Mess- und Automatisierungstechnik für die energieeffiziente Produktion (*Measurement and automation technology for the energy-efficient production*)

Müller, E.[1]; Löffler, Th.[2]

[1] *TU Chemnitz, Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb*
[2] *TU Chemnitz, Professur Arbeitswissenschaft und Innovationsmanagement*

Abstract

Hohe Energieverbräuche in der Produktion gehen oft auf produktionsorganisatorisch-produktionstechnische Defizite zurück. Dazu zählen u. a. Leerlauf-, Teillast- und Standby-Verluste in Folge ungeeigneter Steuerungsmodi oder der falschen Dimensionierung energieverbrauchender Anlagen. Die Mess- und Automatisierungstechnik kann wesentlich dazu beitragen, solche Verschwendungen zu identifizieren und energiesparende Betriebsweisen umzusetzen. Der Artikel beschreibt Konzepte des Energiemonitorings und der energiesensitiven Steuerung von Produktionsanlagen, wie sie insbesondere in der diskreten Fertigung und Montage – etwa in der Automobilindustrie – angewendet werden.

High energy consumptions in the production can often be traced back to deficits of production organization and/or technologies like no-load, part load and standby losses as a consequence of inappropriate control modes or wrong dimensioned energy-consuming equipment. The measurement and automation technology can significantly contribute to the identification of such losses and to the implementation of energy-saving modes of operation. This article discusses respective concepts of energy monitoring and energy-sensitive control of manufacturing equipment which are applied particularly in the processes of discrete manufacturing and of assembly (e. g., in the automotive industry).

Keywords:

Mess-/Automatisierungstechnik, Energiemonitoring, energiesensitive Steuerung

measurement/automation technology, energy monitoring, energy-related controlling

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

1 Einleitung

Auf Grund der hohen Energiepreise und der Anforderungen aus dem Klimaschutz wird Energiesparen für viele Unternehmen zu einem Gebot der Stunde. Neben bekannten Einzelmaßnahmen wie dem Einsatz von hocheffizienten Antrieben (Effizienzklasse IE2 bis IE4), der Wärmerückgewinnung oder Gebäudedämmung spielen in der Industrie vor allem produktionsorganisatorisch-produktionstechnische Fragen eine wichtige Rolle [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]: Dazu zählen die richtige Dimensionierung von Anlagen und energetisch optimierte Abläufe, um Energieverluste, die bei Leerlauf, Standby oder im Teillastbetrieb auftreten, zu vermeiden.

Bislang werden gerade diese Energieeinsparpotenziale in der Praxis häufig unterschätzt. Eigene Untersuchungen bei einem Automobilzulieferer ergaben ein Einsparpotenzial von 2 bis 2,5 Prozent der energiebedingten Klimagasemissionen allein durch ein konsequentes Ein- und Ausschaltmanagement im Bereich der Produktionsanlagen. Ein noch höheres Potenzial birgt eine bedarfsgerechte Steuerung der Hallenlüftung und der technischen Abluft.

Die Mess- und Automatisierungstechnik kann in diesem Zusammenhang einen wesentlichen Beitrag leisten, um

- zum einen die Größe, den zeitlichen Verlauf und die anlagen- bzw. prozessbezogene Verteilung von Energieverbräuchen aufzuklären (Energiemonitoring) und
- zum anderen energiesparende Betriebsweisen umzusetzen (energiesensitive Anlagensteuerung) [8].

Vorliegender Beitrag stellt hierzu ausgewählte Konzepte und Lösungen vor, wie sie vor allem in der diskreten Produktion – etwa im Automobilbau und in der Zulieferindustrie – eingesetzt werden.

2 Energiemonitoring

2.1 Energiedatenerfassung

2.1.1 Permanente Energiedatenerfassung

Eine permanente Erfassung von Energiedaten erfolgt in jedem Betrieb bereits zur Energiekostenabrechnung durch den Energieversorger. Diese Erfassung findet auf gesamtbetrieblicher Ebene statt und berücksichtigt neben der bezogenen elektrischen Arbeit [MWh] auch die maximal in Anspruch genommene elektrische Leistung [MW]. Die Leistungsspitzen werden dabei als Viertelstundenmittelwert registriert (Bild 1) und dienen der Ermittlung der leistungsabhängigen Komponente der Energiekosten.

Für eine energiesensitive Steuerung der Produktion ist dieses zeitliche Raster jedoch zu grob. Zudem lässt die Messung auf gesamtbetrieblicher Ebene keine Rückschlüsse auf einzelne Verbraucher (Maschinen, Anlagen, Geräte) zu. Deshalb sind weitere und andere Messstellen vorzusehen. Sowohl von den Messaufnehmern als auch von der Datenübertragungstechnik (Daten-Bus) sind dabei eine hohe zeitliche Auflösung und oft auch Echtzeitfähigkeit zu verlangen.

Konventionelle Zähler, wie sie in der Gebäudeleittechnik eingesetzt werden, kommunizieren über den sogenannten Metering-Bus (M-Bus). Bei dieser Technologie werden die Zähler von einem M-Bus-Master über eine Zweidrahtleitung mit Spannung versorgt und nacheinander ausgelesen. Anschließend setzt der M-Bus-Master die Signale auf eine Serielle Schnittstelle (RS232), LON oder zunehmend auch auf Ethernet um. Die Auslesezeiten in räumlich ausgedehnten Netzen können dabei eine bis mehrere Minuten betragen.

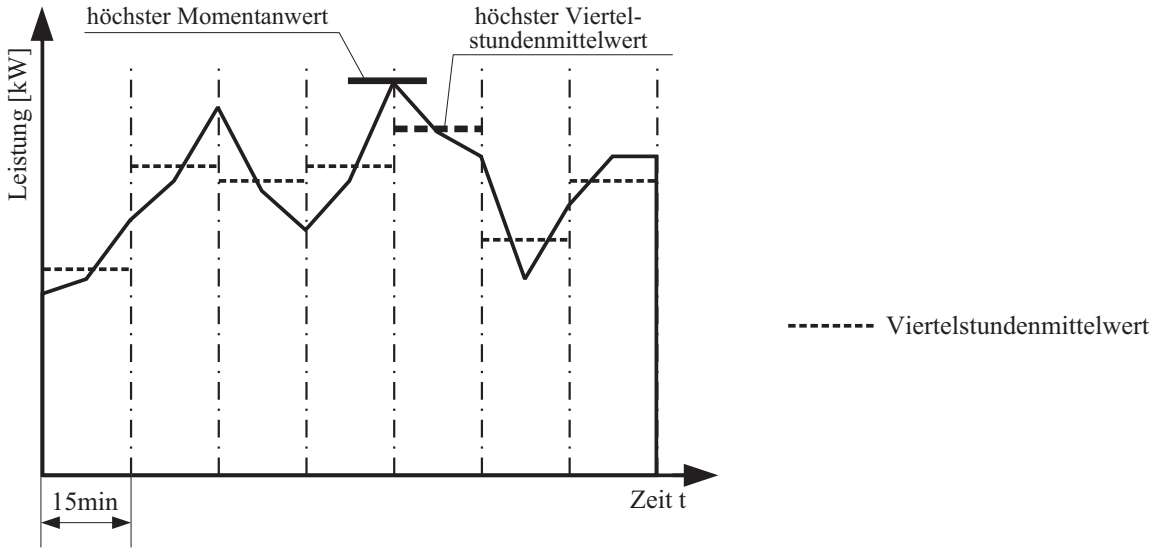

Bild 1: *Registrierende Leistungsmessung (Viertelstundenmittelwerte der elektrischen Leistung) [5]*

Neueste digitale Messgeräte arbeiten dagegen mit Erfassungsraten bzw. Aktualisierungszeiten von ca. 200 ms und können direkt per Modbus/TCP-Protokoll oder PROFIBUS DP ausgelesen werden. Zu dieser Gerätegruppe gehörende digitale Multifunktionsmessgeräte erfassen – in den für die Produktion relevanten Drei-Leiter-Netzen – die Phasenströme und Phasenspannungen und berechnen daraus die Wirk-, Blind- und Scheinleistung sowie den Leistungsfaktor. Zusätzlich detektieren sie Spannungseinbrüche und Oberschwingungen, so dass eine Beurteilung der Netzqualität möglich wird. Alle Messwerte können zusätzlich mit einem Zeitstempel versehen werden. Messwerte mit Zeitstempel bilden eine maßgebliche Voraussetzung für eine verbesserte Diagnosefunktionalität von Energiemonitoring-Systemen und für eine darauf aufbauende energiesensitive Anlagensteuerung.

Eine bislang wenig genutzte Möglichkeit der Energiedatenerfassung ist das Auslesen von energierelevanten Daten aus Anlagensteuerungen. Dabei sind elektrische Größen – wie Strom, Spannung, Leistung und Arbeit – oft nicht direkt ermittelbar, sondern müssen aus dem jeweiligen Schaltzustand einzelner Maschinenkomponenten und der Kenntnis ihrer Energieverbräuche abgeleitet werden. Während für den datentechnischen Zugriff auf die Steuerungen vielfältige Möglichkeiten bestehen (z. B. Datentabellen, Austauschdateien, Ethernet-Verbindungen und Feldbussysteme) werden die Verknüpfung der Steuerungsdaten mit Energiegrößen und die exakte Zuordnung von Zeitstempeln derzeit noch nicht vollständig beherrscht.

2.1.2 Temporäre Energiedatenerfassung

Die geschilderte permanente Energiedatenerfassung aller – oder einer größeren Zahl ausgewählter – Verbraucher eines Produktionsbetriebs ist in der Regel mit hohen Kosten verbunden. Neben der Anschaffung der Messgeräte – mit Gerätepreisen in meist zwei- bis dreistelliger Höhe – müssen für deren Integration in Bus-Systeme und für die Software zur Datenauswertung und -speicherung in ausgedehnten Produktionsstätten oft fünf- bis sechsstellige Beträge kalkuliert werden. Häufig gelingt es dann nicht, allein aus der Kenntnis der Energiedaten sofort und in einem solchen Umfang Energieeinsparungen zu generieren, dass sich die Investition in ein umfassendes permanentes Energieerfassungssystem in einem adäquaten Zeitraum amortisiert.

Insbesondere dort, wo sich betriebliche Produktionsprozesse zyklisch wiederholen oder wo sie kontinuierlich verlaufen, ist es daher oft günstiger, Energiedaten mit mobiler Messtechnik über eine definierte kurze Zeit (z. B. eine Schicht, einen Tag, eine Woche) zu messen, auf eine Vergleichsperiode (z. B. ein Geschäftsjahr oder die Nutzungsdauer einer Maschine) hochzurechnen und aus den Ergebnissen Energieeinsparmaßnahmen abzuleiten.

Für solche Messungen eignen sich mobile digitale Multifunktionsmessgeräte, die funktional den oben für die permanente Messung beschriebenen Geräten ähneln. Die Messtechnik ist jedoch in transportable Gehäuse verbaut, die zusätzlich über temporär installierbare Spannungs- und Stromabnehmer (z. B. Induktionszangen), Datenspeicher, Hard- und Software für die Messdatenverarbeitung sowie ein Display verfügen.

Marktverfügbare Geräte weisen aktuell aber noch gravierende Nachteile auf: Der Anschluss der Strom- und Spannungsaufnehmer ist in vielen Fällen aufwendig und unsicher [9, 10], die gemessenen Energiedaten besitzen keinen exakten Zeitstempel und lassen sich kaum mit den Ereignissen in der Produktionsanlage synchronisieren. Außerdem ist der Speicherplatz limitiert, was bei Messungen mit hoher zeitlicher Auflösung nur kurze Messperioden zulässt. Ein Export der Messwerte ist bei den meisten Geräten nur bei unterbrochener Messung möglich; die Messdaten-

auswertung am Display oder nach dem Export auf einen PC bzw. auf ein Notebook ist oft wenig komfortabel.

Bild 2 zeigt einen im Projekt PEACH[1] entwickelten Prototyp für ein mobiles Energiedatenerfassungssystem, das über Wandlerboxen sicher an verschiedene Verbraucher angeschlossen werden kann und direkt mit einer vollwertigen Energiemonitoring-Software kommuniziert.

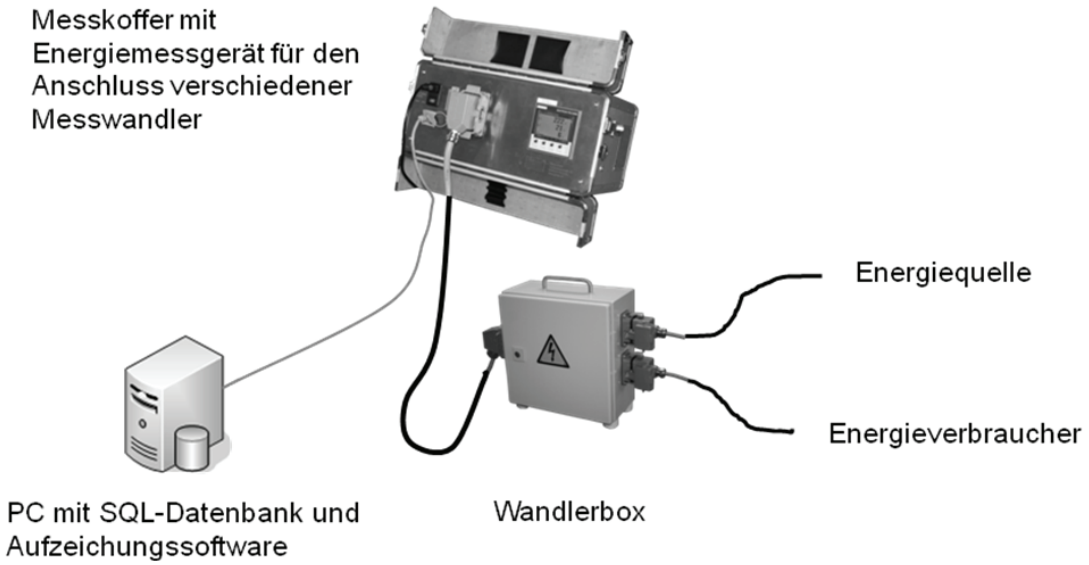

Bild 2: *Prototyp eines mobilen Energiedatenerfassungssystems [8]*

2.2 Energiedatenspeicherung, -visualisierung und -auswertung

Neben der Energiedatenerfassung müssen Energiemonitoring-Systeme vor allem folgende Funktionen erbringen:

- Archivierung der Energiedaten,
- Anzeige von Energiedaten nach verschiedenen Kriterien,
- Überwachung von Parametern (z. B. Lastspitzen, Wirkungsgrad) und Alarmierung bei Grenzwertüberschreitungen,
- Berechnung von Energiekennzahlen und Kennlinien,
- Unterstützung bei der Allokation von Energiekosten auf Kostenstellen und
- Generierung von Berichten.

[1] Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzeptes „Forschung für die Produktion von morgen“ unter dem Förderkennzeichen 02PK2009 gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA), Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PFT) betreut.

Energiemonitoring-Systeme sind zur Erfüllung dieser Funktionen üblicherweise in einer Client-Server-Architektur aufgebaut und in das betriebliche Intranet integriert. Die Speicherung und ein Teil der Verarbeitung der Messdaten erfolgen auf einem Server. An den Clients können verschiedene Personen mit unterschiedlichen Aufgaben (z. B. Überwachung der Spitzenlast, Energiekostenverrechnung) und unterschiedlichen Rechten jeweils ausgewählte Energiedaten lesen, ggf. verarbeiten, auswerten, anzeigen und ausgeben.

3 Energiesensitive Anlagensteuerung

3.1 Grundkonzept

In Produktionsanlagen lassen sich häufig allein durch geeignete Betriebsweisen bedeutende Energiemengen und Energiekosten einsparen. Zu den energie- bzw. energiekostensparenden Betriebsweisen zählen:

- konsequentes Abschalten während produktionsfreier Zeiten,
- Abschalten oder Standby-Schaltung in Pausen und Wartezeiten,
- Begrenzung der Maximallast durch
  - kontrolliert stufenweises Hochfahren von Teilkomponenten einer gesamten Anlage,
  - gestaffelte Pausenan- und -abschaltung,
  - Abschaltung von z. B. Komfortverbrauchern bei drohender Lastspitze,
- Verlagerung ausgewählter Prozesse in Niedertarifzeiten und
- Synchronisieren von energieverbrauchenden Prozessen mit dem Anfall rückgewinnbarer Verlustenergie.

Während einige dieser Betriebsweisen rein zeit- bzw. kalendergesteuert realisiert werden können, bedürfen andere Betriebsweisen – die auf dynamische und stochastische Veränderungen (z. B. den Lastverlauf) reagieren müssen – einer Kopplung zwischen dem beschriebenen Energiemonitoring-System und der operativen Steuerung des Betriebs.

Für diese Kopplung und die Ausübung der energiesensitiven Anlagensteuerungsfunktionen ist prinzipiell das Manufacturing Execution System (MES) – die Produktionsleitstands-Ebene – geeignet: Das MES ist entsprechend seiner strukturellen Einbindung zwischen der eher kaufmännisch orientierten Unternehmensleitebene (ERP-Systeme) und den Maschinen- bzw. Anlagensteuerungen in der Lage, das energetische Verhalten einzelner Maschinen und Anlagen auf gesamt- oder teilbetrieblicher Ebene abzustimmen (Bild 3).

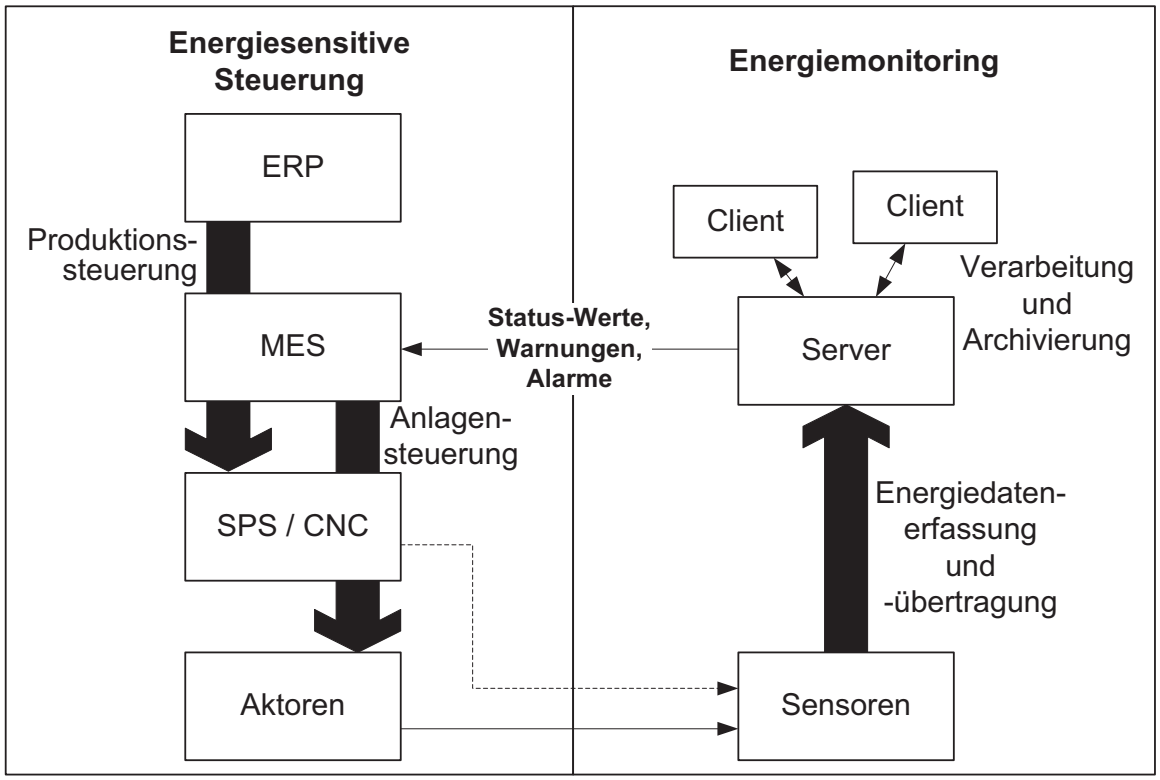

Bild 3: *Grundkonzept der energiesensitiven Anlagensteuerung*

Eine direkte datentechnische Kopplung zwischen Energiemonitoring-System und MES, die automatisch Schaltbefehle generiert, birgt jedoch derzeit noch hohe Risiken: Technische Kommunikationsfehler zwischen dem Energiemonitoring-System und dem Produktionsleitstand – die auf Grund der Komplexität beider Systeme nicht auszuschließen sind – können leicht zu Störungen und damit zu Produktionsausfällen führen. Deshalb ist zu erwarten, dass Leitstände und Energiemonitoring-System auf absehbare Zeit parallel betrieben werden. Konkrete Schaltvorgänge im Leitstand, die sich aus Informationen des Energiemonitoring ableiten (z. B. Alarme bei Grenzwertverletzung), erfordern somit weiterhin noch aktive Eingriffe durch das Personal. MES und Energiemonitoring-Systeme werden aber zunehmend und zeitlich synchronisiert auf die gleichen Daten(banken) zurückgreifen, so dass darauf aufbauend eine schrittweise Integration von energiesensitiven Steuerungsmodi in Leitstände möglich wird [11].

3.2 Beispielhafte Ansätze für die energiesensitive Produktionssteuerung

Beispielhaft wurden in einem prototypischen Leitstand folgende Ansätze für eine energiesensitive Anlagensteuerung umgesetzt [8, 11]:

- Anzeige des Energieverbrauchs bzw. der Leistungsaufnahme mit Gradientenauswertung und Grenzwerterfassung,
- Anzeige von Grenzwertverletzung der Energiedaten in einer permanenten Fußzeile oder einem separaten Störungsfenster (Bild 4),
- Vorgabemöglichkeiten für energieeffizienzorientierte Arbeits- und Pausenzeiten, Einschaltzeiten (Bild 5) und Betriebsregime sowie
- Archivierung von energiebezogenen Störungen, Warnungen und Meldungen.

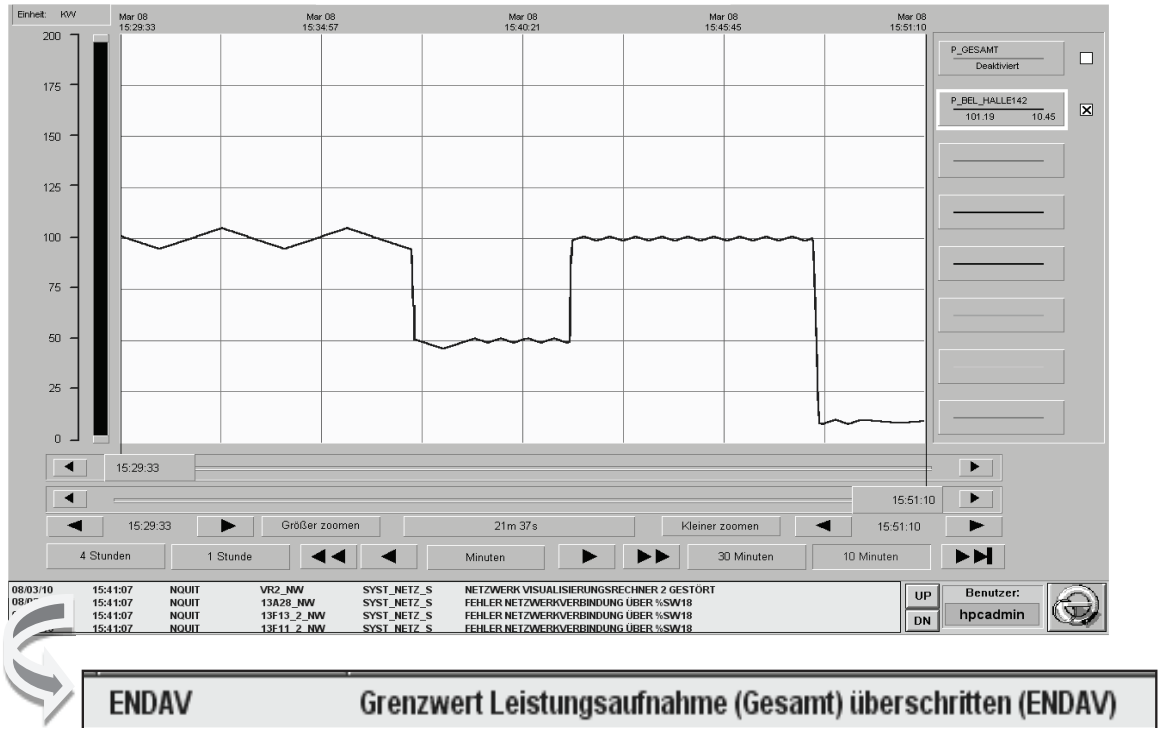

Bild 4: *Verbrauchsanzeige und Warnmeldung Leistungsaufnahme [12]*

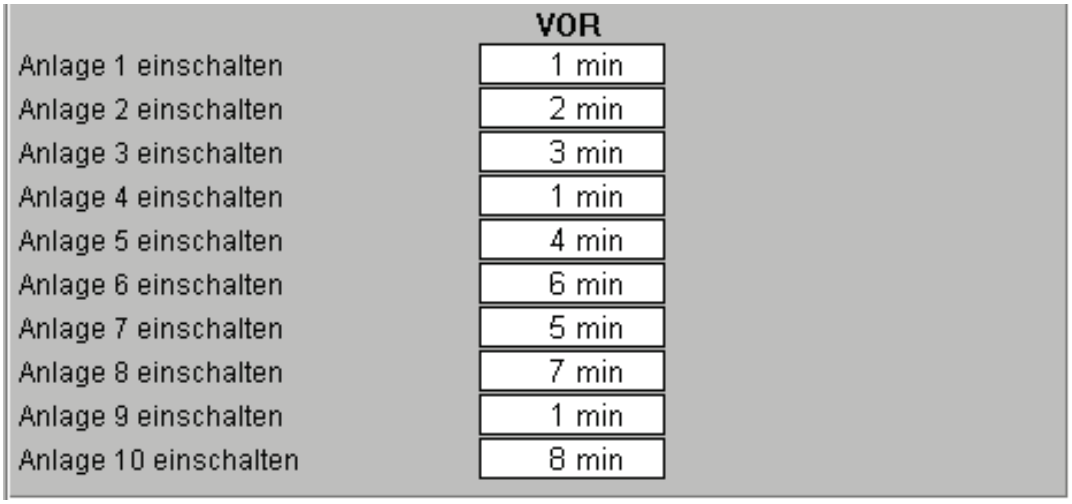

Bild 5: *Energiesensitiv angepasster Einschaltplan [12]*

3.3 Standardisierung des Datenaustauschs mit PROFIenergy

Die Profibus Nutzerorganisation (PNO) entwickelt seit 2009 das Protokoll PROFIenergy für das Feldbussystem PROFInet [13, 14]. Ziel ist es, energierelevante Zustände von Anlagen und Geräten herstellerunabhängig zu beschreiben, um darauf aufbauend Energiesparfunktionen ansteuern zu können (Bild 6). Bisher wurden vier allgemein gültige Anwendungsfälle definiert:

- kurze geplante Betriebspausen (z. B. Mittagspause, Schichtwechsel),
- längere, geplante Betriebspausen (z. B. Wochenende, Betriebsferien),
- ungeplante Betriebspausen und
- Messen und Visualisieren der Belastung.

In den drei erstgenannten Anwendungsfällen wird durch eine bedarfsgerechte Abschaltung eine Reduktion von Teillastverlusten und Standby-Verbräuchen angestrebt. Voraussetzung dafür ist ein sicherer Hochlauf der Anlage nach dem Einschalten. Sowohl die Hochlaufzeiten als auch die erreichte Prozessfähigkeit müssen reproduzierbar sein. Die Steuerung benötigt zur Entscheidung über ein Ausschalten von Anlagen hinreichend genaue Informationen über die Dauer der Unterbrechung (Betriebskalender, Auftragsbestand) und die Hochlaufzeiten.

Der letztgenannte Anwendungsfall reflektiert die Tatsache, dass für den Bezug von Elektroenergie – und die Entgeltberechnung durch den Energieversorger – nicht nur die in einem Zeitraum geleistete elektrische Arbeit, sondern auch die maximal bezogene elektrische Leistung (als Viertelstunden-Mittelwert der Leistungsspitzen) ausschlaggebend sind. Die Minderung der Spitzenlast ist damit eine weitere Zielgröße für die energiesensitive Steuerung von Produktionsanlagen. Drohende Lastspitzen können dabei vor allem durch das Abschalten von temporär verzichtbaren Nebenprozessen abgewendet werden. Außerdem ist in den Anwendungsfällen 1 bis 3 sicher zu stellen, dass Geräte nicht – in großer Anzahl – gleichzeitig eingeschaltet werden.

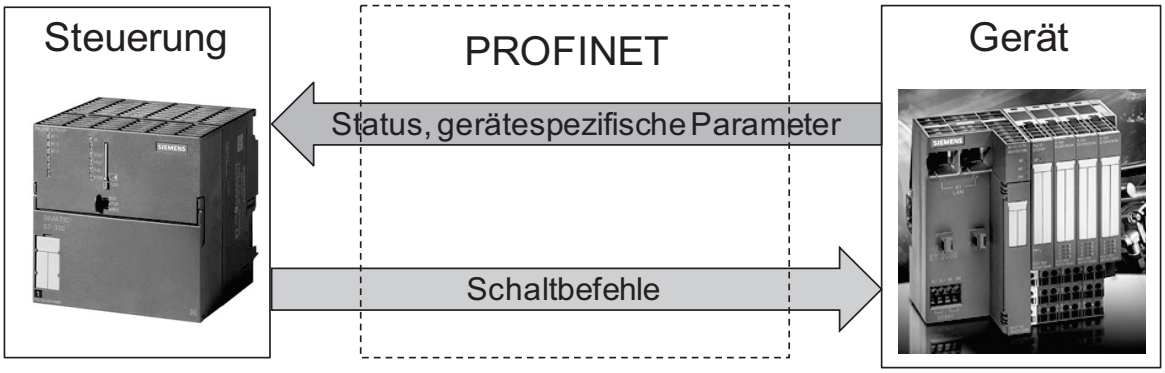

Bild 6: *Kommunikation nach PROFIenergy-Standard [5]*

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die energiesensitive Steuerung von Produktionsanlagen setzt ein Zusammenwachsen der ursprünglich eher aus der Gebäudetechnik stammender Energiemonitoring-Systeme mit der Produktionssteuerung – insbesondere mit dem MES – voraus.

Zur Bewältigung technischer Barrieren bei der Kommunikation zwischen beiden Systemen ist ein schrittweises Vorgehen nötig, das über Statusmeldungen zum aktuellen Energieverbrauch, über Warnungen und Alarme bei Grenzwertverletzungen sowie über die Voreinstellung energiesparender Fahrweisen in Betriebskalendern und Einschaltplänen immer stärker zu einer aktiven Steuerung des Energieverbrauchs gelangt.

Diese aktive Steuerung des Energieverbrauchs von Produktionsanlagen dürfte künftig noch an Bedeutung gewinnen: Im Zuge einer – durch die hohen Anteile von Wind- und Solarenergie – stärker schwankenden Energieerzeugung wird erwartet, dass auch die Energiepreise in „Echtzeit“ variieren. Produktionsbetriebe, die den eigenen Energieverbrauch dem aktuellen Angebot am Energiemarkt – ggf. im Verbund mit Energiespeichern und flexiblen Eigenerzeugungsanlagen – anpassen können, dürften von dieser neuen Situation profitieren und könnten eine wichtige Rolle in intelligent gesteuerten Energieversorgungsnetzen der Zukunft (Smart-Grids) ausfüllen.

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®).

Gefördert aus Mitteln der Europäischen Union

Europa fördert Sachsen. EFRE Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

Literaturangaben

[1] *Bonneschky, A.: Tools, die den Zusammenhang von Technik und Wirtschaftlichkeit nutzbar machen – Integration energiewirtschaftlicher Aspekte in Systeme der Produktionsplanung und -steuerung. In: Schieferdecker, B. (Hrsg.): Energiemanagement-Tools, Springer Verlag, Berlin et al., 2006*

[2] *Junge, M.: Simulationsgestützte Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2007*

[3] *Erlach, K.; Westkämper, E. (Hrsg.): Energiewertstrom, Der Weg zur energieeffizienten Fabrik, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2009*

[4] *Imgrund, Ch.; Löffler, Th.: Ganzheitliche Ansätze für die energieeffiziente Fahrzeugmontage, Vortrag auf dem 3. Symposium Wissenschaft und Praxis, Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, TU Chemnitz, 12. November 2009*

[5] *Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, Th.; Strauch, J.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben, Springer Verlag, Berlin et al., 2009*

[6] *Müller, E.; Löffler, Th.: Energy Efficiency at Manufacturing Plants – A Planning Approach. In: Proceedings of 43rd CIRP International Conference on Manufacturing Systems 2010, Vienna, 26-28th May 2010*

[7] *Putz, M. et al.: Energiesensitive, VR-basierte Steuerung der Variantenfließfertigung. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik, Tagungsband zum 1. Internationales Kolloquium des Spitzentechnologieclusters eniPROD, Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2010, S. 573-596*

[8] *Hiersemann, R.; Hiersemann, M., Schubert, F.; Löffler, Th.: Vernetzte Mess- und Automatisierungstechnik für die Energieeffizienz in Produktionsanlagen. In: Müller, E.; Spanner-Ulmer, B. (Hrsg.): Nachhaltigkeit in Planung und Produktion, Tagungsband, 4. Symposium Wissenschaft und Praxis und 8. Fachtagung Vernetzt planen und produzieren, 11. November 2010. Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme. Sonderheft 16, Chemnitz, 2010. S. 183-192*

[9] *Hiersemann, R.; Löffler, Th.: Fertigungs- und Montageanlagen energieeffizient projektieren und steuern, Energieeffiziente Fabrik in der Automobil-Produktion, 2. Fachtagung, München, 28. und 29. Januar 2009*

[10] *Löffler, Th.; Tästensen, R.: Energieeffizienzpotentiale bei der Projektierung von Produktionsanlagen. In: Wandlungsfähige Produktionssysteme, 13. Tage des Betriebs- und Systemingenieurs / II. Symposium Wissenschaft und Praxis, Tagungsband, Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, 13. November 2008*

[11] *Müller, E.; Hiersemann, R. (Hrsg.): PEACH Projektierung und Steuerung energieeffizienter Anlagen – Systemkompetenz aus Chemnitz. Gemeinsamer Ergebnisbericht zum Verbundprojekt. In: Müller, E.; Spanner-Ulmer, B. (Hrsg.): Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme. Heft 80, Chemnitz, 2010*

[12] Hiersemann, R.; Hiersemann, M.: Integration von Energiemonitoring-Funktionalitäten in Anlagenleitstände – Möglichkeiten und Grenzen, Karlsruher Leittechnisches Kolloquium, Karlsruhe, 09. und 10. Juni 2010

[13] Tobisch, D.; Schöfberger, W.: Energietransparenz und -effizienz in der Automobil-Produktion, Vortrag zu 3. Fachtagung Energieeffiziente Fabrik in der Automobil-Produktion, 23. und 24. Februar 2010, München, 2010

[14] Knafla, F.: Energiedatenerfassung in industriellen Prozessen, Vortrag zu 3. Fachtagung Energieeffiziente Fabrik in der Automobil-Produktion, 23. und 24. Februar 2010, München, 2010