

Virtuelle Steuerung eines verteilten Energiemanagements

Jörg Reiff-Stephan*

Zusammenfassung

Energiemanagementaufgaben finden zunehmende Berücksichtigung für einen effizienten Betrieb von Produktionsanlagen. Kostenreduktion bei hoher Prozessstabilität ist hierbei eine wesentliche Aufgabenstellung zur Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfähigkeit sowie zur Erfüllung von normativen wie auch gesetzlichen Rahmenbedingungen dar. Der vorliegende Beitrag zielt auf die Vorstellung eines Ansatzes zur Implementierung eines derartigen Managementsystems am Beispiel einer Thermoprozessanlage. Hierzu wird insbesondere das als Jidōka aus dem TPS bekannte Prinzip mit selbstadaptierender Grenzwertsetzung aufgenommen und eine Ausführungsmöglichkeit prototypisch vorgestellt.

Abstract

Manufacturing facilities must increasingly take the energy management into account for operating efficiently within a production process. Future efforts and solutions will focus on improvement of process stability and cost reduction to meet the needs of successfully competing in local and global markets, especially for small and medium-sized enterprises. This paper describes an approach for manufacturing facilities using an example for thermo-processing equipment. For this purpose, the Jidōka principle of the Toyota Production System (TPS) is used, prototypically presenting the mechanism of the self-adapting limit setting as well as its implementation.

1. Einführung

Um den Herausforderungen zukünftiger Wertschöpfungsnetzwerke gewachsen zu sein, sind produzierende Unternehmen in verstärktem Maße auf die Erfassung energetischer Daten sowie deren Verarbeitung in effizienten Prozessketten angewiesen (Blesl & Kessler 2013, Tönsing 1996, Kahlenborn et al. 2012, Weinert 2010). Somit gewinnen industrielle Energiemanagementsysteme zunehmend an Bedeutung. Die informationstechnische Vernetzung der Produktionsprozesse wird hierbei durch die Strategien und Befähiger der Industrie 4.0 stark vorangetrieben. Prozess- und Serviceorientierung, Interoperabilität, horizontal und vertikal vernetzte Informationsketten wie auch Datenübertragungssysteme, die bei hoher Verfügbarkeit in Echtzeit fungieren, sind hierzu einige der Bausteine für ein (energie-)effizientes Produktionssystem (MetamoFAB 2016). Zieht man die unter Federführung der acatech ent-

standene Studie (acatech 2016) hinzu, so sind die drei wesentlichen Entwicklungsfelder Datenauswertung und -analyse, Prozessmanagement sowie Kundenbeziehungsmanagement zu benennen. In diesem Umfeld werden im Folgenden Ansätze aufgezeigt, die erste Implementierungsmaßnahmen zu einem effizienten Energiemanagement ermöglichen könnten.

2. Anforderungsanalyse

2.1 Aufgabenbereiche

Für eine Erweiterung bestehender produktiver Strukturen um die Funktionalität eines Energiemanagements ist es erforderlich, sich ein klares Bild zu verschaffen, welche Möglichkeiten das bestehende Produktionssystem bereits aufweist. Die oben angeführte acatech-Kompetenzstudie macht deutlich, dass das Prozessmanagement wie auch die Prozessorientierung in der deutschen Wirtschaft offensichtlich noch unzureichend gelöste Herausforderungen dar-

stellen, obwohl diese unabhängig von Industrie 4.0 bereits lange als solche bekannt sind (acatech 2016).

Wesentlich wird es sein, sich über die Aufgaben des Energiemanagements in der Umsetzung der DIN EN ISO 50.001 bzw. DIN EN 16247-1 im Klaren zu sein (Abb. 1). Primäre betriebswirtschaftliche Größen wie beispielsweise der Energiepreis oder Kennzahlen zur Wettbewerbsfähigkeit sind hierbei als den rechtlichen und normativen Anforderungen, die aus der Ressourcenknappheit und Umweltbelastung resultieren, gleichrangig zu betrachten. Nicht zuletzt der Ausweis als energie-schonendes Unternehmen kann eine Verbesserung des eigenen Images bewirken. Wichtig ist, dass dieser Prozess des Analysierens und Ableitens als kontinuierlicher Prozess der Verbesserung des Produktionssystems berücksichtigt wird. Primäre Zielsetzungen beschreiben hierbei die Energiekostenreduzierung wie auch die Aufrechterhaltung eines stabilen, verfügbaren Prozesses.

* korrespondierender Autor

2.2 Befähiger

Für eine effiziente Führung energietischer Prozesse ist die Aufnahme, Übertragung und Verarbeitung von energierelevanten Kenngrößen eine entscheidende Anforderung. Die rapide sich entwickelnde Digitalisierung der Wertschöpfungsnetzwerke bietet hierfür hervorragende Ansatzpunkte. Die informationstechnische Integration der Dinge (technische Entitäten), Daten und Dienste (iD3) hat hierbei sowohl eine vertikale als auch eine horizontale Ausprägung (Lipinski et al. 2014). Es entstehen cyberphysische Produktionssysteme (CpPS), die den Verbund der informations- und softwaretechnischen Komponenten mit den mechanischen und elektronischen Entitäten beschreiben (Dorst et al. 2015).

Im Detail umfasst die vertikale Integration in diesem Kontext die automatisierte Entscheidungsfindung über die Ebenen der Automatisierungspyramide hinweg, um beispielsweise Anpassungen von technologischen Informationen zu technischen Entitäten (wie Motoren oder Ofensysteme) direkt am Einsatzort für Regelinformationen nutzbar zu machen. Dahingehend erfolgt die horizontale Integration entsprechend so, dass operative Informationen aus den Diensten (z. B. mit Hilfe von Energie-Monitoring-Systemen) zusammen mit Kontextinformationen (z. B. Bereitstellungsinformationen der Energiebörse) ohne Stopp rückwärts entlang der Wertschöpfungskette direkt in die jeweilige Produktion einfließen. Diese Integration überwindet dabei auch intelligent Unternehmensgrenzen, so dass jeder Kommunikationspartner flexibel entscheiden kann, welche Datengranularität bereitgestellt wird. Weiterhin könnten beispielsweise Energiebereitsteller vorwärtsgerichtet in Echtzeit Informationen über die Anforderungen bei ihren Abnehmern erhalten.

An Methoden und Werkzeugen zum Abfragen und Bereitstellen der Daten in Echtzeit wird hierbei intensiv gearbeitet. Es gibt mehrere Protagonisten, die durch Standardisierungsbemühungen versuchen, eine entsprechende allgemeine Lösung anzubieten. Derzeit realisiert diese harten Echt-

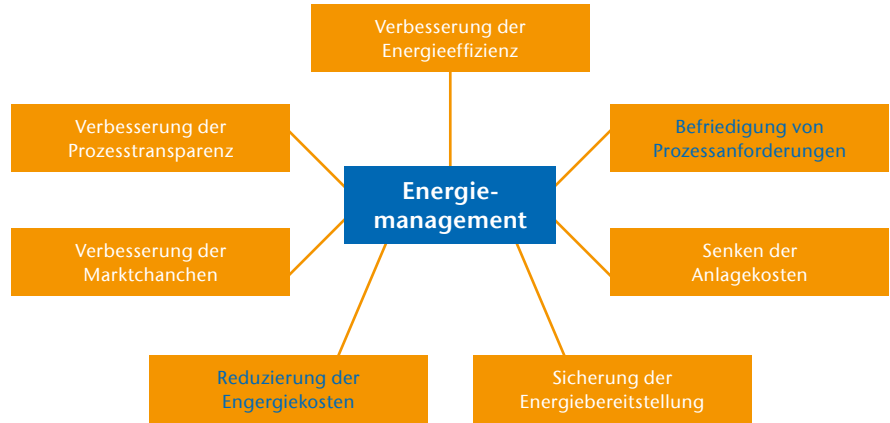


Abb. 1) Aufgaben von Energiemanagementsystemen.

zeitanforderungen für verteilte Systeme bis auf Applikationslevel der Standard DDS (Data Distribution Service) der Object Management Group (Object Management Group 2015). Der Standard ist als Open Source in vielen Bereichen weiterentwickelt worden, kann aber aufgrund seiner spezifischen Ausrichtung nicht an allen Stellen innerhalb des Informationsnetzwerkes Anwendung finden. Dahingehend ist das Standard-OPC-UA (Open Platforms Communication – Unified Architecture) der OPC Foundation ein sehr breit aufgestelltes industrielles M2M-Kommunikationsprotokoll (OPC Foundation 2015). Seine serviceorientierte Architektur (SOA) ermöglicht die Vermittlung von Datenpaketen zwischen den verschiedenen Teilnehmern basierend auf dem OSI-Schichtenmodell. Die Implementierung eigener Security-Dienste kann so sehr effizient erfolgen. Die derzeit noch einer breiten Anwendung entgegenstehende fehlende Zeitskalierbarkeit wird innerhalb einer ISO-Arbeitsgruppe der IEEE802.1 aufgegriffen. Der Bereitstellung der Informationen mit einem zeitsynchronen Protokoll soll in einem harten Echtzeitsystem, „Time Sensitive Networks“ (TSN) genannt, Rechnung getragen werden. Welcher Standard in Zukunft seine Anwendung in der CpPS-Applikation findet, wird sich anhand der Anforderungen an die eigentlichen Anwendungen entscheiden.

Die effiziente Verarbeitung der übertragenden Informationen wird im CpPS-System mitunter durch die Prinzipien der Selbstorganisation geregelt. Dies erfolgt beispielsweise mit Hilfe

von Kapazitätsbörsen oder dienstorientierten Agentensystemen. Derartige Systeme regeln den Verbrauch verfügbarer Ressourcen entsprechend festgelegter oder dynamisch erzeugter Gewichtungen und reagieren dynamisch auf sich ändernde Rahmenbedingungen. Je nach Prozess bleibt jedoch die Entität Mensch als Entscheidungsträger erhalten. In solchen Fällen erfährt der Mensch Unterstützung durch das selbstorganisierte System in Form von simulierten Varianten verschiedener Szenarien. Die endgültige Auswahl bleibt dann dem Menschen vorbehalten (MetamoFAB 2016).

3. Konzeptbetrachtung

Ausgehend von der Betrachtung zur verteilten Steuerungsarchitektur wird ein Konzept zum Energiemanagement vorgestellt, das den beiden anvisierten Themenstellungen Kostenreduktion und hohe Prozessstabilität gerecht wird.

3.1 Verteilte Steuerungsarchitektur

Wertschöpfungsprozesse in einem Produktionssystem sind durch die Umwandlung von Energie gekennzeichnet. Im überwiegenden Sinne werden alle nutzbaren Energieformen auf eine Bereitstellung elektrischer Energie zurückgeführt. Umwandlungs- und Nutzungsprozesse werden hierbei geregelt mit Steuerungs- und Sensorik/Aktorik-Entitäten an den verteilten Einsatzstellen im Wertschöpfungsprozess. Diese Entitäten können im Rahmen verteilter Architekturen in einem heterogenen Produktionsum-

feld künftig dynamisch an veränderte Prozessbedingungen angepasst, neu angeordnet oder ergänzt werden.

Eine Hardware-SPS könnte so zukünftig an Bedeutung verlieren, da Sensoren und Aktoren mit Hilfe IP-basierter Adressierung über standardisierte Kommunikationsknoten mit der Steuerungssoftware in der Cloud interagieren können (Abb. 2). Die Implementierung von neuen Feldgeräten verursacht nur noch einen minimalen Aufwand hinsichtlich der Verdrahtung. Dieser beschränkt sich dann auf die Verbindungen zur Energieversorgung und zum Kommunikationsknoten. Im Fall von energieautarken Funksensoren entfällt die Verdrahtung völlig. Die industrielle Cloud der Produktionsautomation wird aller Voraussicht nach eine private bzw. hybride Struktur aufweisen (Langmann & Stiller 2015, Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen 2016). Das Steuerungsnetzwerk wird somit vorzugsweise auf die Unternehmensgrenzen begrenzt sein, jedoch einen bedarfsgerechten Informationsaustausch mit anderen Netzwerken zulassen.

Mit den IP-basierten Entitäten wird die Realisierung der horizontalen und der vertikalen Integration im Produktionsnetzwerk möglich. Das in Abb. 2 vorgestellte System nimmt als Beispiel einen Industrieofen auf und verknüpft die wesentlichen Einzelprozesse zum Betreiben desselben im digitalen Netzwerk. Die Idee einer virtuellen SPS ist hier bereits mit aufgegriffen, sie ist jedoch nicht unabdingbare Voraussetzung für ein Energiemanagement

(Langmann & Stiller 2015). Der regulierte Zugang aus den Cloudsystemen außerhalb des eigenen Unternehmens wie auch innerhalb der eigenen Datenstrukturen muss durch den Schutz der Daten und Diensten gegen Missbrauch wie unbefugten Zugriff, Veränderung oder Zerstörung gewährleistet werden. Die Ziele von Maßnahmen zur Angriffssicherheit sind dahingehend die Erhöhung der Vertraulichkeit, der Integrität und der Verfügbarkeit.

3.2 Ableitung von Führungsaufgaben

Die Prozessabläufe werden unter betriebswirtschaftlichen Anforderungen in einem zunehmend hohen Maße material- und energieeffizient ausgeführt. So kann beispielsweise das energetische Profil eines Prozessschrittes als Entscheidungsfaktor in Produktionsplanungsvorgängen einfließen, wodurch Lastspitzen im fabrikinternen Energienetz vermieden werden (Weinert 2010). Lastspitzen sind hierbei mitunter auf Einschaltprozesse von Maschinen und Anlagen zurückzuführen. Oftmals wird das durchschnittliche Lastprofil des eigentlichen Produktionsprozesses um ein Vielfaches überschritten. Da die Maximalwerte im Lastprofil die energetischen Bereitstellungskosten direkt beeinflussen, bietet ein intelligentes Lastmanagement hohes Potential zur Kostenreduktion (Tönsing 1996).

Mit dem Wissen um die kostenoptimale Bereitstellung der elektrischen Energie an der Energiebörse kann eine Auftragseinstellung in den Produktionsprozess erfolgen. Hierzu kann über

Agenten die Preisentwicklung an der Börse automatisiert beobachtet und der wartende Prozess für die Auftragsabwicklung freigegeben werden.

Dem weiteren Aspekt der Prozessstabilität wird durch die genaue Kenntnis der aktuellen Energiebedarfe von Produktionsanlagen, Maschinen und einzelnen Baugruppen und die damit mögliche, vergleichende zeitliche Betrachtung Rechnung getragen, um beispielsweise Wartungs- und Instandhaltungsprozesse unterstützen zu helfen (Langlois 2002, Niggemann et al. 2014). Hierzu wird die Detektion anormaler Anlagenzustände anhand der Trendanalyse energetischer Daten herangezogen. Voraussetzung hierfür ist die Befähigung der bestehenden technischen Entitäten zur Erfassung entsprechender Daten. Diesbezüglich bietet der Markt eine Vielzahl an Lösungen zur Umsetzung. Ein Vergleich der Lösungen zeigt auf, dass für den jeweiligen Anwendungsfall das geeignetste System zu identifizieren ist (Lipinski et al. 2014).

Durch die genauen Kenntnisse der aktuellen und zukünftigen Energiebedarfe von Produktionsanlagen, Maschinen und einzelnen Baugruppen kann eine Verarbeitung der Daten beispielsweise unter Nutzung des durch das TOYOTA-Produktionssystem (TPS) unter dem Begriff Jidōka (Autonoma-tion) vorgestellten Prozessführungs-konzeptes erfolgen. Hierbei werden im Falle einer Störung durch ein automatisiertes Stoppen des Produktionsprozesses

- ein herstellungsbedingter Ausschuss,
- eine Beschädigung der Produktionsanlage sowie
- weitere Verschwendungen wie Energieineffizienzen,

vermieden. Für einen stabilen Prozess wird diese als selbstoptimierendes System ausgelegte Stopp-Strategie ergänzt durch Entscheidungsregeln zur Unterstützung von Wartungs- und Instandhaltungsprozess.

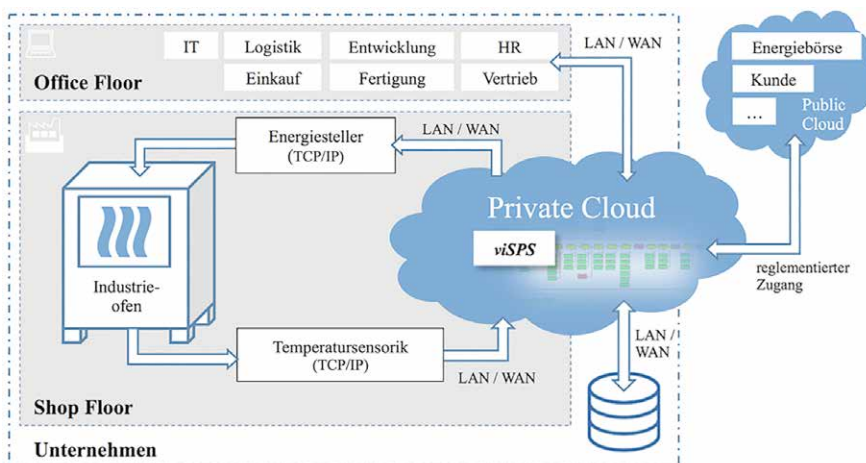


Abb. 2) Informationsfluss einer Thermoprozessanlage mit cloudbasiertem Führungssystem.

4. Applikation

4.1 Prototypischer Aufbau

Das Spektrum für Applikationen zur Nutzung energetischer Daten ist breit gefächert. Ein mit einem Industriepartner definiertes Anwendungsszenario, welches die zuvor genannten Aspekte vereint, ist beispielsweise die Verbesserung der Energieeffizienz an einer Thermoprozessanlage (siehe auch Abb. 2). Die Nutzungsdauer von Thermoprozessanlagen ist mit einer Betriebsdauer von bis zu 30 Jahren sehr lang. In Bezug auf die mitunter veralteten Technologien bietet sich hierbei ein hohes Potential zur Reduktion des Energiebedarfs durch Optimierungsmaßnahmen. Neben der Optimierung des Ofenwandaufbaus oder der Beheizungstechnik führt unter anderem auch eine intelligente Steuerungs- und Regelungstechnik zur Verbesserung der Energieeffizienz sowie zu einer höheren Prozessstabilität. Energetische Daten können hierbei direkt als Informationen für die Steuerungs- und Regelungsprozesse der Thermoprozessanlage dienen, aber als Entscheidungskriterium für übergeordnete Funktionen der Produktionsplanung und Steuerung zum Einsatz kommen. Die Umsetzung der beschriebenen Optimierung wird anhand eines Labordemonstrators prototypisch verdeutlicht. Als Thermoprozessanlage wurde hierbei bewusst ein Laborofen des Typs VD der Firma Mihm-Vogt & Co gewählt. Dieser ältere Bautyp wurde hinsichtlich der sensorischen Komponenten erneuert, um die Tauglichkeit der Optimierungsmaßnahmen für Anwendungen mit Brownfield-Charakter zu prüfen. Ein erster Versuchsaufbau ist in Abb. 3 dargestellt.

Die verbindungsprogrammierte Steuerung wurde durch eine modularisierte, speicherprogrammierbare Steuerung des Typs X20 der Firma B&R AUTOMATION GMBH ersetzt. Die Konfiguration wurde erweitert mit einer Energiemesskarte des Typs X20AP3131 und einem Analogmodul zur Einbindung der Temperatursensorik. Die Einkopplung der Lastströme erfolgt über einen Stromwandler vom Typ ASRD 14 3X80/5A der Firma MBS AG. Die Verwendung des Stromwandlers vereinfacht später die Umsetzung auf die

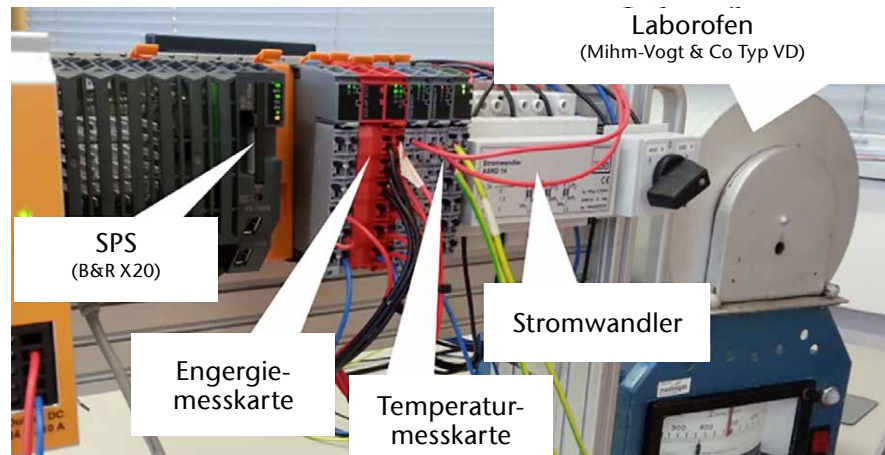


Abb. 3) Prototypischer Versuchsaufbau.

reale Prozessanlage. Logisch erfolgt die Bereitstellung der Daten über eine OPC-UA-Schnittstelle aus der Steuerung heraus. Eine Sicherung der Daten wird über eine relationale MS[®]SQL-Datenbank gewährleistet. Aus dieser können die erforderlichen Regeln für übergeordnete Steuerungsaufgaben sowie die Visualisierung inklusive der Kennzahlenbildung und der Echtzeitgraphen abgeleitet werden.

4.2 Selbstadaptierende Führung

Wie ausgeführt, kann zur Aufrechterhaltung der Prozessstabilität bei optimaler Energiepreisnutzung das Jidōka-Prinzip Anwendung finden. Für die betrachtete Applikation ist eine Führungsgröße beispielsweise die benötigte Energiemenge zur Durchführung eines thermischen Fertigungsprozesses. Der Prozess-Ist-Wert wird kontinuierlich erfasst und dem energetischen Fingerabdruck des zu fertigenden Produkts zugeordnet wie auch übergeordneten Steuerungsprozessen als Leistungskennzahl zur Verfügung gestellt. Mittels Trendanalyse können die Daten dann für die Erhöhung der Energieeffizienz der Thermoprozessanlage genutzt werden.

Wird etwa für die Produktion von einzelnen Werkstücken oder Losen bei gleichen Prozessparametern, für den thermischen Fertigungsprozess ein anhaltend höherer Energiebedarf festgestellt, kann dies auf anormale Anlagen- und Prozesszustände hinweisen. Der erhöhte Energiebedarf ist dann beispielsweise auf die ungünstige Parametrierung vorgelagerter Prozesse, unerkannte Wärmebrücken oder den

Verschleiß der Heizelemente bzw. des Wandaufbaus im Inneren des Ofens zurückzuführen. Durch eine Trendanalyse erfolgt der Abgleich historischer Daten mit der aktuellen Zustandsüberwachung. Überschreiten die Werte die Warngrenze, wird automatisiert ein Inspektionsauftrag ausgelöst, um der Aufgabe der Aufrechterhaltung der Prozessstabilität Rechnung zu tragen. Kommt es zur Überschreitung von Eingriffsgrenzen, wird der Prozess automatisiert gestoppt und es kann nach den Ursachen für die divergierenden Energiewerte gesucht werden.

Exemplarisch für den beschriebenen technologischen Prozess kann ein selbstadaptierendes Regelungsmodell spezifiziert werden. Unter Nutzung des Prozessparameters „Wirkleistung“ (P_w) kann eine Führung unter den Zielkriterien Energieeffizienz aber auch als Anpassung von Eingriffs- und Selbstabschaltungsgrenzen beschrieben werden. Hierbei werden mit Kenntnis der Ist-Werte $P_w(t)$ und einer betriebsschichtweisen Trendanalyse eine Warn- (ϵ_a) und eine Abschaltgrenze (ϵ_h) als regulierendes Element spezifiziert und in die Prozesssteuerung implementiert (Abb. 4). Das Führungssystem wird gleichermaßen befähigt, diese Grenzen auf der Basis vorangegangener Prozesszeiträume anzupassen. Hierzu wird folgender funktionaler Zusammenhang getroffen:

Warngrenze:

$$\lim_{t \rightarrow t_1} f(t) = P_w(t) + \epsilon_a \quad (1)$$

Haltegrenze:

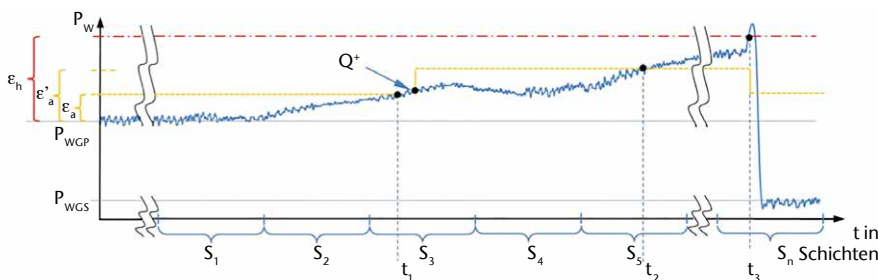
$$\lim_{t \rightarrow t_2} f(t) = P_w(t) + \epsilon_h \quad (2)$$

Wesentliches Kriterium wird neben der Energie auch die Grundaussage zur Ursache des erhöhten Energieaufwandes sein. In der Diskussion nach Abb. 4 zeigt sich, dass über den Betrieb von zwei Schichten (S_1 und S_2) die Leistungsaufnahme (auf Grundlastniveau P_{WCP}) zum kontinuierlichen Betrieb annähernd stabil bleibt. Innerhalb der dritten dargestellten Periode konvergiert der Funktionswert $f(t) = P_w(t)$ mit dem Grenzwert $f(t_1) = P_w + \varepsilon_a$. Zum Zeitpunkt t_1 und mit Erreichen des Grenzwertes wird demnach eine Alarmmeldung automatisch ausgegeben und eine Prüfung der Anlage initiiert. Eine Quittierung des Signales ohne entsprechende Einflussnahme (Q^+) seitens des Bedienpersonals führt zu einer selbstadaptiven Grenzwertanpassung innerhalb des Führungssystems von $\varepsilon_a' = \varepsilon_a + \xi_s \iff \xi_s \in x$ mit $x =$ Schrittweite. Der weitere Betrieb der Thermoprozessanlage in den Folgeschichten wird mit angepasstem Grenzwert getätigt. Der erweiterte Fall der Überschreitung der Haltegrenze nach Gleichung 2 führt zur selbsttätigen Stillsetzung der Anlage durch das Führungssystem und damit zu einem Sinken der Leistungsaufnahme auf das Grundlastniveau der Steuerung (P_{WCS}). Dieser Fall tritt ein, wenn bei Überschreiten der Warngrenze (ε_a) ein Weiterbetrieb der Anlage über Folgeschichten S_n (mit $n \in \{6..m\}$) getätigt wird und durch einen sprunghaften Anstieg der relevanten Prozessgröße zum Zeitpunkt t_3 die Grenzüberschreitung ε_h eintritt. Prozessbedingt kann dies infolge von verspäteten Reaktionszeiten durch das Instandhaltungspersonal zu-

stände kommen. Nach einer automatischen Stillsetzung der Anlage wird der Grenzwert für die Warngrenze (ε_a) durch das Führungssystem selbsttätig auf den ursprünglichen Wert zurückgesetzt.

5. Zusammenfassung

Das Energiemanagement findet zunehmende Berücksichtigung in der Auslegung und dem Betrieb von agilen Produktionssystemen. Insbesondere wird das Jidōka-Prinzip, im Sinne des TOYOTA-Produktionssystems, durch die erweiterten, technologischen Möglichkeiten von cyberphysischen Systemen vorangetrieben. Aufgrund der forcierten Vernetzung industrieller Strukturen steht so beispielsweise für automatisierte Abschaltvorgänge zunehmend ein breites Spektrum an Daten zur Verfügung. Somit kann die Detektion anomaler Anlagenzustände anhand von Trendanalysen energetischer Daten erfolgen. Voraussetzung hierfür ist die Befähigung der bestehenden technischen Entitäten zur Erfassung entsprechender Daten und zu deren Auswertung. Das vorgestellte SPS-orientierte Gesamtkonzept ermöglicht neben der Messung der energierelevanten Prozesskenngröße die Bereitstellung über eine flexible MS^{SQL}-Datenbank und OPC-UA-Anbindung an die Steuerungsplattform. Zukünftig werden so auch die Auslegung und Integration eines virtuellen Prozessrechners in eine Private Cloud des Anlagenbetreibers angestrebt. Ziel wird die Steigerung der Flexibilität zukünftiger Produktionsanlagen bei hoher Prozess-, Daten- und Dienstverfügbarkeit sein.



- P_{WCP} = Grundlastniveau der Wirkleistung während des Produktionsprozess
- P_{WCS} = Grundlastniveau der Steuerung Q^+ = Quittierung der Grenzwertüberschreitung
- ε_a = Grenzwert Alarm ε_a' = Grenzwert Alarm adaptiert ε_h = Grenzwert Halt
- t_1 = Zeitpunkt Überschreitung ε_a t_2 = Zeitpunkt Überschreitung ε_a' t_3 = Zeitpunkt Überschreitung ε_h

Abb. 4) Funktionaler Zusammenhang selbstadaptierende Grenzwertsetzung.

LITERATUR

acatech (2016) Kompetenzentwicklungsstudie Industrie 4.0. Erste Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Blesl M, Kessler A (2013) Energieeffizienz in der Industrie. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642365140

Dorst W, Glohr C, Hahn T, Knaffa F, Loewen U, Rosen R, Schiemann T, Vollmar F, Winterhalter C (2015) Umsetzungsstrategie Industrie 4.0: Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0. BITKOM e. V., VDMA e. V., ZWEI e. V., Frankfurt (Main)

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (2016) Projekt Picasso. Industrielle cloudbasierte Steuerungsplattform für eine Produktion mit cyber-physischen Systemen. <http://www.projekt-picasso.de/>. Accessed 27 Jul 2016

Kahlenborn W, Kabisch S, Klein J, Richter I, Schürman S (2012) Energiemanagementsysteme in der Praxis. ISO 50001: Leitfaden für Unternehmen und Organisationen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Umweltbundesamt, Berlin, Dessau

Langlois RN (2002) Modularity in technology and organization. Journal of Economic Behavior & Organization 49(1):19–37. doi: 10.1016/S0167-2681(02)00056-2

Langmann R, Stiller M (2015) Industrial Cloud – Status und Ausblick. HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik 52(5):647–664

Lipinski R von, Richter M, Reiff-Stephan J (2014) Intelligent sensor systems for self-optimizing production chains. In: Proc 1st Int Conf Exhib Future RFID Technol (FutureRFID 2014), 6–7 Nov 2014, Eger. Eszterházy Károly University of Applied Sciences, ISBN: 978-615-5509-23-0, pp 115–125. doi: 10.17048/FutureRFID.1.2014.115

MetamoFAB (2016) MetamoFAB. Metamorphose zur intelligenten und vernetzten Fabrik. <http://metamofab.de/>. Accessed 14 Aug 2016

Niggemann O, Jasperneite J, Vodencarevic A (2014) Konzepte und Anwendungsfälle für die intelligente Fabrik. In: Bauernhansl T, ten Hompel M, Vogel-Heuser B (eds) Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung · Technologien · Migration. Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-04681-1, pp 173–190. doi: 10.1007/978-3-658-04682-8_9

Object Management Group (2015) Data Distribution Service (DDS). V 1.4. <http://www.omg.org/spec/DDS/>. Accessed 14 Jul 2016

OPC Foundation (2015) Unified Architecture. Part 1: Overview and Concepts. Version 1.03. <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-unified-architecture/part-1-overview-and-concepts>. Accessed 14 Aug 2016

Tönsing E (1996) Energiekostenreduzierung durch betriebliches Energiemanagement. Fachartikel im Rahmen der Initiative „Energie effizient nutzen – Schwerpunkt Strom“. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Stuttgart, Karlsruhe

Weinert N (2010) Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Fraunhofer-Verlag, Stuttgart. ISBN: 978-3-8396-0173-0

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Jörg Reiff-Stephan
 Technische Hochschule Wildau
 Institut für Entwicklung, Material und Produktion (IMEP)
 Forschungsgruppe: Automatisierungstechnik

E-Mail für Korrespondenz:
 joerg.reiff-stephan@th-wildau.de

