

Energieflexible Fabriken

Maßnahmen zur Steuerung des Energiebedarfs von Fabriken

Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
Dipl.-Ing. Markus Graßl

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)
Projektgruppe Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen (RMV)
Beim Glaspalast 5
86153 Augsburg
Tel.: +49 821 56883-74
Fax: +49 821 56883-50
E-Mail: markus.grassl@iwu.fraunhofer.de
www.iwu.fraunhofer.de/rmv

Zusammenfassung

Aufgrund der Energiewende und dem damit verbundenen Ausbau der erneuerbaren volatilen Energien sind Unternehmen gefordert, energieflexibel zu agieren. Der folgende Beitrag gibt eine Einführung in die Thematik der Energieflexibilität und stellt Maßnahmen zur Beeinflussung des Energiebedarfs produzierender Unternehmen vor.

1 Darstellung des Handlungsbedarfs

Deutschland plant bis zum Jahr 2022 aus der Kernenergie auszusteigen. Um die dadurch entstehende Energie-Versorgungslücke zumindest teilweise zu schließen und aufgrund der notwendigen Reduzierung der Treibhausgasemissionen zum Schutze der Umwelt, soll bundesweit der Anteil an regenerativen Energien bis zum Jahr 2050 schrittweise auf 80 % erhöht werden. Die geplante Steigerung soll dabei insbesondere durch den Aufbau von Windkraftanlagen erzielt werden [1]. Allerdings weist Windkraft (und auch Sonnenstrahlung) eine stochastische Erzeugung auf, wodurch es zu großen Schwankungen in der Stromerzeugung im Verlauf eines Tages kommen kann, wie die dunkle Kurve in Abbildung 1 verdeutlicht.

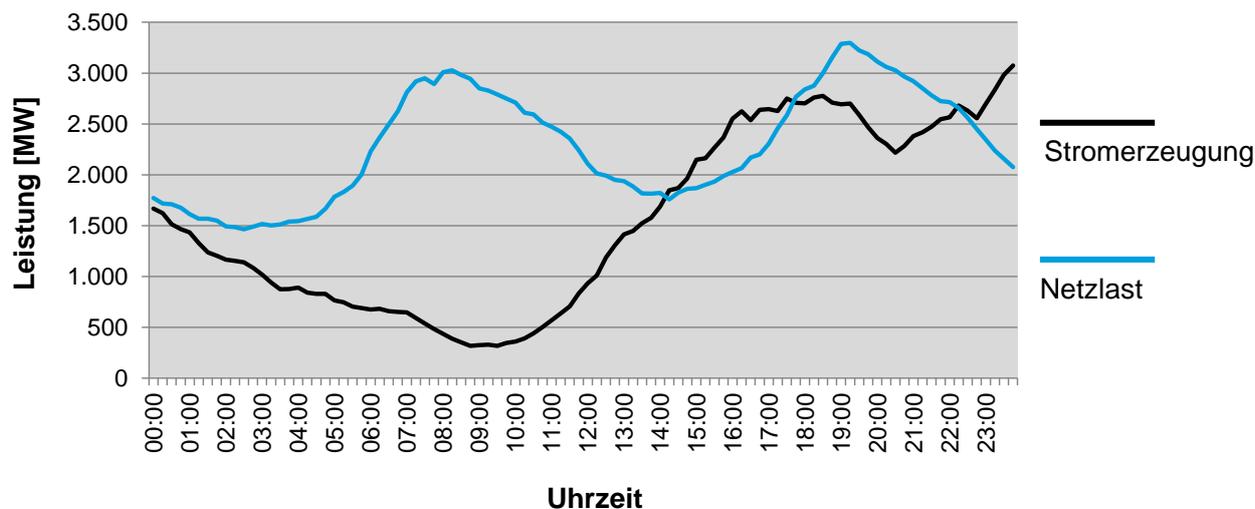


Abbildung 1: Schwankende Stromerzeugung aus Windkraft und Tagesverlauf der Netzlast [2, 3]

In Folge dessen kann es in Abhängigkeit der Wind- und Wetterlage zeitweise zu einem Ungleichgewicht zwischen Stromangebot und -nachfrage kommen (siehe Stromerzeugungs- und Netzlastkurve am Vormittag in Abbildung 1). Da aber dieses Gleichgewicht für die Stabilität des Stromnetzes und damit der Energieversorgungssicherheit unabdingbar ist, zeigen Strommärkte Ausprägungen, welche das Verhalten der Stromkunden hinsichtlich der Netzstabilität beeinflussen sollen. So treten auf den Strombörsen bei einem Überangebot an elektrischen Strom bei gleichzeitig niedrigerer Nachfrage zeitweise sogar negative Strompreise auf, d. h. der Stromkunde erhält Geld vom Energieversorger beim Kauf von elektrischer Energie. Dieser Effekt ist in Abbildung 2 ersichtlich, welche den Strompreisverlauf am 5.1.2012 an der Strombörse EPEX-Spot zeigt [4]. Demgegenüber stehen extreme Preisausschläge bei großer Nachfrage an elektrischer Energie bei gleichzeitig geringem Stromangebot.

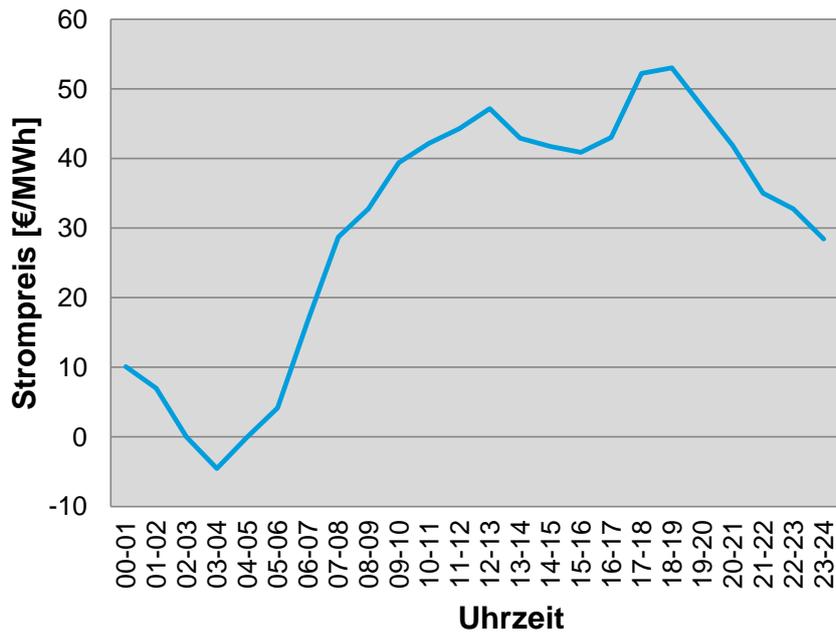


Abbildung 2: Strompreisschwankungen an der EPEX-Spot am 5. Januar 2012 [4]

Produzierende Unternehmen weisen aber prinzipiell die Fähigkeit auf, ihre Produktionsprozesse anzupassen und können somit ihren Energiebedarf zeitlich beeinflussen. Dies eröffnet für Unternehmen die Möglichkeit – bei entsprechend vorhandenen Marktstrukturen – direkt oder indirekt, z. B. durch ein Pooling-Unternehmen, welches für mehrere Unternehmen Energie ein- bzw. verkauft, von den Preisschwankungen auf den Börsen zu profitieren. Produzierende Unternehmen können somit ihre Stromkosten senken. Auf der anderen Seite können durch ein angepasstes Verhalten der produzierenden Unternehmen Vorteile für das gesamte Energieversorgungssystem erzielt werden. Da durch den Ausbau der volatilen erneuerbaren Energien die Schwankungen im Stromnetz zunehmen und somit die Energieversorgungssicherheit sinkt, müssen Maßnahmen ergriffen werden, um die Stabilität der Netze auch weiterhin gewährleisten zu können [5]. Konventionelle Ansätze, wie der Bau von Regelleistungskraftwerken, die Installation von Energiespeichern oder der Ausbau der Stromnetze stellen gegenüber dem angepassten Verhalten der Stromkunden eine teurere Alternative dar, was wiederum zu steigenden Energiekosten führt. Allerdings stehen den produzierenden Unternehmen bisher noch keine Methoden und Vorgehensweisen zur Verfügung, welche eine Bewertung von Maßnahmen zur Anpassung des Energiebedarfs an den Strompreis zulassen. Darüber hinaus ist das Wissen über mögliche Anpassungsmaßnahmen bei produzierenden Unternehmen nicht ausgeprägt [6]. Dieser Beitrag soll daher mögliche Maßnahmen zur Beeinflussung des Energiebedarfs eines Unternehmens darstellen.

2 Energieflexible Fabriken

2.1 Definition von Energieflexibilität

Produzierende Unternehmen agieren heutzutage in einem turbulenten Umfeld [7]. Diese Turbulenzen zeigen sich beispielsweise durch sich verkürzende Produktlebens- oder Innovationszyklen. Um in diesem turbulenten Umfeld bestehen zu können, gilt es für Unternehmen, ihre Produktionssysteme flexibel zu gestalten. Flexibilität wird in diesem Zusammenhang allgemein als die Fähigkeit eines Produktionssystems definiert, sich schnell und nur mit sehr geringem finanziellen Aufwand an geänderte Einflussfaktoren anzupassen [8]. In der Literatur werden dabei verschiedene Arten von Flexibilität unterschieden, welche die Fähigkeiten eines Produktionssystems beschreiben, diesen unterschiedlichen Einflussfaktoren entgegenwirken zu können [9, 10]. So kann sich beispielsweise ein mengenflexibles Produktionssystem innerhalb bestimmter Korridore in einem vorab festgelegten Ausmaß an Schwankungen der Nachfragemenge des Kunden anpassen. Bei Betrachtung der in Abschnitt 1 beschriebenen Veränderungen der Stromerzeugung wird dabei deutlich, dass sich produzierende Unternehmen in Zukunft auch flexibel an Änderungen des Strommarktes anpassen müssen, d. h. Unternehmen und ihre Produktionssysteme müssen energieflexibel werden. Energieflexibilität wird dabei in Anlehnung an die allgemeine Flexibilitätsdefinition als die Fähigkeit eines Produktionssystems definiert, sich schnell und mit sehr geringem finanziellen Aufwand an Änderungen des Energiemarktes anzupassen [11].

2.2 Zusammenspiel von Zuständen und Maßnahmen energieflexibler Fabriken

Der Lastgang und somit der Energiebedarf einer Fabrik ergibt sich aus der Summe der Lastgänge der einzelnen Maschinen, Anlagen und Verbraucher der Fabrik. Die einzelnen Anlagen der Fabrik nehmen dabei im Rahmen des Produktionsprozesses verschiedene Maschinenzustände ein. Mögliche Zustände sind beispielsweise *Stand-by*, d. h. wesentliche Aggregate einer Anlage sind abgeschaltet und die Anlage ist nicht bereit den Fertigungsprozess durchzuführen, oder *Produzieren*, d. h. die Fertigung eines bestimmten Produktes wird vollzogen. Der Leistungs- bzw. Energiebedarf einer Anlage hängt dabei maßgeblich von diesen Maschinenzuständen ab [12].

Eine Anpassung des Energiebedarfs im Rahmen von Änderungen des Energiemarktes kann somit durch einen Wechsel der eingenommenen Zustände des Produktionssystems bzw. der Anlagen des Produktionssystems vollzogen werden. Dieser Wechsel der Zustände kann durch die Umsetzung verschiedener Maßnahmen erzielt werden, wie z. B. das Abschalten einer Anlage, wodurch ein Wechsel des eingenommenen Zustands der Anlage vom Zustand *Betriebsbereit* zum Zustand *Aus* vollzogen wird [11]. Der Zusammenhang zwischen dem Zustand eines Produktionssystems bzw. einer Anlage,

dem Wechsel der Zustände durch Maßnahmen sowie der korrespondierende Energiebedarf ist in Abbildung 3 verdeutlicht.

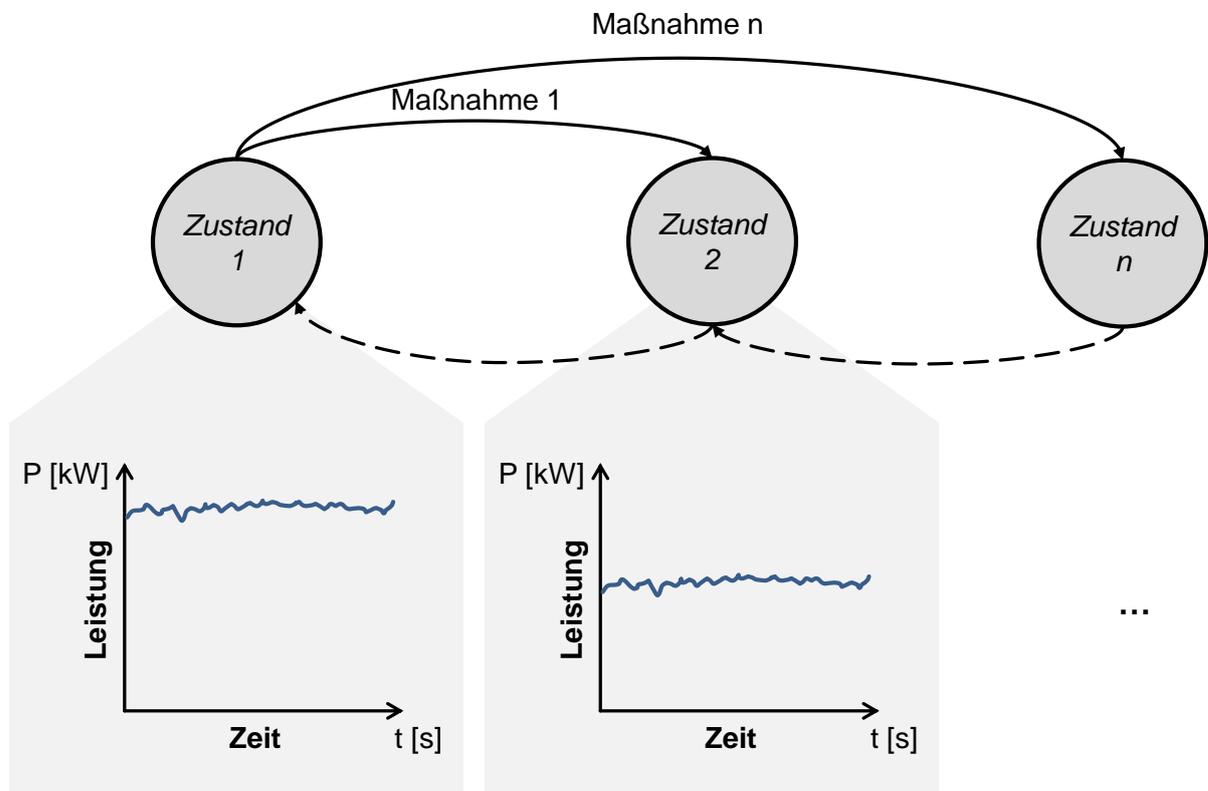


Abbildung 3: Zustände, Maßnahmen und Energiebedarf

Im Rahmen des nächsten Abschnitts sollen mögliche Maßnahmen zur Anpassung des Energiebedarfs an Änderungen des Energiemarktes identifiziert und beschrieben werden.

3 Ableitung von Maßnahmen zur Steuerung des Energiebedarfs

3.1 Definition des Suchraums

Wie bereits erwähnt, hängt der Energiebedarf eines Produktionssystems von den eingenommenen Zuständen seiner Anlagen ab. Dies hat zur Folge, dass der Energiebedarf einer Fabrik – mit wenigen Ausnahmen – nicht direkt beeinflusst werden kann. Vielmehr müssen Veränderungen und Anpassungen im Produktionsprozess vorgenommen werden, welche einen Wechsel der eingenommenen Zustände zur Folge hat, um somit indirekt den Energiebedarf zu beeinflussen. Die einem Produktionssystem zur Verfügung stehenden Maßnahmen im Rahmen der Energieflexibilität resultiert daher aus verschiedenen anderen Flexibilitätsarten des Produktionssystems, wie z. B. Mengenflexibilität, welche die Anpassungsfähigkeit von Fabriken ermöglichen. Aus diesem Grund sollen im Folgenden einige relevante Flexibilitätsarten nach [9] erläutert

werden, aus welchen sich mögliche Maßnahmen zur Anpassung des Energiebedarfs ableiten lassen. Die betrachteten Flexibilitätsarten sind

- Mengenflexibilität
- Routenflexibilität
- Operationsflexibilität
- Maschinenflexibilität
- Personaleinsatzflexibilität

Mengenflexibilität

Unter Mengenflexibilität wird die Fähigkeit eines Produktionssystems verstanden, wirtschaftlich bei unterschiedlichen Ausbringungsmengen zu agieren. Die Begriffe Volumenflexibilität oder auch Stückzahlflexibilität werden dabei in der wissenschaftlichen Literatur synonym verwendet.

Routenflexibilität

Routenflexibilität beschreibt die Möglichkeit eines Produktionssystems, bestimmte Produkte über alternative Routen oder Fertigungspfade herzustellen, d. h. Produkte auf verschiedenen Anlagen fertigen zu können. Auf diese Weise können Engpässe bei Überlastungen oder Ausfällen von einzelnen Maschinen und Anlagen umgangen werden.

Operationsflexibilität

Operationsflexibilität beschreibt die Möglichkeit, ein Produkt auf unterschiedliche Art und Weise herzustellen. Sie dient somit – ähnlich wie Maschinenflexibilität – u. a. als Befähiger der Routenflexibilität, da sie verschiedenen Maschinenbelegungspläne und somit auch alternative Routen für einzelne Produkte ermöglicht.

Maschinenflexibilität

Maschinenflexibilität bezieht sich auf die verschiedenen Operationen, welche eine Anlage ohne großen Umrüstaufwand vollziehen kann. Diese Art der Flexibilität ist die Voraussetzung für viele weitere Flexibilitätsarten, wie z. B. der Routenflexibilität, da die Anzahl der möglichen Routen eines Produktes zunimmt, wenn die Anzahl der für die Bearbeitung eines Bauteils zur Verfügung stehenden Maschinen steigt.

Personaleinsatzflexibilität

Die Personaleinsatzflexibilität ermöglicht es, Mitarbeiter flexibel einzusetzen. So sind sowohl eine variable Mitarbeiter-Arbeitsplatz-Kombination möglich als auch unterschiedliche Arbeitszeitmodelle denkbar. Es bleibt aber festzuhalten, dass diese Flexibilitätsart im Gegensatz zu den vorangegangenen nicht von [9] definiert wurde. Sie kann aber, wie auch die Operationsflexibilität und die Maschinenflexibilität, als Befähiger weiterer Flexibilitätsarten angesehen werden.

3.2 Ermittlung von Maßnahmen

In diesem Abschnitt werden die Freiheitsgrade im Hinblick auf die Beeinflussung des Energiebedarfs im Rahmen der im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Flexibilitätsarten untersucht und somit mögliche Maßnahmen abgeleitet.

Im Rahmen der Mengenflexibilität lassen sich einige Möglichkeiten finden, den Energiebedarf eines Produktionssystems anzupassen. Insbesondere bei einem nicht vollständig ausgelasteten Produktionssystem ergeben sich Freiheitsgrade in Bezug auf den Start von Prozessen. Ein nicht vollständig ausgelastetes Produktionssystem bedeutet, dass Pausenzeiten zwischen dem bearbeiten verschiedener Aufträge auftreten können. Dies erlaubt das zeitliche Verschieben, d. h. Vorziehen oder Verzögern, des Startzeitpunktes von Aufträgen und somit das Anpassen des Energiebedarfs. Auch können so evtl. nötige energieintensive Hochfahrprozesse von Anlagen verschoben werden.

Im Rahmen der Routenflexibilität besteht die Möglichkeit Produkte auf unterschiedlichen Anlagen zu fertigen. Sofern diese Anlagen unterschiedlichen Alters, Herstellers oder Größe sind, weisen sie dabei i. d. R. einen unterschiedlichen Energiebedarf auf. Eine Möglichkeit den Energiebedarf anzupassen besteht daher in der Zuordnung von Aufträgen auf die jeweiligen Anlagen im Rahmen der Maschinenbelegung, welche durch die Routenflexibilität des Produktionssystems befähigt wird.

Die Operationsflexibilität ermöglicht es, Produkte auf unterschiedliche Weisen, z. B. durch die Wahl verschiedener Prozessparameter herzustellen. Da ein enger Zusammenhang zwischen gewählten Prozessparametern und benötigte Energie der Anlage besteht, ergibt sich auch hierdurch eine Möglichkeit den Energiebedarf anzupassen.

Wie bereits erläutert erlaubt die Maschinenflexibilität die Durchführung unterschiedlichster Operationen ohne großen Umrüstaufwand. Auf diese Weise können Auftragsreihenfolgen einfach verändert werden. Da der Energiebedarf eines Produktionssystems bzw. einer Anlage von den zu produzierenden Aufträgen abhängt kann somit der Energiebedarf schnell angepasst werden. Flexible Maschinen erlauben auch das Unterbrechen von Bearbeitungsprozessen und somit eine kurzfristige Reduzierung des Energiebedarfs ohne negative Auswirkungen auf die Produktqualität.

Eine hohe Personaleinsatzflexibilität ermöglicht es, Pausen- und Schichtzeiten flexibel zu verändern. Somit ist eine Anpassung des Energiebedarfs an Änderungen des Energiemarkts möglich, da ein Produktionssystem in einem nicht aktiven Zustand – z. B. in Pausenzeiten – in der Regel einen niedrigeren Energiebedarf aufweist als im produzierenden Zustand.

Die Ausführungen zeigen, dass flexible Fabriken auch ein Maß an Energieflexibilität aufweisen. Dabei müssen Produktionssysteme nicht alle Flexibilitätsarten beinhalten, um eine hohe Energieflexibilität zu haben. Vielmehr ist die Wirkungsweise einzelner Maßnahmen von den spezifischen Prozessen eines Produktionssystems abhängig.

Daraus resultiert auch der Bedarf an flexiblen Prozessen und Anlagen im Rahmen der Energieflexibilität.

Neben den aufgeführten Maßnahmen, welche eine indirekte Beeinflussung des Energiebedarfs zulassen, können auch direkt wirkende Maßnahmen identifiziert werden. So können Energiespeicher in der Produktion im Bedarfsfall genutzt werden, wodurch sich der Energiebedarf eines Produktionssystems verändern lässt. Auch ein kurzfristiger Wechsel der eingesetzten Energieart, z. B. Nutzung von Gas statt Strom bei entsprechenden Öfen, welche beide Energiearten nutzen können, lässt somit die Anpassung des Energiebedarfs zu.

In Tabelle 1 sind die verschiedenen möglichen Maßnahmen sowie ihre Wirkungsweise zusammenfasst dargestellt.

Maßnahme	Wirkungsweise	Befähigt durch...
Anpassung von Hochfahrprozessen	Indirekte Wirkung	Mengenflexibilität
Anpassung des Auftragsstarts	Indirekte Wirkung	Mengenflexibilität
Anpassung der Maschinenbelegung	Indirekte Wirkung	Routenflexibilität
Anpassung von Prozessparameter	Indirekte Wirkung	Operationsflexibilität
Unterbrechung eines Auftrags	Indirekte Wirkung	Maschinenflexibilität
Anpassung der Auftragsreihenfolge	Indirekte Wirkung	Maschinenflexibilität
Anpassung von Schichtzeiten	Indirekte Wirkung	Personaleinsatzflexibilität
Anpassung von Pausenzeiten	Indirekte Wirkung	Personaleinsatzflexibilität
Wechsel der Energiequelle	Direkte Wirkung	Energieflexibilität
Speicherung von Energie	Direkte Wirkung	Energieflexibilität

Tabelle 1: Mögliche Maßnahmen zur Beeinflussung des Energiebedarfs

4 Praxisbeispiele für Maßnahmen

In diesem Abschnitt sollen einige der zuvor identifizierten Maßnahmen anhand von Praxisbeispielen verdeutlicht werden. Zum einen wird die Maßnahme der Anpassung der Auftragsreihenfolge vertiefend dargestellt und zum anderen soll die Wirkungsweise des Anpassens von Pausenzeiten aufgezeigt werden.

Im Rahmen einer Untersuchung einer Laserschneidanlage in der industriellen Praxis konnte die Wirkungsweise der Maßnahme der Anpassung der Auftragsreihenfolge nachgewiesen werden. Hierzu wurden die bearbeiteten Aufträge über zwei Wochen dokumentiert und mit dem Leistungsbedarf der Anlage verglichen. Dabei zeigte sich eine Abhängigkeit zwischen dem zu bearbeitendem Material, z. B. Aluminium oder

Nichtrostendem-Stahl, der Materialdicke, der Kontur des zu bearbeitenden Bauteils sowie dem benötigten Leistungsbedarf. Es konnte ein Unterschied zwischen dem minimalen und dem maximalen Leistungsbedarf der Anlage zur Bearbeitung eines Bauteils von 36 kW bzw. 40 % des maximalen Leistungsbedarfs der Anlage nachgewiesen werden. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Abbildung 4 dargestellt. Die ausgeprägten Unterschiede zwischen den jeweiligen Leistungs- bzw. Energiebedarfen der Anlage in Abhängigkeit der zu bearbeitenden Bauteile ermöglichen die Beeinflussung des Lastgangs durch die Anpassung der Auftragsreihenfolge.

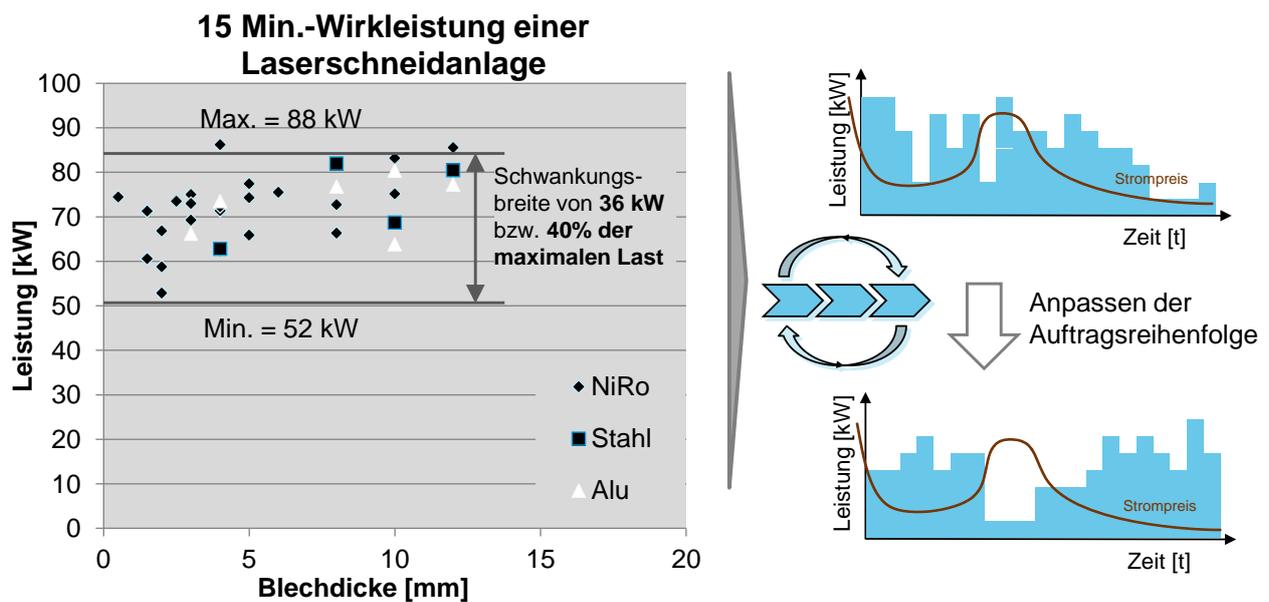


Abbildung 4: Darstellung des Leistungsbedarfs in Abhängigkeit von Aufträgen

Im Folgenden werden die Auswirkungen von Pausenzeiten auf den Energiebedarf eines Produktionssystems dargestellt. Hierzu ist in Abbildung 5 der Tageslastgang einer klassischen Werkstattfertigung aufgezeigt. Im Lastgang ist deutlich die Grundlast von ca. 25 kW zu erkennen, welche die Fabrik auch nachts bei stillstehender Produktion aufweist. Es ist auch ersichtlich, dass mit dem Produktionsbetrieb um ca. 5 Uhr begonnen wurde und der Betrieb um ca. 22 Uhr beendet wurde. Die Auswirkungen der Pausenzeiten sind in der Abbildung rot markiert. Es ist zu den Pausen um 9 und 18 Uhr jeweils ein deutlicher Abfall der Last von ca. 100 kW erkennbar, was etwa 30 % der durchschnittlichen Last im Produktionsbetrieb entspricht. Bei Vorhandensein einer Personaleinsatzflexibilität, welche in Grenzen ein Verschieben der Pausenzeiten ermöglicht, kann der Energiebedarf kurzfristig deutlich reduziert werden.

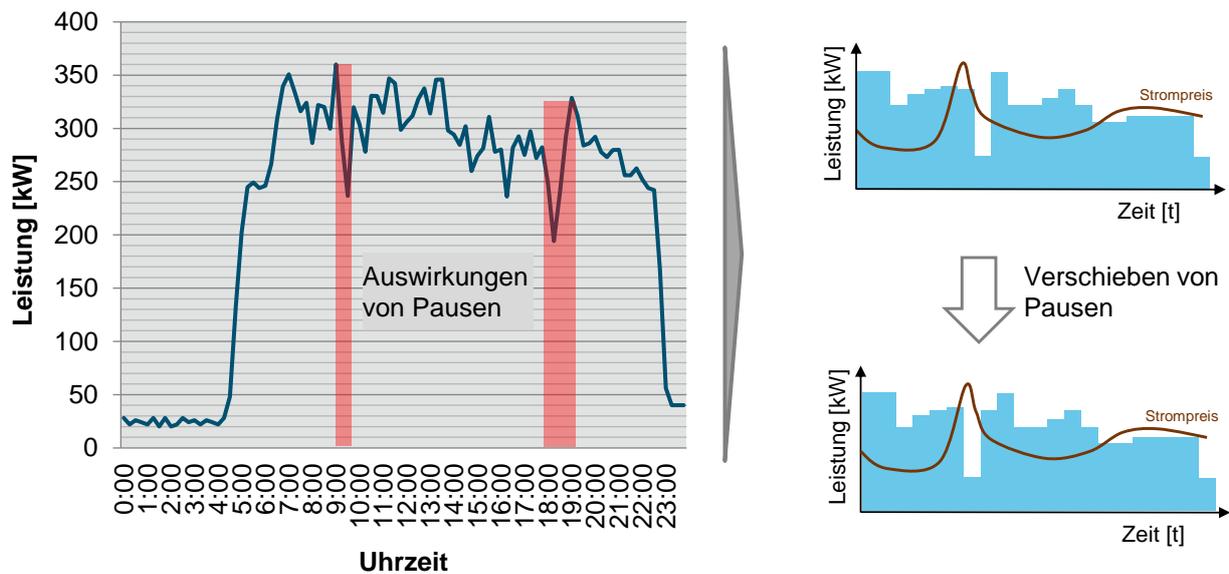


Abbildung 5: Darstellung der Auswirkungen von Pausenzeiten

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Ausbau erneuerbarer volatiler Energien führt zu neuen Herausforderungen für den Energiemarkt und somit auch für produzierende Unternehmen. Neben steigenden Energiekosten und einer sinkenden Versorgungssicherheit ist insbesondere mit schwankenden Strompreisen auf den Energiemärkten zu rechnen. Dieses Preisverhalten ermöglicht es produzierenden Unternehmen wirtschaftliche Vorteile aus einer angepassten Stromnachfrage zu ziehen. Hierfür müssen Unternehmen allerdings eine Energieflexibilität aufweisen, welche eine Anpassung des Energiebedarfs zulässt. Im Rahmen dieses Beitrags wurden unterschiedliche Maßnahmen erläutert, welche eine direkte oder indirekte Beeinflussung des Energiebedarfs im Rahmen der Energieflexibilität ermöglichen. Darüber hinaus wurde aufgezeigt, welche Flexibilitätsarten zur Nutzung dieser Maßnahmen befähigen und somit auch in einer Energieflexibilität des Produktionssystems resultieren. Abschließend wurden ausgewählte Maßnahmen anhand von Praxisbeispielen vertiefend erläutert.

Damit produzierende Unternehmen aber Kostenvorteile aus einem angepassten Energiebedarfsverhalten erzielen zu können, sind insbesondere die Kosten für Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen in folgenden Arbeiten zu berücksichtigen und im Rahmen einer ganzheitlichen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu bewerten.

6 Danksagung

Die dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsverbunds FOREnergy (www.forenergy.de) erarbeitet. Wir möchten hiermit der Bayerischen Forschungstiftung für die großzügige Förderung des Projekts danken.

Literaturverzeichnis

- [1] BMWi: Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin: BMWi 2010.
 - [2] Tennet 2012: < www.tennetso.de > - 03.10.2012.
 - [3] EEX 2011: < www.transparency.eex.com > - 18.08.2011.
 - [4] EEX 2012: < www.eex.com > - 03.06.2012.
 - [5] Konstantin, P.: Praxisbuch Energiewirtschaft - Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt. 2. Auflage. Berlin: Springer 2009.
 - [6] Pechmann, A.; Schöler, I.: Optimizing Energy Costs by Intelligent Production Scheduling. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C.: Localized Solutions for Sustainability in Manufacturing: Proceedings of 18th CIRP International Conference of Life Cycle Engineering. Braunschweig, 2.-4. May 2011. Berlin.
 - [7] Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser 2011.
 - [8] Nyhuis, P.; Heinen, T.; Reinhart, G.; Rimpau, C.; Abele, E.; Wörn, A.: Wandlungsfähige Produktionssysteme – Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. wt Werkstattstechnik online 98 (2008) 9, S. 85-91.
 - [9] Sethi, A. K.; Sethi, S. P.: Flexibility in Manufacturing: A Survey. In: The International Journal of Flexible Manufacturing Systems 2 (1990), S. 289-328.
 - [10] Beach, R.; Muhlemann, A. P.; Price, D. H.; Paterson, A.; Sharp, J. A.: A review of manufacturing flexibility. In: European Journal of Operations Research 122 (2000), S. 41-57.
 - [11] Reinhart, G.; Reinhardt, S.; Graßl, M.: Energieflexible Produktionssysteme: Einführungen zur Bewertung der Energieflexibilität von Produktionssystemen. wt Werkstattstechnik online 102 (2012) 9, S. 622-628.
 - [12] Abele, E.; Schrems, S.; Schraml, P.: Energieeffizienz in der Fertigungsplanung: Frühzeitige Abschätzung des Energieverbrauchs von Produktionsmaschinen in der Mittel- und Großserienfertigung. In: wt Werkstattstechnik online 102 (2012), S. 38-42.
-