

ÖKONOMISCHE BEWERTUNG HYBRIDER ANLAGEN MITHILFE VON LASTPROFILPROGNOSEN

Ekrem Köse¹, Alexander Sauer²

¹ Fraunhofer Institut für Produktions- und Automatisierungstechnik, Nobelstr. 12 in 70569 Stuttgart, Telefonnr. +49 711 970-3624, ekrem.koese@ipa.fraunhofer.de, <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/Kompetenzen/effizienzsysteme/energiemanagement-und--optimierung.html>

² Universität Stuttgart, Institut für Energieeffizienz in der Produktion, Nobelstr. 12 in 70569 Stuttgart, Telefonnr. +49 711 970 3600, alexander.sauer@eep.uni-stuttgart.de, <https://www.eep.uni-stuttgart.de/>

Kurzfassung:

Durch Volatilität in der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen sind die Strompreise an der Börse oft starken Schwankungen unterworfen und der Flexibilitätsmarkt für Regelenergie bleibt weiterhin wichtig. Dabei können energieflexible Produktionsanlagen einen signifikanten Beitrag zur Stabilisierung des Netzes beisteuern.

Allerdings stehen Unternehmen unter enormem Kostendruck und können die zusätzlich benötigten Komponenten zur Umstellung und die damit entstehenden Zusatzkosten zur Erhöhung der Energieflexibilität nicht tragen. Durch die Vermarktung dieser gewonnenen Energieflexibilität können Einnahmen generiert und die Zusatzkosten somit reduziert werden. Um die Höhe der Einnahmen vor der Investition abschätzen und somit die Amortisationsdauer bestimmen zu können, muss zunächst ein belastbares Lastprofil generiert werden. Das Fraunhofer IPA hat gemeinsam mit dem Institut für Energieeffizienz in der Produktion der Universität Stuttgart eine Methode entwickelt, mit der es möglich ist ein Lastprofil für energieflexible Anlagen zu generieren, anhand dessen die möglichen Erträge am Regelenergiemarkt abgeschätzt werden könnte.

Keywords: Energieflexibilität, Hybride Energieversorgung, Regelenergie, Lastprognose

1 Motivation

Die erneuerbaren Energiequellen deckten 2019 in Deutschland fast 43% des Stromverbrauchs ab [1]. Der steigende Anteil erneuerbarer Energieträger im Stromnetz wirkt sich auch auf die Netzstabilität aus. Die Stabilität des Netzes kann durch Abschaltung regenerativer Anlagen (Einspeisemanagement), Bereitstellung von Regelenergie und Abschaltung von energieerzeugenden Anlagen gewährleistet werden. Die Unternehmen, die die Stabilisierung des Netzes unterstützen, werden für Abrufe oder Stillstände ihrer Anlagen vergütet. Im Jahr 2018 waren die Kosten für Redispatch-Maßnahmen mit Markt- und Netzreservekraftwerken in Deutschland weiterhin auf einem hohen Niveau und betragen zusammen 803 Millionen Euro [2]. Hybride, bzw. bivalente Produktionsanlagen – Maschinen, die sowohl elektrisch, als auch mit einem weiteren Energieträger betrieben und binnen kurzer Zeit dynamisch zwischen diesen beiden Energieträgern wechseln können – bieten das Potenzial mit ihrer Flexibilität einen enormen Beitrag zur Stabilisierung des Stromnetzes beizutragen [3]. Da die Einnahmen vom Regelenergiemarkt und die Energiekosten stark vom Lastprofil abhängen [4], muss vor der Investitionsentscheidung ein Lastprofil erzeugt werden, um eine genauere

Entscheidungsgrundlage zu erzeugen. Das Fraunhofer IPA und das Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart haben eine Methode entwickelt, dessen Ergebnis ein Lastprofil für energieflexible Anlagen erzeugt, welches unterstützt die möglichen Erträge aus dem Anbieten von Energieflexibilität am Regelenergiemarkt abzuschätzen.

Im folgenden Kapitel wird das Thema Energieflexibilität und Regelenergiemarkt aufgearbeitet. Daraufhin werden verschiedene Möglichkeiten der Lastprofilgenerierung und Lastprognose aufgezeigt. Im vierten Kapitel wird die entwickelte Methode vorgestellt, bevor es im fünften Kapitel am Beispiel eines bivalenten Tiegelofens angewandt, im letzten Kapitel mit einem Fazit geschlossen und ein Ausblick gegeben wird.

2 Energieflexibilität

Energieflexibilität ist die Fähigkeit, sich schnell und mit geringem finanziellen Aufwand an die Veränderungen des Energiemarktes anzupassen [5]. Durch die regenerative Energieeinspeisung kann sich die Residuallast zwischen erneuerbarer Stromerzeugung und Stromverbrauch sehr schnell ins Positive und Negative verändern [6]. Diese Abweichungen haben einen starken Einfluss auf den Energiehandel – insbesondere auf die Strompreise. Im Day-Ahead-Markt wurden im Jahr 2017 185 Stunden negative Strompreise verzeichnet [7]. Im gleichen Jahr wurden jedoch auch mehrere Stunden mit über 100 €/MWh eingepreist. Demnach liegt die Volatilität der Energiemarktpreise auf einem hohen Niveau [8]. Um dieser Volatilität entgegenzutreten, muss die Nachfrageseite des Energiesystems flexibler werden.

2.1 Hybride und bivalente Anlagen

Unternehmen stehen unterschiedliche Flexibilitätsmaßnahmen zur Verfügung, die kurz-, mittel- oder langfristig umgesetzt und mehr oder weniger schnell und flexibel realisiert werden können (siehe Tabelle 1). In der Regel reichen viele dieser Maßnahmen aus, um die Stabilität des Netzes zu gewährleisten. Sinkt jedoch die Stromerzeugung aus Erneuerbaren für längere Zeit ab – auch Dunkelflaute genannt – ist die Stabilität des Stromnetzes gefährdet [9]. Abhängig vom individuellen Prozess, der Struktur des Unternehmens und den Qualitätsanforderungen an das Produkt können viele dieser Maßnahmen nicht öfter als 4-mal pro Monat aktiviert werden. Darüber hinaus haben viele der genannten Flexibilitätsmaßnahmen eine kürzere Abrufdauer als fünf Stunden. [10]

Tabelle 1 Spezifizierte Flexibilitätsmaßnahmen auf Basis ihrer Umsetzungsebene [11]

Unternehmensleitebene	Fertigungsleitebene	Fertigungsebene
<ul style="list-style-type: none">• Prozessstart verschieben• Schichtzeiten anpassen• Pausenzeiten verschieben• Produktionsreihenfolge ändern• Kapazitätsplanung anpassen	<ul style="list-style-type: none">• Energie speichern• Energiebezug anpassen• Auftrag unterbrechen• Auftragsstart verschieben• Auftragsreihenfolge ändern• Ressourcenbelegung anpassen	<ul style="list-style-type: none">• Prozess unterbrechen• Bearbeitungsreihenfolge anpassen• Prozessparameter anpassen• Energiebivalent betreiben• Energie speichern

Aufgrund dieser Einschränkung werden hybride und bivalente Anlagen immer wichtiger, da diese Maßnahme oft länger als fünf Stunden und öfter am Tag abgerufen werden kann.

Im Folgenden wird daher insbesondere das Flexibilitätspotenzial des dynamischen Wechsels zwischen zwei Energieträgern betrachtet.

Ein bivalenter Prozess kann zwischen zwei Energieträgern wechseln. Die Beschränkung auf die beiden Energieträger Gas und Strom wird oft auch als Hybridisierung bezeichnet. Multivalente Prozesse können zwischen mehr als zwei Energieträgern wechseln. Die Anwendung von bivalenten (industriellen) Prozessen ist nicht neu. In Heizkreisläufen sind häufig bivalente Prozesse zu finden. Der günstigere Energieträger liefert die Grundlast und die hohen Leistungsspitzen, die nicht häufig auftreten sollten, werden durch eine andere Technik (redundant) oder einen anderen Energieträger (bivalent) abgedeckt. Eine in der Industrie häufig dargestellte thermische bivalente Auslegung ist der Einsatz einer Wärmepumpe für die Grundlastversorgung mit einem zusätzlichen Heizkessel für die Spitzenlast.

Je nach den Anforderungen des thermischen Prozesses, z.B. Temperatur, Abrufgeschwindigkeit, Energiemenge, Übertragungsgeschwindigkeit, kann der Energiebedarf durch den Einsatz unterschiedlicher Energieträger und Technologien gedeckt werden. [3]

Regelenergie als Flexibilitätsmarkt

2.2 Es gibt viele Möglichkeiten, den Energieverbrauch und somit Energieflexibilität auf den Energiemärkten anzubieten. Einer der wichtigsten davon ist die Regelenergievermarktung. Es gibt drei Arten von Regelenergie [12]:

- Primärregelreserve (PRL)
- Sekundäre Regelreserve (SRL)
- Minutenreserve (auch tertiäre Regelreserve) (MRL)

Die drei Typen unterscheiden sich vor allem durch die Abrufgeschwindigkeit, die für eine Aktivierung der Regelenergie benötigt wird.

Die Aktivierung der PRL läuft vollautomatisch ab. Sie muss innerhalb von 30 Sekunden mit der vollen Leistung sofort hoch- oder heruntergefahren werden. Darüber hinaus wird die Menge der bereitgestellten Leistung vollständig vom Übertragungsnetzbetreiber gesteuert. Die PRL dauert maximal 15 Minuten an, um die Netzfrequenz im Stromnetz auf 50Hz zu halten. Die nächste Maßnahme, um das Netz stabil zu halten, ist die Aktivierung der SRL. Aufgrund der Anforderungen muss die Leistung der SRL innerhalb von fünf Minuten bereitgestellt werden. Nach 15 Minuten wird sie durch die MRL ersetzt. [13, 14] Diese Regelleistung muss innerhalb von 15 Minuten nach dem Abruf voll zur Verfügung stehen. Die Abrufdauer kann *"bis zu 4 Viertelstunden, bei Mehrfachstörungen bis zu mehrere Stunden"* betragen [12]. Grundsätzlich wird zwischen positiver und negativer Regelleistung unterschieden. Positive Regelleistung wird benötigt, wenn nicht genügend Energie im Netz vorhanden ist. Negative Regelleistung hingegen wird eingesetzt, wenn zu viel Strom im Netz vorhanden ist.

Eine weitere Anforderung des Übertragungsnetzbetreibers ist die Mindestleistung, die für die Teilnahme am Regelenergiemarkt angeboten werden muss. Sowohl für die SRL als auch für die MRL beträgt die Mindestleistung 5 MW bzw. 1 MW, die eine Anlage anzubieten hat.

Als Teil eines virtuellen Kraftwerks kann eine Anlage jedoch auch an diesen Märkten teilnehmen, die weniger als 5 MW, bzw. 1 MW anbieten. [14] Ein virtuelles Kraftwerk ist ein Verbund von mehreren (dezentralen) Stromerzeugungsanlagen und/oder Verbrauchern. Diese können sich in der Nähe oder weit voneinander entfernt befinden. Während die Anlagen im Netz eines virtuellen Kraftwerks in der Regel beliebig angeordnet sein können, ist es in diesem Zusammenhang notwendig, dass sich alle in der gleichen Regelzone eines Übertragungsnetzes befinden (Pooling). Die Überwachung eines virtuellen Kraftwerks erfolgt an einer zentralen Stelle. Das Pooling ist für das Anbieten von SRL erlaubt. Ein virtuelles Kraftwerk kann als Teil eines industriellen Smart Grids realisiert werden. Innerhalb eines industriellen Smart Grids ist es möglich Anlagen innerhalb vordefinierter Grenzen und Handlungsstrategien für ein Unternehmen zu steuern und zu regeln [15].

Da die Einhaltung der Aktivierung von 30 Sekunden bei der PRL bei vielen Anlagen nicht immer gewährleistet werden kann und die Erträge bei der SRL höher sind, wird im Folgenden nur die SRL weiter betrachtet.

Vergütung von Regelenergie

2.3 Die Vergütung der Teilnehmer am Regelenergiemarkt erfolgt durch den Übertragungsnetzbetreiber und teilt sich in zwei Komponenten auf. Die erste Komponente wird als "Leistungspreis" bezeichnet. Anbieter von Regelenergie werden dafür bezahlt, dass sie unabhängig von der tatsächlichen Lieferung oder Verbrauch von Strom die Leistung vorhalten. Sie müssen lediglich über eine Merit-Order-Auktion als Anbieter für die nächste Lieferperiode akzeptiert werden.

Die zweite Komponente – der "Arbeitspreis" – bezieht sich auf die Einnahmen der Anbieter bei Abruf von Regelenergie. Die Höhe der Erlöse ist wiederum abhängig vom Angebot, das ebenfalls per Merit-Order-Auktion ausgewählt wird. Abbildung 1 zeigt die durchschnittliche Höhe der möglichen Leistungspreiserlöse im Zeitraum vom 01.07.18 bis 30.06.2019 [12]. Innerhalb dieses Zeitraums wurde das sogenannte „Mischverfahren“ eingeführt – bei der die Leistungspreise und Arbeitspreise nicht getrennt, sondern kombiniert betrachtet wurden. Ende 2019 wurde das Mischverfahren wieder umgestellt. Wie in Abbildung 1 ersichtlich, ist die SRL in sechs Zeiträume untergliedert.

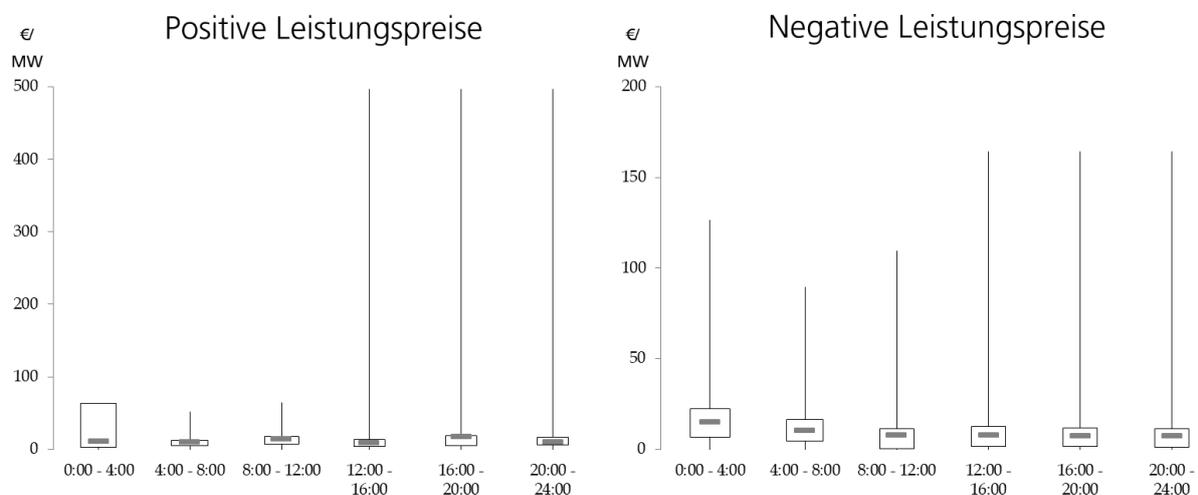


Abbildung 1 Leistungspreiserlöse für SRL im Zeitraum zwischen 01.07.18-30.06.19

Aus Abbildung 1 ist ersichtlich, dass die Spannbreite der Erträge sehr groß ist und die Mittelwerte der Erträge pro MW (dicke Markierung innerhalb der Abschnitte) allerdings doch im unteren zweistelligen Bereich liegen.

3 Lastprofilprognosen

Wie Abbildung 1 zeigt, sind die Erträge stark von der Zeitscheibe, in der die Regelenergie angeboten wird, abhängig und ebenso von der Höhe der angebotenen Leistung. Um somit die möglichen Erträge bestimmen zu können, muss ein Lastprofil für die Anlage hinterlegt werden. Da eine genaue Vorhersage über den Energieverbrauch der Anlage für ein komplettes Jahr nicht möglich ist, muss ein – nach Möglichkeit belastbares – Lastprofil prognostiziert und generiert werden. Lastprofile sind eine zeitliche Darstellung der genutzten Leistung über einen bestimmten Zeitraum, wie z.B. Woche oder Jahr. Solch ein Verlauf kann z.B. für eine einzelne Maschine oder für ein ganzes Unternehmen erstellt werden. [16]

Grundsätzlich muss davon ausgegangen werden, dass Lastprofile – sowohl auf Unternehmensebene als auch auf Anlagenebene – nicht täglich den gleichen Verlauf haben. Prinzipiell lassen sich Prognoseverfahren in klassische Verfahren (Kalman-Filter, Regressionsanalyse, Zeitreihen-analyse), künstliche Intelligenz (Fuzzy-Systems, neuronale Netze, etc.) und referenzbasiert Verfahren unterteilen. [17]

Die Ansätze, die das Lastprofil einer Anlage auf Grundlage von Produkten [18], Maschinenzuständen [19], oder Vergangenheitswerten und Algorithmen [20] prognostizieren, können allerdings nur bedingt angewandt werden, da bei allen Methoden die Verbindung zum Regelenergiemarkt fehlt und somit kein Lastprofil zur Ertragsabschätzung erzeugt. Hier werden Anforderungen an die Flexibilitätsleistung gestellt, die mit den vorhandenen Verfahren nicht abgebildet werden.

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, muss die Flexibilitätsleistung bei SRL über vier Stunden angeboten werden, d.h. die angebotene Leistung muss auch innerhalb dieses Zeitblocks zu jeder Zeit abgerufen werden können und die Start- und Endzeitpunkte des Zeitblocks sind ebenfalls festvorgegeben. Andererseits können die Erträge und somit die Amortisationszeit nicht bestimmt und abgeschätzt werden.

4 Methode zur Lastprofilgenerierung zur Energieflexibilitätsvermarktung

- 4.1 Die vom IPA und EEP entwickelte Methode zur Erzeugung und Prognose eines Lastprofils – mit der Energieflexibilität von hybriden Anlagen am Regelenergiemarkt vermarktet werden kann – untergliedert sich in vier Unterschritte (siehe Abbildung 2). Die entwickelte Methode baut auf den Ansätzen der referenzbasierten und klassischen Prognoseverfahren auf.

Aufnahme des Ist-Lastgangs

Im ersten Schritt muss das aktuelle Lastprofil der Produktionsanlage aufgenommen werden. Hier wird je nach Anlage und Produktvarianz das Lastprofil zwischen einem Tag und mehreren Wochen mit einem Messintervall von 5-Minuten (kleinste relevante Einheit für SRL) aufgenommen.

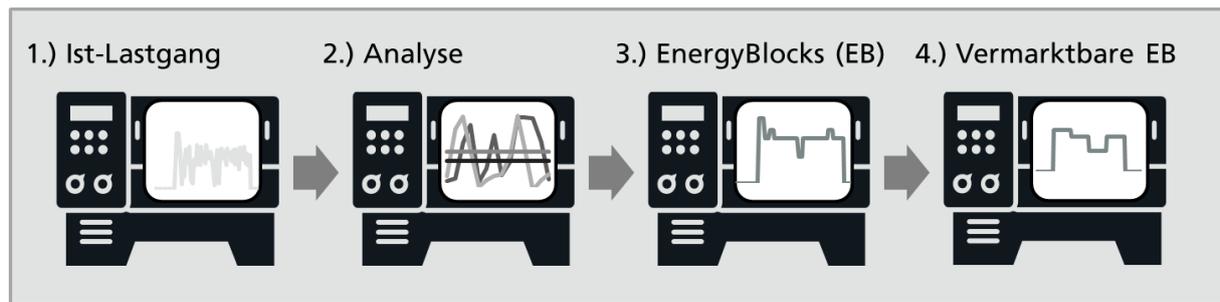


Abbildung 2 Ablauf der Methode zur Lastprofilgenerierung in Abhängigkeit vom Regelle Energiemarkt

Die Aufzeichnungslänge hängt von der Komplexität der Anlage ab. Werden Produkte mit signifikant unterschiedlicher Energieintensität produziert, sollte die Messaufzeichnung entsprechend länger sein.

Analyse des Ist-Lastgangs

4.2 Werden innerhalb der Aufzeichnungsdauer bestimmte Betriebszustände mit stark abweichender Leistungscharakteristik, wie bspw. zeitlich längerem Werkzeugwechsel, Produkte mit stark abweichender Energieintensität, oder eine mögliche Abhängigkeit von Jahreszeiten, nicht erfasst, müssen diese dennoch für die Lastprofilprognose berücksichtigt werden. Die linke Spalte der Tabelle 2 zeigt, mögliche Betriebszustände einer Maschine – entnommen aus ISO 14955-1:2014 und von Eberspächer (2016) erweitert [19, 21].

Einige der Betriebszustände können zusammengefasst werden (rechte Spalte). Bei den zusammengefassten Betriebszuständen wird kein signifikant unterschiedlicher Energieverbrauch erwartet, sodass dies keinen Einfluss auf die Höhe der zu erwartenden Erträge hat. Neben der Analyse der Betriebszustände müssen zusätzlich die Lastveränderungen über das komplette Jahr hinweg berücksichtigt werden.

Tabelle 2 Betrachtete Betriebszustände

Betriebszustände nach [19, 21]	Betrachtete Zustände	Diese sind nach Schellong (2016) Nutzungsgrad, Produktionsplan, Energieintensität der Produkte, Außentemperatur, Schichtbetrieb, Wochenendarbeit, Wochentage, Sondertage, Windgeschwindigkeit, Helligkeit, Bewölkung, Jahreszeiten und Feiertage, bzw. Ferien. [22] Abbildung 3 zeigt links einen Tageslastgang eines Tiegelofens einer Druckgussanlage. Grundsätzlich eignen sich Tiegelöfen bereits jetzt um am SRL-Markt teilzunehmen [23]. Durch eine zusätzliche Beheizung mit einem anderen Energieträger lässt sich die Flexibilität der Anlagen allerdings deutlich erhöhen [24].
1. Maschine aus	1. Aus	
2. Notaus		
3. Aufwärmen	2. Aufwärmen	
4. Stand-by	3. Geplanter Stillstand	
5. Erweiterer Stand-by		
6. Betriebsbereit		
7. Bearbeitung	4. Bearbeitung	

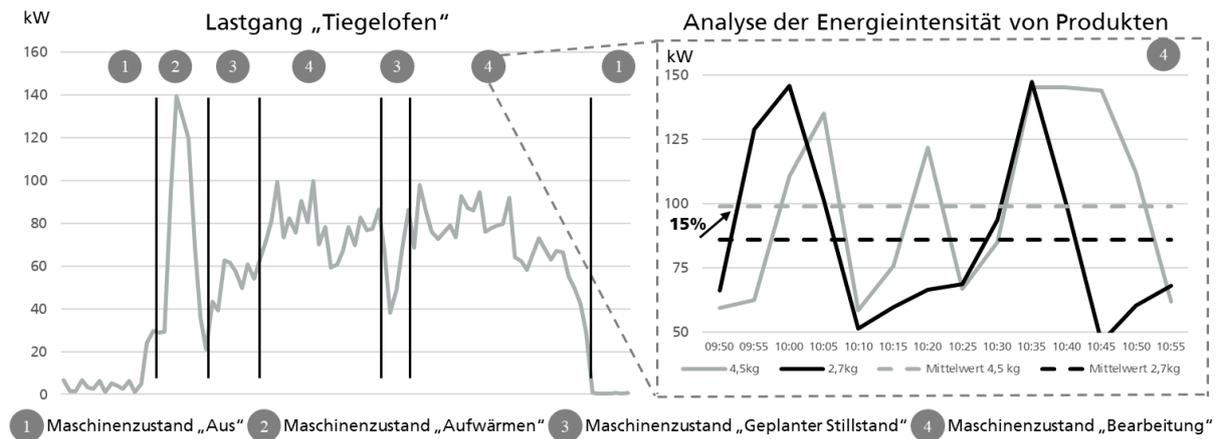


Abbildung 3 Betrachtete Zustände nach Tabelle 1 (links); Bestimmung der Energieintensität (rechts)

Aus der Abbildung können die Betriebszustände „1 - Aus“, „2 - Aufwärmen“, „3 - geplanter Stillstand“, „4 - Bearbeitung“ abgelesen werden. Die rechte Seite der Abbildung zeigt das Ergebnis der Analyse von unterschiedlichen Energieintensitäten von Produkten. Auf dieser Anlage werden zwei Produkte mit deutlich unterschiedlichen Schussgewichten von 4,5kg, bzw. 2,7kg bearbeitet. Der Mittelwert des Energieverbrauchs erhöht sich dabei um ca. 15%, da hier im gleichen Zeitraum mehr Material eingeschmolzen und somit mehr Energie zugeführt werden muss. Im nächsten Schritt muss dies berücksichtigt werden, indem zwei EnergyBlocks (siehe Kapitel 4.3) gebildet werden.

4.3 Erstellung von EnergyBlocks

Wenn alle Betriebszustände mit unterschiedlicher Energieintensität, Produkt- und Jahresabhängigkeiten ermittelt wurden, können für diese Zustände EnergyBlocks nach dem Prinzip von Weinert (2010) erzeugt werden [18].

Diese Blöcke dienen als Grundlage zur Generierung des späteren Lastprofils. Für jeden Betriebszustand wird entsprechend der Leistungscharakteristik ein EnergyBlock erzeugt. Dabei wird der Energieverbrauch einer Anlage für einen bestimmten Zeitabschnitt (hier die einzelnen Betriebszustände) beschrieben. Für die einzelnen Betriebszustände werden die charakteristischen EnergyBlocks zugewiesen und kann entsprechend der Produktionsplanung des einzelnen Produktes für die Anlage über das gesamte Jahr zusammengestellt werden.

Erzeugung eines vermarktbaren Lastprofils für SRL

Durch die Restriktionen des Regelenergiemarkts muss das Lastprofil entsprechend den Vorgaben angepasst und erzeugt werden, um somit die möglichen Erträge aus der Vorhaltung der Flexibilität generieren zu können. Die Anforderungen können je nach Flexibilitätsmarkt stark abweichen. Die relevanten Anforderungen für das Anbieten von Sekundärregelleistung sind folgende [25]:

- Bildung von Zeitblöcken (4-Stunden)
- Startzeitpunkte der Zeitblöcke
- Vorhaltung und Gewährleistung der Flexibilität
- Berücksichtigung der Mindestleistung

Die Einhaltung von Mindest-Abrufdauern, Regenerationszeiten, Anfahrkurven, etc. sind vorab für die entsprechende Anlage zu klären. Für den SRL-Markt wird das Lastprofil in sechs Zeitblöcke unterteilt, beginnend ab 0 Uhr. Von besonderer Relevanz im Hinblick auf die Erstellung von vermarktbar Lastprofilen ist die Vorhaltung und Gewährleistung der angebotenen Flexibilität. Um dies einzuhalten, wird die geringste Leistung P_{Flex} , die innerhalb dieses vierstündigen Zeitblocks n einer Viertelstunde eintritt, als anzubietende Flexibilitätsleistung festgelegt (vgl. Formel 1). Dies wird für alle anfallenden Zeitblöcke gleichermaßen angewandt.

$$P_{Flex,n} = \min(P(n)); \quad (\text{Formel 1})$$

$$\text{s.t.} \quad n = \{1,2,3, \dots, 6\}$$

Im letzten Schritt muss die Mindestangebotsleistung von 5MW bzw. 1MW überprüft werden. Falls innerhalb dieses Zeitfensters die Schwelle von 5MW bzw. 1MW unterschritten wird, kann kein Angebot abgegeben werden. Eine Möglichkeit trotzdem am Markt teilzunehmen wäre über einen Pooling-Aggregator, der die Leistung kleinerer Anlagen bündelt und dann vermarkten kann (siehe Kapitel 2.2).

5 Ergebnis am Beispiel eines Tiegelofens

Die Abbildung 4 zeigt am Beispiel eines Tiegelofens das Resultat einer Lastprofilprognose mit Berücksichtigung der Restriktionen vom Sekundärregelenergiemarkt. Dabei ist links das reale Lastprofil von einem Tag als Mittelwert von fünf Produktionstagen im 15-Minuten-Intervall (in grau) und rechts die vermarktbar Lastprofilprognose für eine Woche (in schwarz) abgebildet.

Deutlich zu erkennen ist der Aufheizvorgang des Tiegelofens (links am realen Lastprofil) mit einem maximalen Peak von 140kW. Bei der Lastprognose zur Vermarktung von Flexibilität ist der Wert allerdings nicht zu sehen. Gründe hierfür sind auf die Restriktion des Regelenergiemarkts zurückzuführen. Zu jeder Zeit muss die angebotene Leistung auch abgerufen werden können. Da der Aufheizvorgang in einem 4-Stunden-Block liegt, in dem ebenfalls immer ein Puffer eingeplant ist, können lediglich 20°kW (Warmhalteleistung) innerhalb dieser Zeitscheibe angeboten werden.

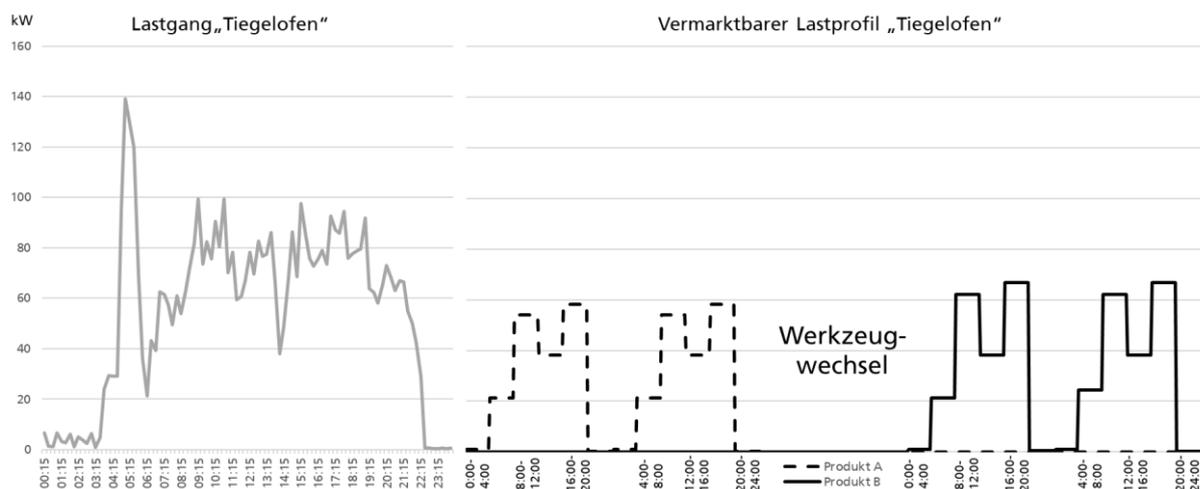


Abbildung 4 Ergebnis der Lastprofilprognose zur Vermarktung von Regelenergie

In Abbildung 4 sind ebenfalls die Mittagspausen deutlich zu erkennen, da die Leistung sich auf ca. 40°kW reduziert. Auch sind die unterschiedlichen Energieintensitäten der zwei Produkte – aufgrund des höheren Schussgewichts – zu erkennen. Zu den Zeiten, an dem Produkt B produziert wird (siehe Abbildung 3), kann eine höhere Energieflexibilität angeboten und somit höhere Erträge erwirtschaftet werden.

Neben den Einflüssen aus den Betriebszuständen, muss ebenfalls der Werkzeugwechsel berücksichtigt werden. Der Werkzeugwechsel dauert in der Regel einen ganzen Tag an. Innerhalb dieser Zeit kann keine Flexibilität angeboten werden. Dies wird als Sondertag definiert, genauso wie Feiertage, Wochenenden und Betriebsurlaube.

Weitere Einflüsse aus den weiteren Faktoren, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, sind nicht zu berücksichtigen. Auf Grundlage dessen kann somit ein komplettes Jahr zusammengestellt und mit den möglichen durchschnittlichen Erträgen abgeglichen werden.

Die Überprüfung der Mindestleistung würde in diesem Fall ergeben, dass die Produktionsanlage eigenständig kein Angebot abgeben dürfte. In diesem Fall könnte das Lastprofil allerdings genutzt werden, um innerhalb eines Pools bei einem Aggregator von geringeren Lasten teilzunehmen. Dieser könnte ebenfalls dieses Lastprofil in sein Portfolio integrieren und entsprechend die Erlöse daraus vorab prognostizieren.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Fraunhofer IPA hat gemeinsam mit EEP eine Methode vorgestellt, die es Unternehmen ermöglicht ein vermarktbare Lastprofil zu generieren. In Kombination mit klassischen und referenz-basierten Daten und den Anforderungen aus dem Regelenergiemarkt können Unternehmer mögliche Erträge aus dem Regelenergiemarkt bzw. durch einen Aggregator abschätzen und somit die Vorteilhaftigkeit einer Umstellung auf Anlagen mit einem dynamischen Energieträgerwechsel ökonomisch bewerten.

Diese Methode kann mit gewissen Adaptionen auch für andere Flexibilitätsmärkte angewandt werden. Dies soll in zukünftigen Forschungsarbeiten weiter betrachtet werden. Des Weiteren soll untersucht werden, wie die Erträge durch eine optimale Anpassung an die Flexibilitätsmärkte erhöht werden können. Aufgrund der niedrigeren Gaspreise würde die Anlage vorrangig mit dem Energieträger Erdgas betrieben werden und somit negative Regelenergie anbieten. Eine Untersuchung, ob die Einnahmen von positiver Regelenergievermarktung die höheren Energiekosten kompensieren können, steht noch aus.

Danksagung

Diese Arbeit wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Forschungsprogramms "Kopernikus-Projekte für die Energiewende" im Rahmen der "Synchronisierten und energieadaptiven Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung" (Förderkennzeichen 03SFK3Q2-2) gefördert und vom Projektträger Jülich (PTJ) betreut.

Die Autoren danken dem BMBF, dem PTJ und den Partnern für die Unterstützung und die Zusammenarbeit. Zudem möchten wir uns bei Herrn Weckmann, Herrn Reisinger und Herrn Zimmermann für den fachlichen Austausch bei der Erstellung der Veröffentlichung bedanken.

7 References

- [1] ZSW, *Zahl der Woche: Erneuerbare decken fast 43% des Stromverbrauchs 2019 in Deutschland*. Stuttgart/Berlin, 2019.
- [2] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahn. Bundeskartellamt, *Monitoringbericht 2019: Monitoringbericht gemäß § 63 Abs. 3 i. V. m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i. V. m. § 53 Abs. 3 GWB*. [Online] Available: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/DatenaustauschundMonitoring/Monitoring/monitoring-node.html.
- [3] E. Köse, A. Sauer, and C. Pelzel, "Energieflexibel durch bivalente Produktionsanlagen: Mit bivalent ausgelegten Produktionsprozessen Energiekosten senken und das Stromnetz stabilisieren," (de), vol. 107/2017, no. 107, pp. 366–372, 2017.
- [4] E. Köse and A. Sauer, "Impacts of Energy Flexibility on Energy Efficiency of Hybrid and Bivalent Facilities," in *25th International Conference on Production Research Manufacturing Innovation.*, Chicago, 2019.
- [5] M. Graßl and G. Reinhart, "Evaluating Measures for Adapting the Energy Demand of a Production System to Volatile Energy Prices," *Procedia CIRP*, vol. 15, pp. 129–134, 2014.
- [6] E. Köse, Sauer, Alexander, Thomas, Bernd, T. Müller, S. Kölle, and P. Schwanzer, "Stromoptimierte KWK in der Galvanikbranche: Der steigenden Energiefluktuation durch residuallast-angepasste KWK entgegenwirken," *Werkstatttechnik online*, vol. 108-2018, no. 108, pp. 561–566, [https://www.werkstattstechnik.de/wt/currentarticle.php?data\[article_id\]=90069](https://www.werkstattstechnik.de/wt/currentarticle.php?data[article_id]=90069), 2018.
- [7] EPEX SPOT, *Negative Preise: Wie sie entstehen, was sie bedeuten*. [Online] Available: https://www.epexspot.com/de/Unternehmen/grundlagen_des_stromhandels/negative_preise. Accessed on: Sep. 21 2018.
- [8] Tennet, *Market Review 2017: Electricity market insights*, 2018.
- [9] P. Graichen, A. Sakhel, and C. Podewils, "The Energy Transition in the Power Sector:: State of Affairs in 2017," A review of the major developments of 2017, including an outlook for 2018, Berlin, Jan. 2017. [Online] Available: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Jahresauswertung_2017/Energiewende_2017_-_State_of_Affairs.pdf.
- [10] Universität Stuttgart - EEP, Ed., *Energieflexibilität in der Industrie: Eine Metastudie*. Stuttgart, 2018.
- [11] *Energieflexible Fabrik*, VDI 5207 Blatt 1, 2019.
- [12] Regelleistung, *Markt für Regelleistung in Deutschland*. [Online] Available: <https://www.regelleistung.net/ext/static/market-information>. Accessed on: Mar. 05 2019.
- [13] Next-Kraftwerke, *Was ist Regelenergie?: Vorhaltung der Regelleistung durch die Übertragungsnetzbetreiber*. [Online] Available: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/regelenergie>. Accessed on: Mar. 05 2019.
- [14] *P1 – Policy 1: Load-Frequency Control and Performance [C]*, 2009.

- [15] S. Weckmann, T. Kuhlmann, and A. Sauer, "Decentral Energy Control in a Flexible Production to Balance Energy Supply and Demand," *Procedia CIRP*, vol. 61, pp. 428–433, 2017.
- [16] U. Peters, "Höchstlastregelungen bei Elektrizitätsfremdversorgung industrieller Betriebe," Düsseldorf, Fortschrittsbericht 16, 1987.
- [17] C. Hirsch, "Fahrplanbasiertes Energiemanagement in Smart Grids," 2017.
- [18] N. Weinert and G. Seliger, Eds., *Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme*. Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2010. Stuttgart: Fraunhofer-Verl., 2010.
- [19] P. Eberspächer, "Zustandsmodellbasierte, steuerungsnahe Energieverbrauchsoptimierung von Werkzeugmaschinen," Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2016.
- [20] M.-A. Richard, H. Fortin, A. Poulin, and Leduc, Marie-Andrée, Fournier, Michaël, "Daily load profiles clustering a powerful tool for demand side management in medium-sized industries," in *ACEEE summer study on Energy Efficiency in Industry*, Denver, 2017, pp. 160–171.
- [21] *Machine tools — Environmental evaluation of machine tools*, ISO 14955-1:2014, 2014.
- [22] W. Schellong, *Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.
- [23] E. Köse and A. Sauer, "Reduction of energy costs and grid instability with energy flexible furnaces," *Procedia CIRP*, vol. 72, pp. 832–838, 2018.
- [24] E. Köse, A. Sauer, C. Bark, and T. Tauporn, "Nichteisenmetalldruckguss: C.8," in *Energieflexibilität in der deutschen Industrie: Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt - Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie)*, A. Sauer, E. Abele, and H. U. Buhl, Eds., Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2019, pp. 559–578.
- [25] Consentec GmbH, "Beschreibung von Regelleistungskonzepten," Aachen, Feb. 2014.