

# Flexibilisierungspotenziale in der Industrie



Fraunhofer IPA /  
Universität Stuttgart  
Dennis Bauer  
[dennis.bauer@ipa.fraunhofer.de](mailto:dennis.bauer@ipa.fraunhofer.de)

Prof. Dr. Alexander Sauer  
[alexander.sauer@ipa.fraunhofer.de](mailto:alexander.sauer@ipa.fraunhofer.de)

DLR  
Dr. Ralph-Uwe Dietrich  
[ralph-uwe.dietrich@dlr.de](mailto:ralph-uwe.dietrich@dlr.de)

GFZ  
Dr. Cornelia Schmidt-Hattenberger  
[cornelia.schmidt-hattenberger@gfz-potsdam.de](mailto:cornelia.schmidt-hattenberger@gfz-potsdam.de)

FZ Jülich  
Fritz Roeben  
[f.roeben@fz-juelich.de](mailto:f.roeben@fz-juelich.de)

Dr. Manuel Dahmen  
[m.dahmen@fz-juelich.de](mailto:m.dahmen@fz-juelich.de)

KIT  
Dr. Bernhard Schäfer  
[bernhard.schaefer@kit.edu](mailto:bernhard.schaefer@kit.edu)

Wuppertal Institut  
Clemens Schneider  
[clemens.schneider@wupperinst.org](mailto:clemens.schneider@wupperinst.org)

ZAE  
Richard Gurtner  
[richard.gurtner@zoe-bayern.de](mailto:richard.gurtner@zoe-bayern.de)

## 1. Einleitung

Initiiert durch das Pariser Abkommen zum Klimaschutz der Vereinten Nationen mit der Begrenzung der globalen Erderwärmung auf maximal 2°C und das Energiekonzept der deutschen Bundesregierung, soll der Anteil erneuerbarer Energien am deutschen Bruttostromverbrauch bis 2050 auf 80 Prozent steigen [1, 2]. Dies bedeutet einen massiven Ausbau der Solar-, Wind- und Biomasse-Energie [3–5].

Mit einem steigenden Anteil an erneuerbaren Energien steigt jedoch auch, bedingt durch deren Wetterabhängigkeit, die Volatilität der Stromversorgung [6] (► *Abbildung 1*). Der Abgleich zwischen Stromerzeugung und Stromnachfrage stellt deshalb eine zunehmende Herausforderung im Stromnetz dar. Um dem gestiegenen Anteil an Wind- und Solarenergie gerecht zu werden, bemühen sich die Netzbetreiber daher verstärkt um die Gewährleistung der Netzstabilität durch temporäre Aktivierung von Reserven oder Abschaltung von Kraftwerken. Die Kosten für solche Maßnahmen haben sich in den letzten fünf Jahren mehr als verdoppelt [7].

Neben Maßnahmen auf der Erzeugungsseite, deren Verfügbarkeit durch die Abschaltung konventioneller Kraftwerke in den nächsten Jahren sinken wird, rücken zunehmend drei Lösungsmöglichkeiten in den Fokus:

1. Speicherung von Energie
2. Ausbau großregionaler Ausgleichsräume
3. Nutzung von Flexibilität auf der Nachfrageseite, also Demand-Side-Management (DSM)

DSM zielt darauf ab, den Abgleich zwischen Stromnachfrage und Stromerzeugung durch Flexibilitätsmaßnahmen auf der Nachfrageseite anzupassen. Ausgelöst wird diese Anpassung durch ein Trigger-signal, beispielsweise die Notwendigkeit zur Netzstabilisierung oder den Preis [8]. Im Vergleich zu den anderen Maßnahmen zeichnet sich das DSM durch eine hohe gesellschaftliche Akzeptanz aus. Mit einem Anteil von 44 Prozent am deutschen Strombedarf kommt hierfür insbesondere der Industrie eine signifikante Bedeutung zu [9].

## 2. DSM-Potenzial der deutschen Industrie

Diverse Studien haben bereits das DSM-Potenzial der deutschen Industrie ermittelt, dabei jedoch maßgeblich energieintensive Branchen betrachtet. Des Weiteren lag der Fokus dieser Studien oftmals auf Lastverzicht für Zeiträume kleiner fünf Stunden [10].

Im Kopernikus-Projekt SynErgie wurde deshalb das DSM-Potenzial der deutschen Industrie anhand von 17 charakteristischen Prozessen in acht Wirtschaftszweigen ermittelt [11]:

1. Herstellung von chemischen Erzeugnissen
2. Metallerzeugung und -bearbeitung
3. Herstellung von Glaswaren, Keramik
4. Verarbeitung von Steinen und Erden
5. Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen
6. Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln
7. Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus
8. Herstellung von Metallerzeugnissen, Maschinenbau

Für einen Zeitraum von bis zu 15 Minuten liegt dieses Flexibilitätspotenzial für die Reduzierung der elektrischen Last bei mindestens 2,45 Gigawatt und für die Erhöhung der elektrischen Last bei mindestens 1,09 Gigawatt.

(Für kürzere Zeiträume von 1,2 Minuten ergibt sich für die elektrische Lasterhöhung ein Flexibilitätspotenzial von 2,71 Gigawatt und damit mehr als eine Verdopplung, bei 5 Minuten für den elektrischen Lastverzicht von 3,98 Gigawatt. Für längere Zeiträume über mehrere Stunden und Tage existieren derzeit noch wenige Technologien, um diese realisieren zu können.)

Das Flexibilisierungspotenzial für einen Zeitraum bis zu 15 Minuten ist vergleichbar mit der installierten Leistung des größten deutschen Pumpspeicherkraftwerks bzw. entspricht etwa dem 1,2-fachen der installierten Leistung des größten deutschen Gaskraftwerks. Die jährlich verschiebbare Energiemenge beträgt 3,37 Terawattstunden bei Lasterhöhung bzw. 7,52 Terawattstunden bei Lastverzicht. Das heißt: zwei Drittel der realisierten Erzeugung aus deutschen Pumpspeicherkraftwerken im Jahr 2018 könnten durch eine flexible Stromnachfrage der Industrie ersetzt werden.

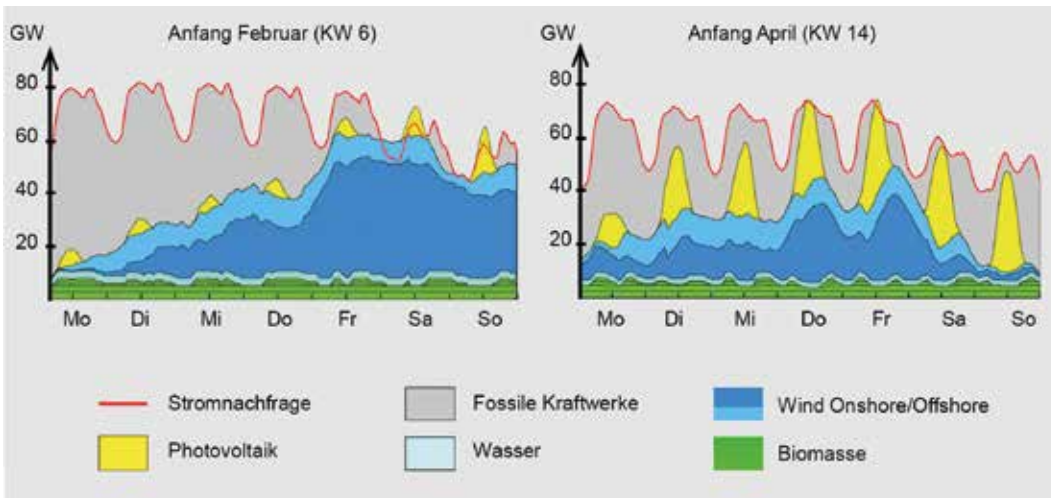


Abbildung 1  
**Volatilität der Stromerzeugung und Stromnachfrage im Jahr 2022**  
 (Agora Energiewende, [6])

Die deutsche Industrie könnte deshalb durch die Stromnachfrageflexibilisierung einen maßgeblichen Beitrag zum Gelingen der Energiewende leisten. Um diese Flexibilität lang- bis mittelfristig auch tatsächlich nutzen zu können, ist jedoch die Erforschung und Weiterentwicklung von Technologien, deren Automatisierung sowie der Abbau von Hemmnissen notwendig [11, 12].

### 3. Anwendungsbeispiele für DSM

Die Industrie bietet eine Vielfalt von Möglichkeiten zur Energieflexibilisierung, in den Produktionsprozessen und der Produktionsinfrastruktur [11, 13, 14]. Drei beispielhafte Anwendungen werden nachfolgend vorgestellt:

#### 3.1 Energieflexibilität in der Luftzerlegung

Aktuelle Luftzerlegungsanlagen sind meist auf einen stationären Betrieb ausgelegt. Häufige, schnell spürbare Lastwechsel im Rahmen der Lastflexibilisierung könnten die Anlagenkomponenten stark beanspruchen. Zusätzlich kann ein Verlassen des Auslegungspunktes mit einem signifikanten Effizienzverlust einhergehen.

Um die Ausrichtung des Betriebes an eine Stromerzeugung aus regenerativen Quellen auch wirtschaftlich attraktiv zu gestalten, kann die Produktion von Luftgasen an Preisschwankungen in den Energiemärkten angepasst werden. Auf Basis von Leistungsdaten der Anlagen wird über die Verwendung numerischer Verfahren der optimale Anlagenbetrieb für vorliegenden Kundenbedarf sowie Vorhersagen über den Strommarkt ermittelt.

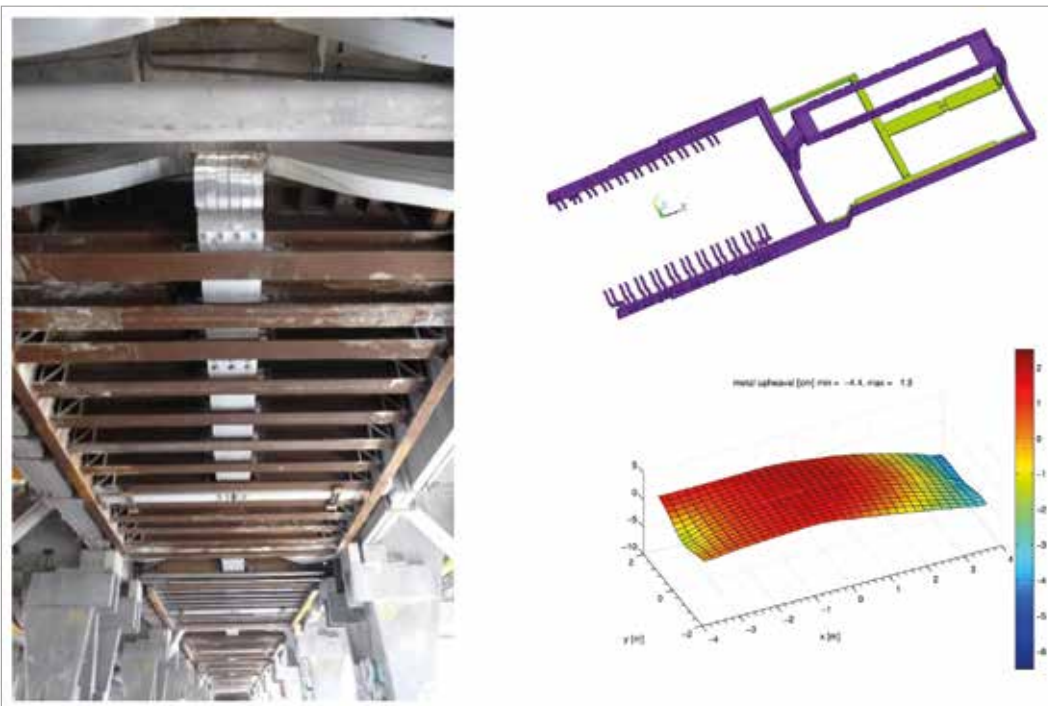


Abbildung 2  
**Flexibilisierte Aluminiumelektrolyse:**  
 Magnetfeldkompensation (re.) durch Installationen von Stromschienen (li.) [11]

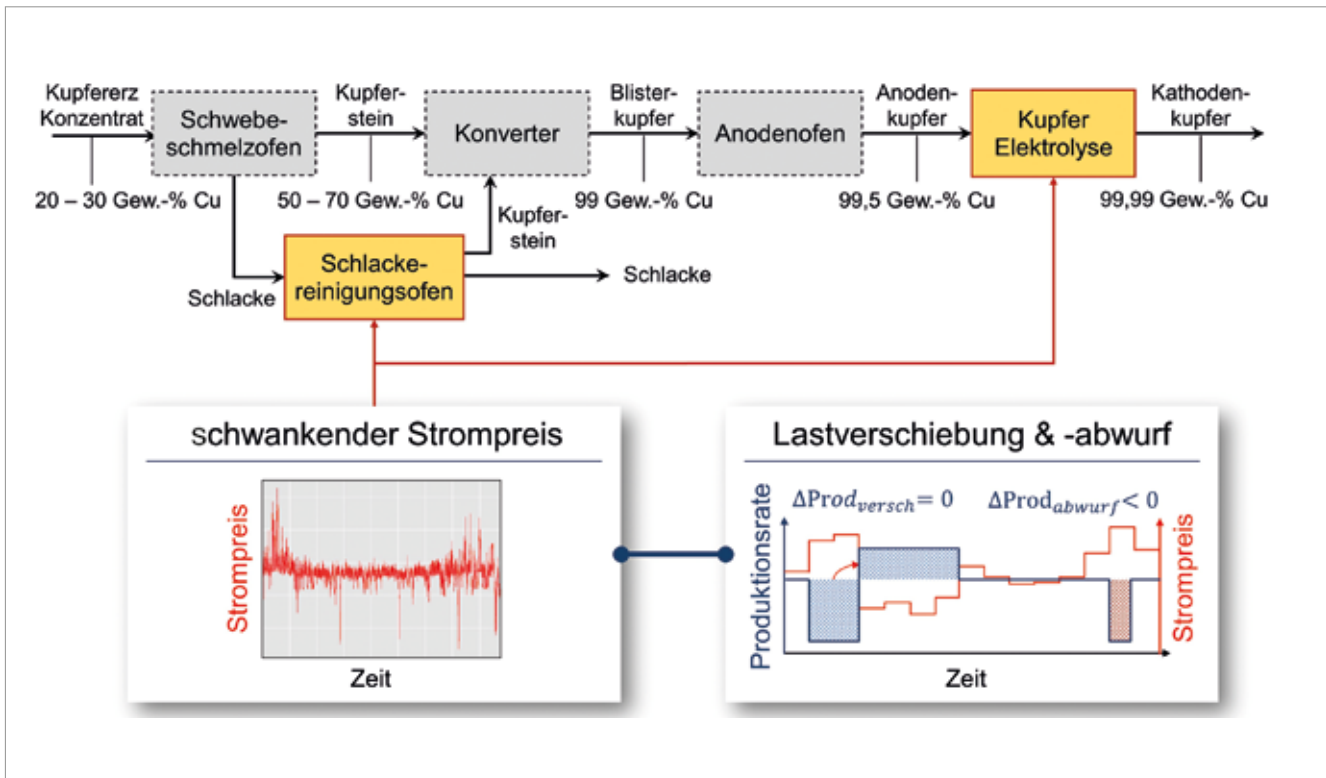


Abbildung 3  
**DSM-Maßnahmen in der Kupferproduktion bei schwankendem Strompreis**  
 (repräsentatives Flussdiagramm)  
 (adaptiert von [15])

Eine derart optimierte Produktionsplanung identifiziert bereits bei heutigen Preisschwankungen vielversprechende Potenziale zur Reduktion der Energiekosten. Zusätzlich erlauben mögliche Weiterentwicklungen (robustere Wärmetauscher, erweiterte Teillastbereiche, größere Produktspeicher, etc.) eine weitergehende Flexibilisierung.

Am Beispiel des Wärmetauschers bedeutet dies, dass im lastflexiblen Betrieb ungleichmäßige Temperaturverteilungen über das Bauteil mit zum Teil sehr hohen räumlichen und zeitlichen Gradienten entstehen können. Die hervorgerufenen Thermospannungen können die Lebensdauer der Wärmeübertrager verringern. Durch konstruktive Änderungen und intelligente Betriebsweisen kann dem erhöhten Verschleiß bei flexiblem Betrieb entgegengewirkt werden. Daher wurde zum einen eine detaillierte Modellbasis geschaffen, welche die simulative Untersuchung und Optimierung von Strategien für den lastflexiblen Betrieb ermöglicht (»FlexASU«). Zum anderen erlaubt ein Teststand entsprechende Weiterentwicklungen experimentell zu untersuchen. Künftige Wärmeübertrager-Generationen werden daher eine gesteigerte Robustheit gegenüber Ermüdungsschäden bei hohen Lastspielzahlen zeigen.

### 3.2 Energieflexibilität in der Aluminiumelektrolyse durch Magnetfeldkompensation

Aluminium wird global ausschließlich nach dem Hall-Héroult-Verfahren der Schmelzflusselektrolyse aus

Aluminiumoxid gewonnen. Zu den Idealbedingungen des traditionellen Elektrolysebetriebes zählt die rund um die Uhr konstante Stromabnahme. Bei einer volatilen Stromversorgung wäre der Elektrolysebetrieb daher nicht aufrecht zu erhalten.

Um das Flexibilisierungspotenzial der Aluminiumelektrolyse nutzen zu können, wurde am TRIMET-Standort Essen eine innovative Aufrüstung einer der bestehenden Elektrolysehallen unternommen, die in dieser Form weltweit einmalig ist. Eins der drei Aluminiumelektrolyse-Systeme wurde zur Ermöglichung eines flexiblen Betriebes (»FLEX-Elektrolyse«) mit einer sogenannten Magnetfeldkompensation ausgerüstet, um die störenden Effekte des prozessbedingt starken Gleichstrom-Magnetfeldes zu verringern (► *Abbildung 2*). Als Ergebnis dieser Magnetfeldkompensation werden die durch einen veränderlichen Elektrolysestrom verursachten magnetischen Störungen des Prozesses weitgehend eliminiert und so die Voraussetzungen für eine Flexibilisierung geschaffen.

Durch die Technologieentwicklung wurde die Möglichkeit geschaffen, die Nominalleistung der Linie von ca. 90 MW um bis zu ± 20% zu variieren, um je nach Versorgungssituation im Netz bis zu 18 MW Leistungsüberschuss aufzunehmen bzw. bei Versorgungsengpässen durch Drosselung der Produktion dem Netz zur Verfügung zu stellen. Dabei muss die Effizienz und Stabilität des elektrolytischen Produktionsprozesses weiterhin gewahrt bleiben. Das Energieverschiebepotenzial beläuft sich dabei auf ± 72 MWh.

Abbildung 4

**Mehr-Ebenenmodell der Energieflexibilität****3.3 Energieflexibilität in der Kupferproduktion**

Das Schmelzen und Raffinieren von Kupfer ist ein energieintensiver Prozess, der sowohl hohe Mengen an Erdgas als auch Strom verbraucht. Der hohe Strombedarf deutet auf ein hohes DSM-Potenzial hin. Es ist jedoch schwierig, das branchenweite DSM-Potenzial zu quantifizieren, da die meisten Kupferhütten und -raffinerien über individuelle Produktionsanlagen verfügen.

Um dennoch erste Einblicke in das DSM-Potenzial zu gewinnen, wurde ein repräsentativer Kupferproduktionsprozess im Rahmen des Helmholtz „Energy Systems Integration“-Projekts analysiert, ([15], ► *Abbildung 3*). Im Mittelpunkt der Analyse standen Lastverschiebung und Lastabwurf in zwei energieintensiven Prozessschritten: der elektrolytischen Raffination von Kupfer und dem elektrischen Schlackereinigungsöfen.

Zunächst wurde dabei eine Obergrenze für das techno-ökonomische Potenzial der Lastverschiebung quantifiziert. Anschließend wurden die Opportunitätskosten bestimmt, welche mit einem Lastabwurf verbunden sind. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Lastverschiebung ein hohes ökonomisches Potenzial aufweist, der Lastabwurf im aktuellen Marktumfeld hingegen keine profitable Strategie darstellt [15]. Die flexible Anpassung der Produktion an schwankende Strompreise reduziert in beiden Prozessschritten sowohl die jährlichen Stromkosten als auch die indirekten Treibhausgasemissionen [15].

**4. Hemmnisse**

Um die beschriebenen Anwendungsbeispiele für DSM lang- bis mittelfristig auch tatsächlich nutzen zu können, ist der Abbau von Hemmnissen notwendig [11, 13].

Aus einer Literaturrecherche sowie Gesprächen mit relevanten Akteuren sind zunächst einige grundlegende Vorbedingungen für die Bereitstellung von Flexibilität durch die Grundstoffindustrie abgeleitet worden. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die technische Anlage darf keinen Schaden nehmen.
- Die Kundenzufriedenheit muss gewährleistet bleiben.
- Die Produktqualität darf nicht leiden.
- Lieferfristen müssen eingehalten werden.
- Die Produktionsmenge wird durch die Nachfrage bestimmt. Entsprechend kommt in der Grundstoffindustrie meist als einzige Form der Laständerung eine Lastverschiebung in Betracht.
- Die (regelmäßige) Durchführung von Flexibilitätsmaßnahmen muss in (angepasste) innerbetriebliche Abläufe integriert werden können.
- Bestehende regulatorische Rahmenbedingungen müssen berücksichtigt werden.
- Es muss für das Unternehmen wirtschaftlich sein.
- Zuvorderst muss natürlich die technische Machbarkeit der Flexibilisierung gegeben sein; manche Prozesse sind nicht teillastfähig oder unterliegen anderen technischen, etwa sicherheitsbedingten, Anforderungen.

Aus diesen Vorbedingungen ergab sich über mehrere iterative Schritte eine Differenzierung möglicher Hemmnisse auf drei verschiedenen zeitlich-organisatorischen Ebenen, eingerahmt von regulatorischen Rahmenbedingungen, die zu beachten sind (► *Abbildung 4*).

Regulatorischer Änderungsbedarf besteht deshalb darin, zukünftig widersprüchliche Anreize zu vermeiden sowie sinnvolle Flexibilitätsbereitstellung nicht durch Begrenzungstatbestände zu verhindern. Des Weiteren müssen die Möglichkeiten zur Flexibilitätsbereitstellung unabhängig von Energieintensivität und Größe der Unternehmen erweitert werden. Außerdem sind Anreize zu setzen, den Stromverbrauch zu passenden Zeitpunkten zu reduzieren und zu anderen Zeitpunkten zu erhöhen [16].

Nur so werden Anreize für die Industrie geschaffen, Energieflexibilität bereitzustellen und damit einen maßgeblichen Beitrag zur Energiewende zu leisten.

## 5. Literatur

- [1] UNFCCC. The Paris Agreement, 2018 [Zugriff am: 11. September 2019]. Verfügbar unter: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- [2] BMWI. Energiekonzept. für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, 2010 [Zugriff am: 11. September 2019]. Verfügbar unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
- [3] Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 13. Mai 2019 (BGBl. I S. 706) geändert worden ist. EEG, 2019
- [4] BUNDESNETZAGENTUR. Windenergieanlagen auf See, 2018 [Zugriff am: 11. September 2019]. Verfügbar unter: [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/Ausschreibungen/Offshore/offshore-node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Offshore/offshore-node.html)
- [5] BMWI. Entwicklung der Stromerzeugung und der installierten Leistung von Wasserkraftanlagen, 2019 [Zugriff am: 11. September 2019]. Verfügbar unter: [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Textbausteine/Banner/banner\\_wasserkraft.html](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Textbausteine/Banner/banner_wasserkraft.html)
- [6] BAAKE, R. 12 Thesen zur Energiewende. Vortrag auf der 3. Thüringer Erneuerbare-Energien-Konferenz am 25.02.2013 in Weimar, 2013 [Zugriff am: 11. September 2019]. Verfügbar unter: [https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2012/12-Thesen/Agora\\_12\\_Thesen\\_Praesentation\\_Vollstaendige\\_Praesentation\\_der\\_Zusammenfassung\\_RB\\_25022013.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2012/12-Thesen/Agora_12_Thesen_Praesentation_Vollstaendige_Praesentation_der_Zusammenfassung_RB_25022013.pdf)
- [7] BUNDESNETZAGENTUR. Quartalsbericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen: Gesamtjahr und Viertes Quartal 2018, 2019 [Zugriff am: 11. September 2019]. Verfügbar unter: [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2019/Quartalsbericht\\_Q4\\_2018.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2019/Quartalsbericht_Q4_2018.pdf?__blob=publicationFile&v=6)
- [8] PALENSKY, P. und D. Dietrich. Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(3), 381-388. Verfügbar unter: doi:10.1109/TII.2011.2158841
- [9] UMWELTBUNDESAMT. Stromverbrauch, 2019 [Zugriff am: 11. September 2019]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromverbrauch>
- [10] EISENHAEUER, S., REICHART, M., SAUER, A., WECKMANN, S. und F. Zimmermann. Energieflexibilität in der Industrie. Eine Metastudie, 2018 [Zugriff am: 11. September 2019]. Verfügbar unter: [https://www.kopernikus-projekte.de/lw\\_resource/datapool/systemfiles/elements/files/84E8EBDE385D6DDEE0539A695E867D37/current/document/Metastudie\\_Energieflexibilitaet-in-der-Industrie.pdf](https://www.kopernikus-projekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/84E8EBDE385D6DDEE0539A695E867D37/current/document/Metastudie_Energieflexibilitaet-in-der-Industrie.pdf)
- [11] SAUER, A., ABELE, E. und H. Ulrich Buhl, Hg. Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie). Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2019. ISBN 978-3-8396-1479-2
- [12] ROESCH, M., BAUER, D., HAUPT, L., KELLER, R., BAUERNHANSL, T., FRIDGEN, G., REINHART, G. und A. Sauer. Harnessing the Full Potential of Industrial Demand-Side Flexibility: An End-to-End Approach Connecting Machines with Markets through Service-Oriented IT Platforms. Applied Sciences, 2019, 9(18), 3796. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3390/app9183796>
- [13] AUSFELDER, F., SEITZ, A. und S. von Roon, Hg. Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie. Methodik, Potenziale, Hemmnisse. Frankfurt am Main: DECHEMA e.V, 2018. ISBN 978-3-89746-206-9
- [14] AUSFELDER, F., VON ROON, S. und A. Seitz. Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie II. Methodik, Potenziale, Hemmnisse. 2. Auflage. Frankfurt am Main: DECHEMA e.V, 2019. ISBN 978-3-89746-219-9
- [15] RÖBEN, F.T.C., BAU, U., DAHMEN, M., REUTER, M.A. und A. Bardow. Demand Side Management Potential of Primary Copper Production. 32nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Breslau, Polen, 23-28 Juni 2019, 2019
- [16] SYNERGIE. Positionspapier zu regulatorischen Änderungen, 2019. [https://www.kopernikus-projekte.de/lw\\_resource/datapool/systemfiles/elements/files/8A7B1981D3AD5C60E0539A695E86C978/live/document/20190123\\_-\\_SynErgie\\_Positionspapier\\_Regulatorische\\_Rahmenbedingungen.pdf](https://www.kopernikus-projekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/8A7B1981D3AD5C60E0539A695E86C978/live/document/20190123_-_SynErgie_Positionspapier_Regulatorische_Rahmenbedingungen.pdf) [Zugriff am: 11. September 2019] ZAE