsmanagement, Wiesbaden, 1994, S. 517-536*

[5] *Corsten, H.; Lingnau, V.: Die Balanced Scorecard als Rahmenkonzept für ein produktionswirtschaftliches Value Reporting, Schriften zum Produktionsmanagement Nr. 66, TU Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2004*

[6] *Hildebrand R.; Mertens, P.: PPS-Controlling mit Kennzahlen und Checklisten, Berlin, Heidelberg, 1992*

[7] *Spieker, K.: Operatives Produktions-Controlling. Unter besonderer Berücksichtigung des Mittelstandes, Frankfurt am Main u. a., 1998*

[8] *Hahn, D.; Laßmann, G.: Produktionswirtschaft. Controlling industrieller Produktion, Band 3, 2. Teilband: Informationssystem, Heidelberg, 1993*

[9] Bauer, U.: Kennzahlensystem zum betrieblichen Energiemanagement, Graz, 1988

[10] Nosko, H.: Rationelle Energieverwendung im Industriebetrieb: Technisch-organisatorische, ökonomische und ökologische Grundlagen unternehmerischer Energiepolitik, Berlin, 1986

[11] Bonneschky, A.: Energiekennzahlen in PPS-Systemen: Integration energiewirtschaftlicher Aspekte in Systeme der Produktionsplanung und Steuerung, Berlin, 2002

[12] Götze, U.; Krönert, S.; Mikus, B.: Kennzahlensysteme als Instrument des Produktionscontrolling. In: Der Betrieb, 2010, 51(2), S. 10-17

[13] Skutella, M.: An Introduction to Network Flows over Time. In: Research Trends in Combinatorial Optimization, 2009, S. 451–482

[14] Lorenz, S.; Hesse, M.; Fischer, A.: Simulation and Optimization of Robot Driven Production Systems for Peak-Load Reduction. In: Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference

[15] VDI-Richtlinie 2861: Montage und Handhabungstechnik. Kenngrößen für Industrieroboter Achsbezeichnungen

[16] Dietmair, A.; Verl, A.; Wosnik, M.: Zustandsbasierte Energieverbrauchsprofile – Eine Methode zur effizienten Erfassung des Energieverbrauchs von Produktionsmaschinen. In: wt, 2008, 98(7/8), S. 640-645

[17] Weinert, N.: Planung energieeffizienter Produktionssysteme. In: ZWF, 2010, 105(5), S. 503-507