

ENERGIEFLEXIBILITÄT IN PRODUKTIONSSYSTEMEN

**Peter SIMON*, Cedric SCHULTZ*, Fabian KELLER*, Johannes
GLASSCHRÖDER, Gunther REINHART**

Fraunhofer IWU Projektgruppe Ressourceneffiziente mechatronische
Verarbeitungsmaschinen RMV, Beim Glaspalast 5 | 86153 Augsburg, Telefon: +49 821
56883-74, Fax: +49 821 56883-50 E-Mail: Peter.Simon@iwu.fraunhofer.de,
<http://www.iwu.fraunhofer.de/rmv>

Kurzfassung: Im Zuge der Energiewende wächst die Herausforderung, Erzeugung und Verbrauch von elektrischer Energie aneinander anzugleichen, um das im Stromnetz notwendige Gleichgewicht aufrecht zu erhalten. Eine Möglichkeit der Synchronisation ist die Flexibilisierung der industriellen Nachfrage, indem Verbraucher ihren Strombedarf in Abhängigkeit des aktuellen Angebots anpassen. Da das Wissen in produzierenden Unternehmen bezüglich ihrer Energieflexibilität als sehr gering einzuschätzen ist, wird eine Methode zur Bewertung von Maßnahmen vorgestellt, um Unternehmen eine Vorgehensweise zur Quantifizierung ihrer Potentiale zu geben. Zusätzlich werden Ansätze zur Umsetzung dieser Potentiale diskutiert.

Keywords: Energie, Flexibilität, Energieflexibilität, Produktionssystem

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund der Energiewende in Deutschland und dem damit verbundenen Ausstieg aus der Atomenergie hat die Bundesregierung das Ziel ausgerufen, bis zum Jahr 2050 bis zu 80 % des Bruttostromverbrauchs über erneuerbare Energiequellen abzudecken. Aktuelle Prognosen weisen darauf hin, dass das ebenfalls festgelegte Zwischenziel von 35 % im Jahr 2030 übertroffen werden könnte [1]. Vorrangig soll der sukzessive Ausbau von Wind und Photovoltaik-Anlagen angestrebt werden, was eine Abhängigkeit des Energieangebots von den jeweils aktuellen Witterungsbedingungen beinhaltet. Die zunehmenden regionalen Unterschiede bei der Stromerzeugung führen zu einer steigenden Volatilität, die durch verschiedene Maßnahmen, wie die Zu- bzw. Abschaltung von Kraftwerken, ausgeglichen werden muss. Zusätzlich können einige Verbraucher ihre Stromnachfrage an das Stromangebot anpassen, um so einer Gefährdung der Netzstabilität vorzubeugen. Insbesondere industrielle Verbraucher können dabei einen erheblichen Beitrag leisten, da diese den größten Anteil am Stromverbrauch einnehmen [2]. Die hierzu nötigen Maßnahmen zur Flexibilisierung der Produktion sind teilweise mit erheblichem Aufwand verbunden. Produzierende Unternehmen benötigen in der Folge Anreize zur Anpassung ihrer Last.

Der Strommarkt bietet produzierenden Unternehmen verschiedene Vergütungsmöglichkeiten für deren Flexibilität. Hierbei müssen anreizbasierte Programme, wie z. B. die Minutenreserve und zeitvariable Strompreismodelle, wie z. B. den Energiebezug über die Börse, unterschieden werden. Aktuell weisen diese allerdings starke Barrieren für Verbraucher auf, welche produzierende Unternehmen daran hindern, ihre Flexibilitätspotentiale an den Märkten anzubieten [3]. Die aktuellen Bemühungen der Bundesregierung, den Strommarkt neu zu gestalten, adressieren einige dieser Barrieren. So

sollen z. B. die Regelleistungsmärkte für neue Anbieter geöffnet und die Netzentgeltsystematik erneuert werden [4].

Oftmals gilt, dass die Teilnahmevoraussetzungen auf diesen Märkten in Verbindung mit einem Mindestbetrag bezüglich der zu flexibilisierenden Last stehen. Zusätzlich sind die Energiekosteneinsparungen umso höher, je mehr Leistungsveränderung auf dem Markt angeboten werden kann [3]. Daher wird im Folgenden eine Methode zur Bewertung von Energieflexibilität auf der Ebene eines Produktionssystems vorgestellt, das ein möglichst hohes Leistungsveränderungspotential eines produzierenden Unternehmens identifiziert. Aus gleichem Grund wird zusätzlich die technische Gebäudeausstattung (TGA) betrachtet.

2 Bewertung von Energieflexibilität

In den meisten produzierenden Unternehmen existiert wenig Kenntnis über die zur Verfügung stehenden Potentiale zur Verschiebung von elektrischen Lasten. Dadurch werden eventuell zur Verfügung stehenden Möglichkeiten zur Energiekostenreduzierung nicht genutzt. Zusätzlich besitzen Entscheider im Unternehmen keine Möglichkeit, Investitionen, die zu einer höheren Flexibilisierung führen würden, zu bewerten. Auch ein Benchmarking mit anderen Unternehmen ist aufgrund der fehlenden Datenbasis nicht möglich. Aus diesen Gründen ist es notwendig, Energieflexibilisierungspotentiale detailliert zu bewerten. Dabei muss berücksichtigt werden, die Daten in einer Form aufzunehmen, dass diese durch die Produktionsplanung und –Steuerung (PPS) in der Umsetzungsphase genutzt werden können. Abbildung 1 zeigt hierzu eine Vorgehensweise, welche die Identifizierung, Kategorisierung und Bewertung der technischen Potentiale und der Kosten einzelner Maßnahmen beinhaltet. Nach Abschluss der Bewertung wird der PPS ein Maßnahmenkatalog übergeben, der operativ angewendet werden kann.

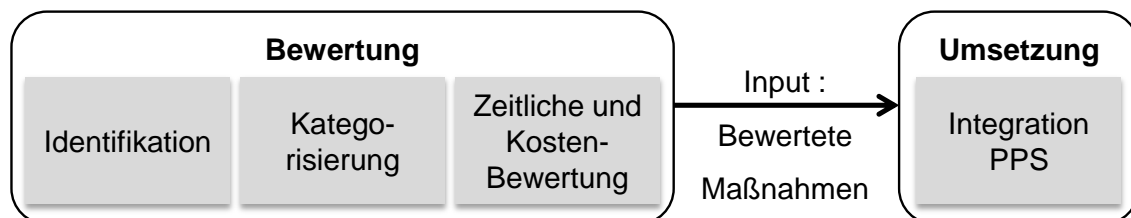


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Bewertung und Umsetzung von Energieflexibilität

2.1 Identifizierung

Der erste Schritt einer Potentialanalyse hinsichtlich der Energieflexibilität von Produktionssystemen ist eine Methode zur Identifizierung von Maßnahmen zur positiven oder negativen Veränderung der benötigten Leistung zu bestimmten Zeiträumen. Das Ziel ist die Erstellung eines Katalogs mit technisch möglichen Maßnahmen, welche im nächsten Schritt bezüglich der zeitlichen Eigenschaften und Wirtschaftlichkeit bewertet werden kann. Hierbei müssen verschiedene Prämissen beachtet werden. Der zeitliche und damit auch der finanzielle Aufwand muss möglichst gering gehalten werden, da die Methode andernfalls in der Praxis aus Gründen der Wirtschaftlichkeit kaum Anwendung finden wird. Des Weiteren ist der aktuelle Status der Transparenz bezüglich des Energieverbrauchs in der betrachteten Branche zu berücksichtigen. Dieser ist in vielen Fällen abhängig vom vorhandenen

stationären Messequipment. Mit Hilfe von mobilen Messgeräten kann die Transparenz durch die Generierung der benötigten Energieverbrauchsdaten temporär erhöht werden.

Ein weiterer Punkt, der bei der Auswahl oder Erstellung einer Methode zur Identifizierung von Energieflexibilität beachtet werden muss, ist die Betrachtungsebene. Einige Ansätze untersuchen ausschließlich das Potential einzelner Anlagen [5], [6]. Andere Vorgehensweisen verfolgen dieses Ziel auf einer höheren Ebene, wie z. B. eines Produktionssystems [7], [8]. Aus diesen Ansätzen lassen sich die in Abbildung 2 dargestellten, notwendigen Bestandteile einer Identifizierung von Maßnahmen ableiten. Die Vermarktungsmöglichkeiten von Maßnahmen steigen mit der Höhe der Leistungsänderung. Daher ist es unumgänglich, den Leistungsbedarf in einem Produktionssystem den jeweiligen Verbrauchern zuzuordnen. Zusätzlich ist dabei der Anteil dieser Verbraucher am Gesamtenergiebedarf zu berücksichtigen, um deren Auslastung und damit die Verfügbarkeit von Maßnahmen in die Analyse mitaufzunehmen. Der zweite wesentliche Bestandteil der Betrachtung ist die Entkopplung des Energieverbrauchs vom Produktionsfluss, da eine Einflussnahme andernfalls beispielsweise die Ausbringungsmenge oder die Produktqualität beeinflussen kann. Hierbei werden z. B. Produktpuffer hinsichtlich der maximalen Dauer einer Zufluss Begrenzung ohne Auswirkungen auf die nachfolgenden Produktionsanlagen untersucht. Zusätzlich müssen die möglichen Zustandswechsel der einzelnen Anlagen betrachtet werden. In diesem Schritt werden somit die möglichen Maßnahmen identifiziert. Abschließend werden die Auswirkungen der Zustandswechsel auf die TGA aufgenommen, um eventuelle zusätzliche Leistungsveränderungen, z. B. durch die Abschaltung einer Lüftung, zu berücksichtigen.

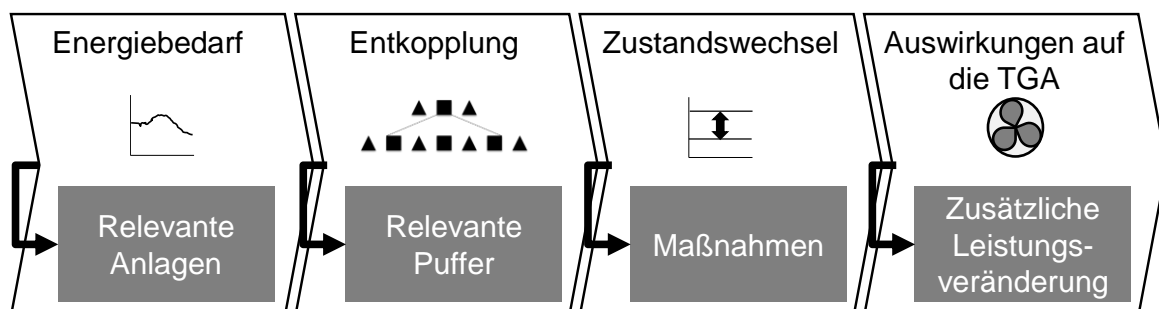


Abbildung 2: Vorgehen zur Identifizierung von Maßnahmen für energieflexibles Verhalten

2.2 Kategorisierung

Die im ersten Schritt identifizierten Maßnahmen besitzen viele, teilweise sehr unterschiedliche Eigenschaften. Daher wird die Kategorisierung dieser vorgeschlagen. Dies ist erforderlich, um eine bessere Übersicht der zur Verfügung stehenden Maßnahmen zu erlangen. Im Weiteren stellt die Kategorisierung aber auch einen weiteren Baustein der Bewertung dar, da diese unterschiedliche Vorgehensweisen für verschiedene Maßnahmenarten erfordert.

Die erste Zuordnung erfolgt dabei bezüglich der zeitlichen Dauer, welche eine Maßnahme in Anspruch nimmt. Saisonale Maßnahmen werden ergriffen, um monatlich bis halbjährliche durchschnittliche Preisunterschiede zu nutzen. Beispielhaft wurden dabei die Börsenpreise der European Energy Exchange (EEX) der letzten 3 Jahre analysiert. Im betrachteten energieintensiven Unternehmen ergaben sich dabei erheblich Energiekosteneinsparpotentiale im Falle einer Reduzierung der Produktion von Mitte November bis kurz vor

Weihnachten und einer Vor- bzw. Nachproduktion der dadurch ausfallenden Produktion in den Sommermonaten. Die eingelagerten Produkte dienen somit als Energiespeicher [9]. Maßnahmen, die zwischen einem Tag und einem Monat in Anspruch nehmen, werden oftmals von der Produktionsplanung verantwortet. Beispielhaft kann hier die Veränderung der Auftragsreihenfolge am Tag vor der Produktion in Abhängigkeit von Preissignalen genannt werden. Maßnahmen innerhalb von 24 Stunden sind in der Verantwortung der Produktionssteuerung und können z. B. durch die Unterbrechung eines Produktionsprozesses erfolgen [10]. Im Bereich des Lastspitzenausgleichs werden häufig Bestandteile der technischen Gebäudeausstattung, wie z. B. die Lüftung, nur für wenige Minuten abgeschaltet. Der zeitliche Umfang einer Maßnahme ist folglich höchst divergent und hat starke Auswirkungen auf die letztendliche Bewertung.

Im Weiteren können Maßnahmen bezüglich der betroffenen Ebene in Anlehnung an [11] kategorisiert werden. Die erste Stufe in Abbildung 3 sind einzelne Anlagen. Unter diesem Begriff sind in vielen Fällen alle Ressourcen vereinigt, die zur abschließenden Erstellung eines Werkstücks benötigt werden. Der Begriff (Produktions)-System fasst Anlagen zusammen, die im direkten Zusammenhang miteinander stehen, also z. B. durch einen Materialfluss miteinander verbunden sind. Die nächste Stufe fasst mehrere Systeme zu Segmenten zusammen. Die Produkte verlassen diese in den meisten Fällen versandfertig, daher umfassen Produktionssegmente u. a. die Produktion, Transport, Lagerung und Qualitätsprüfung von Produkten und sind baulich voneinander getrennt. Mehrere Segmente ergeben die Aggregationsstufe einer Fabrik.

	Saisonal	Monatlich	Täglich	15 Minuten
Technisch	Anlage			
	System			
Organi- satorisch	Segment			
	Fabrik			

Abbildung 3: Kategorisierung von Maßnahmen

Zusätzlich lässt sich der Begriff der technischen und organisatorischen Energieflexibilität [6] integrieren. Dabei wird für die Umsetzung einer Maßnahme umso häufiger eine technische Flexibilität benötigt, je niedriger das Aggregationslevel der betroffenen Ebene der Produktion ist. Je höher das Aggregationslevel, desto häufiger sind organisatorische Maßnahmen zuzuordnen.

Im Folgenden werden Maßnahmen betrachtet, welche einer Anlage bzw. einem Produktionssystem zugeordnet werden können. Eine Fabrik bzw. ein Segment kann durch die Bewertung aller zugeordneten Produktionssysteme bewertet werden. Zusätzlich werden im Weiteren keine saisonalen Maßnahmen beschrieben, da die Bewertungen dieser Kategorie aufgrund des unterschiedlichen zeitlichen Bezugs andere Charakteristika aufweisen.

2.3 Technische Bewertung

Nach der Identifizierung und Kategorisierung der einzelnen Maßnahmen werden die für die PPS relevanten Daten aufgenommen. Hierbei sind die durch eine Maßnahme hervorgerufene Leistungsveränderung sowie die zeitlichen Eigenschaften von Maßnahmen zu beschreiben. In [5] werden vier unterschiedliche Zeiträume definiert. Die Aktivierungsdauer beschreibt die Dauer vom Zeitpunkt der ersten Tätigkeiten zur Umsetzung der Maßnahme bis zum Erreichen der Lastveränderung. Die Deaktivierungsdauer beschreibt hingegen die Dauer bis zur Rücknahme der Lastveränderung. Zusätzlich wird für jede Maßnahme eine minimale bzw. maximale Verweildauer beschrieben. Diese geben an, wie lange eine Maßnahme ohne Unterbrechung aufrechterhalten werden kann bzw. muss.

Mit Hilfe dieser vier Größen lassen sich Maßnahmen hinsichtlich ihrer Lastveränderung charakterisieren. Allerdings ist kein Rückschluss auf die Auswirkungen der Maßnahme auf das Produktionssystem möglich. Somit lässt sich auch die Anzahl der möglichen Wiederholungen nicht berechnen. Diese Kennzahl ist allerdings für die PPS von Bedeutung.

Zur Analyse der Auswirkungen ist es notwendig, den Ausgangszustand einer Maßnahme zu definieren. Ein Ausgangszustand kann durch unterschiedlichste Eigenschaften definiert werden. Beispielfhaft kann der minimale Füllstand eines Puffers eine Voraussetzung für eine Maßnahme darstellen. Im Weiteren sind aber auch technische Limitierungen, wie z. B. die Temperatur eines Ofens, zu berücksichtigen.

Ein Ausgangszustand kann folglich mehrere zu erfüllende Bedingungen aufweisen. Diese sind wiederum abhängig von verschiedensten Einflussfaktoren. In Abbildung 4 wird dieser Zusammenhang beispielhaft für den Füllstand eines Puffers dargestellt. Dieser ist u. a. abhängig vom Auslastungsgrad der Produktion, Störungen und dem aktuellen Produktionsplan. Neben dem Ausgangszustand ist es zusätzlich erforderlich, einen Normalzustand eines Produktionssystems zu definieren. Dabei werden Durchschnittswerte herangezogen, die für alle Bedingungen des Ausgangszustands aufgenommen werden.

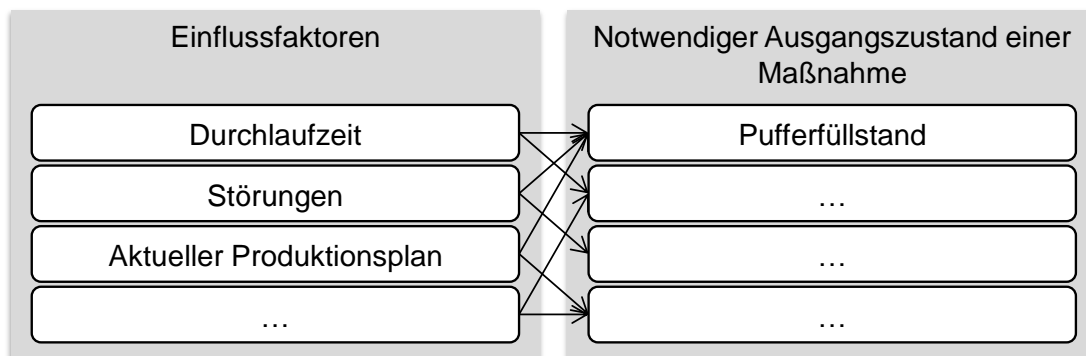


Abbildung 4: Einflussfaktoren eines Ausgangszustands einer Maßnahme

Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Lastveränderung, die durch das Ausführen einer Maßnahme hervorgerufen wird. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Lastveränderung plötzlich auftritt, da bei der Stromabrechnung vieler Industrien ein Mittelwert über 15 Minuten gebildet wird. Die Vorbereitungsdauer beschreibt die Zeit, die vorbereitende Tätigkeiten, wie z. B. die verstärkte Befüllung eines Puffers, zur Erreichung des Ausgangszustands in Anspruch nehmen. Im Anschluss an die Deaktivierungsdauer ist eine Nachbereitungsdauer

vorzusehen, welche benötigt wird, um den Normalzustand des Produktionssystems wieder herzustellen.

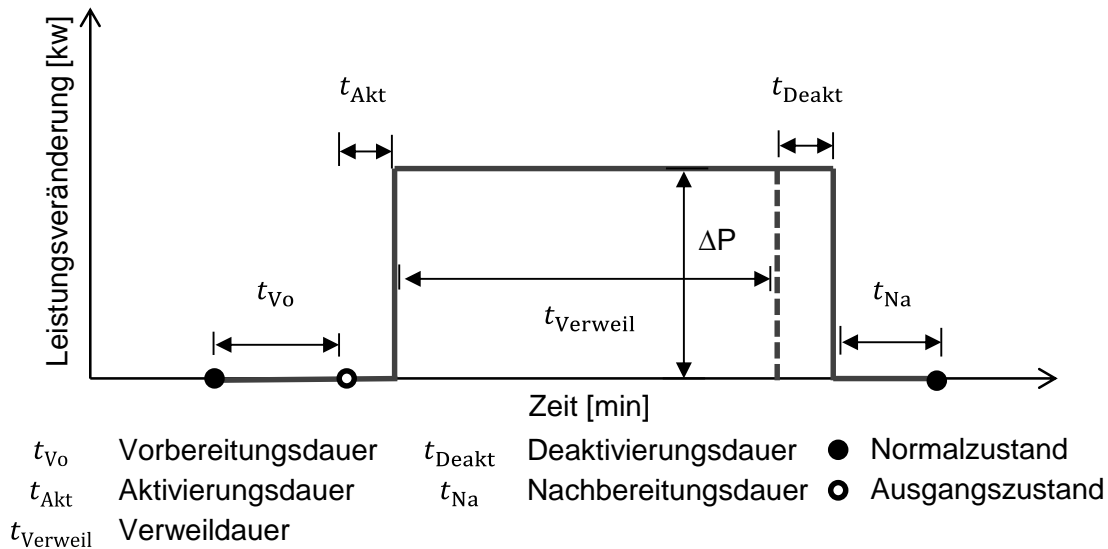


Abbildung 5: Zeitliche Eigenschaften einer Maßnahme

Mit Hilfe der Formel (1) kann nun die Anzahl der möglichen Wiederholungen einer Maßnahme berechnet werden.

$$\text{Anzahl der möglichen Wiederholungen} = \frac{t_{Vo} + t_{Akt} + \emptyset t_{Verweil} + t_{Deakt} + t_{Na}}{\text{Betrachtungszeitraum}} \quad (1)$$

2.4 Kostenbewertung von Energieflexibilität

Die Bewertung von Energieflexibilität erfolgt mit dem Ziel, der PPS die für die Umsetzung der Flexibilitätspotentiale nötigen Daten bereitzustellen. Die im letzten Abschnitt beschriebene technische Bewertung muss nun um die den jeweiligen Maßnahmen zugehörigen Kosten erweitert werden, da die Zielgröße – eine Reduzierung der Energiekosten – sich aus den Vergütungsmöglichkeiten abzüglich der Kosten für die Durchführung von Maßnahmen ergeben. Die Vergütungsmöglichkeiten sind dabei in vielen Fällen in starker Abhängigkeit zum aktuellen Preissignal auf den verschiedenen Märkten und werden daher hier nicht weiter fokussiert.

In [5] werden die Kostenarten, welche bei der Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen entstehen, identifiziert. Der Autor kommt zu dem Schluss, dass die relevanten Kosten in die Kategorien Material- Personal und Zinskosten unterteilt werden können. Um diese quantifizieren zu können, wird eine Spezifizierung vorgenommen sowie Formeln zur Berechnung der Kosten aufgestellt. Diese basieren auf Durchschnittswerten, da dies aus mathematischen Gründen für die Bewertungsmethode der Energieflexibilität einer Anlage erforderlich ist.

Diese statische Bewertung der Kosten ist für die PPS nicht ausreichend, da Maßnahmen in vielen Fällen unterschiedlich lange ausgeführt werden können und keine Informationen zur Veränderung der Kosten vorliegen. Für eine dynamische Betrachtung dieser kann folglich

eine Kostenfunktion in Abhängigkeit der Verweildauer einzelner Maßnahmen aufgestellt werden. Hierbei können zum einen Fixkosten, wie z. B. Personalkosten für die An- und Abschaltung eines Ofens genannt werden. Zum anderen müssen aber auch variable Kosten, wie z. B. Wasser- und Stromkosten für ein Pumpsystem zur Abkühlung eines mit elektrischem Strom betriebenen Ofens betrachtet werden. Die variablen Kosten sind dabei oftmals exponentiell ansteigend. So steigen im Falle einer Überschreitung bei der aus technischen Gründen vorgegebenen maximalen Verweildauer die Kosten dramatisch an. Diese kann beispielhaft durch eine mögliche Gefährdung der Produktqualität vorgegeben sein. Zusätzlich sind viele Maßnahmen abhängig von Pufferkapazitäten. Werden diese überschritten, kommt es zu Störungen im Materialfluss und letztendlich zu einer eventuellen Verzögerung der Auslieferung und damit zu möglichen Vertragsstrafen. Eine Maßnahme wird, wie in Abbildung 6 dargestellt, im Falle der Überschreitung der Kosten durch die Vergütungszahlungen bzw. Energiekostenreduzierung rentabel. Die PPS kann nun mit Hilfe der Erlös- und Kostenfunktion die optimale Verweildauer errechnen.

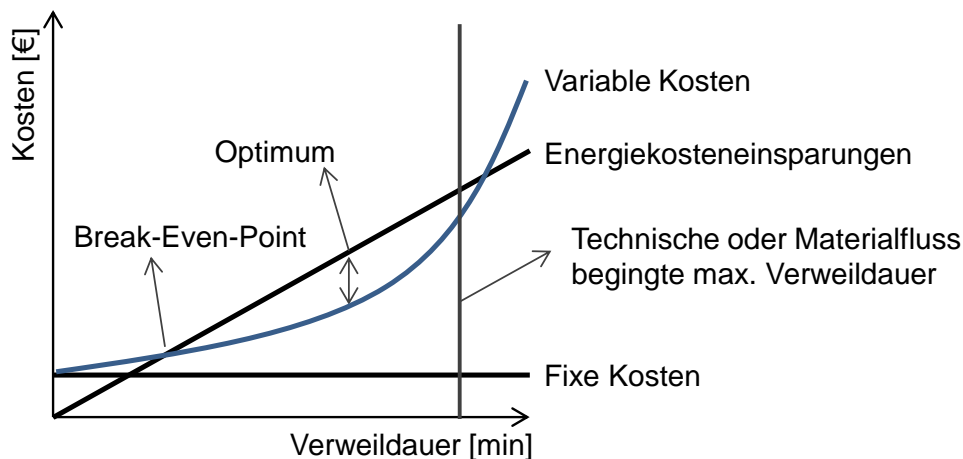


Abbildung 6: Kostenfunktion einer Maßnahme

3 Umsetzung

Der PPS wird durch das vorgeschlagene Vorgehen ein Maßnahmenkatalog zur Verfügung gestellt, der bezüglich der technischen bzw. zeitlichen Eigenschaften und der Kostenfunktion bewertet ist. Abbildung 7 stellt die Ausgangssituation zur Umsetzung der identifizierten Energieflexibilitätspotentiale dar.

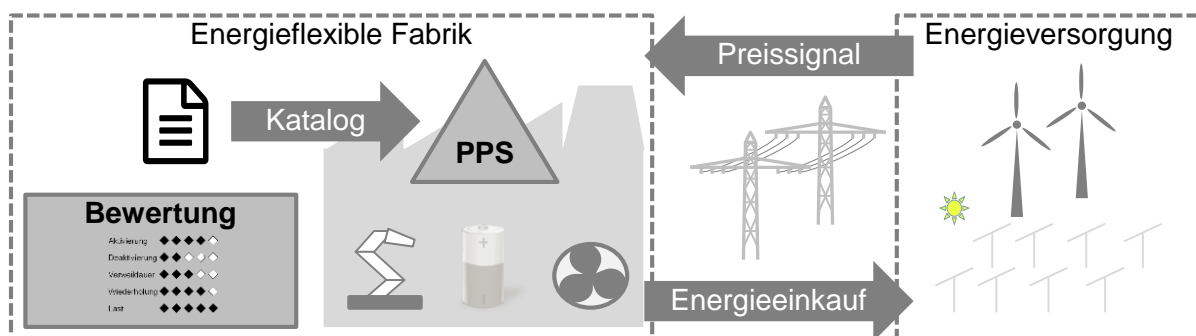


Abbildung 7: Informationsaustausch zwischen Energieflexibler Fabrik und Energieversorgung

3.1 Produktionsplanung

Zur Durchführung der identifizierten Maßnahmen wird ein erweiterter Planungslauf vorgeschlagen. Um die unterschiedlichen Marktanforderungen zu berücksichtigen wird der Planungsablauf in ein mittelfristiges und ein kurzfristiges Erweiterungsmodul im Enterprise-Resource-Planning (ERP) sowie im Maschinenbelegungsmodul unterteilt.

Im mittelfristigen Erweiterungsmodul werden Energiewerte und –kennzahlen, wie z. B. die durchschnittlichen Energieverbräuche nach Produktart durch weitere planungsrelevante Stammdaten ergänzt. Durch den Abgleich dieser Daten mit den Energiebezugsinformationen über die aktuelle Energiebeschaffung mittels des Energieversorgers lassen sich bereits bei der mittelfristigen Planung, Aussagen zum zukünftigen Energiebedarf sowie zur Energieverfügbarkeit einer Planungsperiode treffen.

Zur Integration des Spot-Marktes und eventueller erneuerbare Energiequellen am Standort dient das kurzfristige Erweiterungsmodul. Hier werden einem Disponenten Energieprofile für einen bestimmten Produktionszeitraum, wie z. B. einem Tag oder einer Woche, zur Verfügung gestellt. Mit Hilfe dieser Informationen wird über einen kurzfristigen Zukauf bzw. Verkauf von Energie entschieden, oder eine manuelle Lastgangoptimierung durchgeführt.

Im Maschinenbelegungsmodul erfolgt anhand der Fertigungsinformationen der Produkte, wie z. B. der Arbeitspläne und dem Energieprofil, eine automatische Optimierung der Produktionsreihenfolge. Das Ergebnis ist ein auf das gegebene Energieprofil angepasster Lastgang bzw. Fahrplan, welcher sich an den Zielgrößen Energiekosten, Termintreue und Fertigungskosten orientiert. Dadurch kann der Fertigungsplan erstellt und der Produktionssteuerung das verwendete Energieprofil übergeben werden.

3.2 Produktionssteuerung

Um Unternehmen den wirtschaftlichen Einsatz ihres Flexibilitätspotentials zu ermöglichen, darf die Nachfrageflexibilität die logistischen Zielgrößen der Produktion, d. h. Auslastung, Bestände, Durchlaufzeiten und Termintreue, nicht verschlechtern, da andernfalls Kosteneinsparungen beim Energieeinsatz durch steigende Kosten in anderen Bereichen kompensiert werden. Allgemein ist es die Aufgabe der Produktionssteuerung, die Sollvorgaben der Produktionsplanung trotz unvermeidlicher Abweichungen im Produktionsprozess umzusetzen [11]. Aus diesem Grund wird das Lastmanagement, das allgemein eine bewusste Änderung der Stromnachfrage durch den Endkunden beschreibt, in die Produktionssteuerung integriert.

Für den vorliegenden Artikel fasst das Lastmanagement den Einsatz der zuvor beschriebenen Maßnahmen im kurzfristigen Zeithorizont der Produktionssteuerung zusammen. Auf diese Weise wird erreicht, dass laststeuernde Maßnahmen möglichst geringe Auswirkungen auf den Materialfluss haben. In Abbildung 8 ist ein Vorgehensmodell dargestellt, wie sich das Lastmanagement als Bestandteil der untertägigen Produktionssteuerung umsetzen lässt. Dabei dient das vorgeschlagene Vorgehen als Ergänzung zu konventionellen Produktionssteuerungsverfahren.

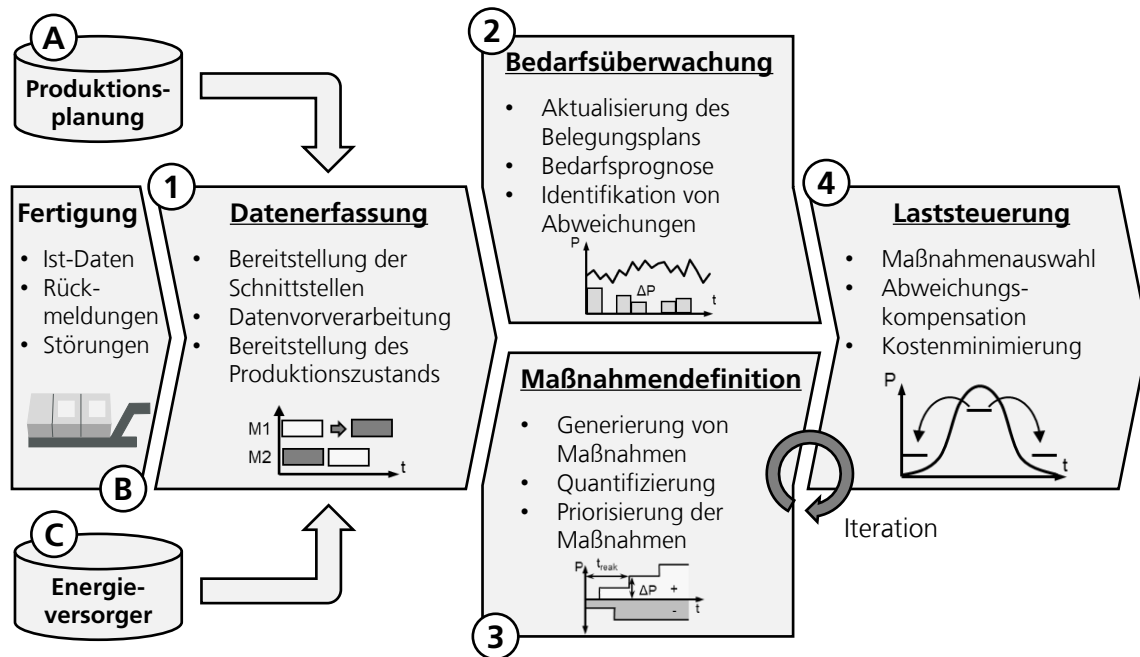


Abbildung 8: Vorgehensschritte des Lastmanagements als Bestandteil der Produktionssteuerung [12]

Das Vorgehen nutzt als Eingangsinformationen einen Fahrplan, der vorab die Verfügbarkeit der elektrischen Energie für einen Tag vorgibt. Dieser Fahrplan wird der Produktionssteuerung gemeinsam mit einem Maschinenbelegungsplan von einer zuvor erfolgten Produktionsplanung (A) übergeben. Ergänzend werden Ist-Werte zum Produktionsfortschritt und der Leistungsaufnahme (B) sowie Preisinformationen, wie beispielsweise der Spotmarkt-Preis, vom Energieversorger (C) ausgewertet.

Der erste Vorgehensschritt umfasst eine Datenerfassung (1), in dessen Zuge Betriebs- und Maschinendaten sowie die reale Leistungsaufnahme der Produktion aufgenommen und vorverarbeitet werden, um ein echtzeitnahes Zustandsabbild der Produktion zu erstellen. Aufbauend auf diesen Informationen wird in der Bedarfsüberwachung (2) eine Aktualisierung des Maschinenbelegungsplans vorgenommen, indem Veränderungen und Verschiebungen für den restlichen Arbeitstag errechnet werden. Auf Grundlage des aktuellen Belegungsplans wird eine Lastgangprognose für den verbleibenden Tag abgeleitet. Der vorhergesagte Lastgang wird anschließend mit dem vorgegebenen Fahrplan verglichen und daraus ermittelt, inwiefern im Laufe des Tages Abweichungen erwartet werden. Diese Abweichungen können beispielsweise anhand aktueller Strompreise bewertet werden.

Im Rahmen der Maßnahmendefinition (3) werden potentielle laststeuernde Maßnahmen aufgenommen. Dazu dient unter anderem der Maßnahmenkatalog, der durch das vorab beschriebene Bewertungskonzept ermittelt wurde. Die Maßnahmen umfassen beispielsweise abschaltbare Lasten der TGA, die Zu- und Abschaltung einzelner Betriebsmittel oder der kurzfristige Spotmarkt-Handel. Zuerst wird ermittelt, welche dieser Maßnahmen im betrachteten Zeitraum, d. h. innerhalb des verbleibenden Arbeitstages, eingesetzt werden können. Die Maßnahmen müssen außerdem hinsichtlich der möglichen Lastveränderungen sowie ihrer zeitlichen Parameter quantifiziert werden. Daraus kann ein Portfolio von aktuell verfügbaren laststeuernden Maßnahmen erstellt werden.

Im letzten Schritt, der Laststeuerung (4), werden aus diesem Portfolio die passenden Maßnahmen zur Kompensation der identifizierten Lastabweichungen ausgewählt. Das Maßnahmenportfolio verändert sich durch die Auswahl einer Maßnahme, wenn dadurch beispielsweise ein Puffer entleert wird, und muss daher anschließend neu berechnet werden. Da das Maßnahmenportfolio einer Produktion limitiert ist, werden die erwarteten Abweichungen durch das beschriebene Vorgehen voraussichtlich nicht komplett ausgeglichen. Vielmehr wird mit dem Vorgehen eine Minimierung der durch die Abweichungen entstehenden Kosten angestrebt. Die Maßnahmenauswahl soll in Zukunft durch einen geeigneten Algorithmus durchgeführt werden, der in bestehende Informationssysteme der Produktionssteuerung, wie beispielsweise Manufacturing Execution Systeme, integriert werden kann. Alternativ kann die Auswahl aufbauend auf dem Maßnahmenportfolio auch durch einen menschlichen Bediener erfolgen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die zunehmende Einbindung erneuerbarer Energien in die Stromversorgung erzeugt eine erhöhte Volatilität des Stromangebots. Zum Ausgleich dieser Schwankungen können produzierende Unternehmen ihren Lastgang entsprechend anpassen. Viele Unternehmen haben aktuell einen geringen Kenntnisstand bezüglich der hierbei zur Verfügung stehenden Möglichkeiten. Daher wurde eine Vorgehensweise zur systematischen Identifizierung und Bewertung der Potentiale vorgestellt. Neben einer vorrangigen Kategorisierung von Maßnahmen ist es erforderlich, die zeitlichen Eigenschaften sowie Kostenfunktionen für Maßnahmen aufzunehmen. Diese Daten sind für die Umsetzung in der PPS erforderlich und werden anhand eines bewerteten Maßnahmenkatalogs übergeben. Anhand der bisher vorgenommenen Bewertung kann das Management keine Investitionsentscheidung für z. B. Qualifikationsmaßnahmen für Märkte zur Vergütung von Energieflexibilität treffen. Daher ist es erforderlich, im nächsten Schritt eine wirtschaftliche Bewertung der Maßnahmen zu fokussieren.

Literatur

- [1] BMWi (Hrsg.): Zweiter Monitoring-Bericht "Energie der Zukunft". Berlin: 03-2014.
- [2] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (Hrsg.): Auswertungstabellen zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2013. Berlin: 09-2014.
- [3] Reinhart, G.; Hamacher, T.; Dornmaier, R.; Graßl, M.; Keller, F. Ergebnisrapport zur Flexibilisierung der Energienachfrage - Ergebnisse des Arbeitskreises I „Wirtschaftliche Synchronisation von Energieangebot und -nachfrage“ des Forschungsverbunds FOREnergy. Augsburg: 11-2014.
- [4] BMWi (Hrsg.): Ein Strommarkt für die Energiewende - Ergebnisrapport des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Weißbuch). Berlin: 07-2015.
- [5] Graßl, M.: Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion. Diss. TU München (2015). München: Utz 2015. ISBN: 978-3-8316-4476-6. (Forschungsberichte IWB 300).
- [6] Popp, R.; Zäh, M. F.: Determination of the Technical Energy Flexibility of Production Systems. *Advanced Materials Research* 1018 (2014), pp. 365-372.
- [7] Kabelitz, S.; Streckfuß, U.: Energieflexibilität in der Produktionstheorie. *ZWF Zeitschrift für den wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 109 (2014) H. 1-2, S. 43–45.
- [8] Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Integration von Lastmanagementstrategien in die Produktionssteuerung. *ZWF* 11/2015, S.675-680.
- [9] Simon, P.; Datzmann, S.: Saisonale Verschiebung von Last in energieintensiven Unternehmen. *Energie* 2.0 02-2016.
- [10] Schultz, C.; Keller, F.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Einbindung von Energiedaten in die Produktionsplanung und -steuerung. *Wt Online* 04-2016.
- [11] Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M.: Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56 (2007) 2, S. 783-809.
- [12] Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Energieorientierte Produktionssteuerung - Verfahren für eine Produktionssteuerung zur Senkung der Energiekosten. *Wt Online* 03-2016.