

Energieflexibel in die Zukunft

Wie Fabriken zum Gelingen der
Energiewende beitragen können

VDI-Handlungsempfehlung
Oktober 2021

Management Summary

Eine energieflexible Stromnachfrage kann einen erheblichen Beitrag bei der Neuausrichtung unseres Stromsystems hin zu einer erneuerbaren Energieerzeugung leisten. Die Nachfrage industrieller Verbraucher stellt mit einem Anteil von 44 % am Gesamtstromverbrauch [1] den größten Hebel dar, um die Versorgungssicherheit vor dem Hintergrund einer verstärkt witterungsabhängigen Erzeugung weiterhin zu gewährleisten und zugleich einen wichtigen Beitrag zur Wirtschaftlichkeit zu leisten. Dabei ergibt sich durch die Bereitstellung von Energieflexibilität gerade für Industrieunternehmen die Chance, wirtschaftliche Vorteile gegenüber einer nicht flexiblen Energienachfrage zu erzielen und einen Beitrag zur Nachhaltigkeit der Stromversorgung zu leisten.

Um die beschriebenen Chancen nutzbar zu machen, sehen sich industrielle Verbraucher zunächst mit erheblichen Herausforderungen konfrontiert. Um Energieflexibilität bereitstellen und in das Energiesystem integrieren zu können, müssen eine Reihe technischer und marktlicher Voraussetzungen erfüllt und geschaffen werden. Diese umfassen die Automatisierung der Prozesse der Flexibilitätsvermarktung begleitet durch ein umfassendes Zusammenspiel von Informations- und Kommunikationstechnik innerhalb von Unternehmen und über Unternehmensgrenzen hinweg.

Um die Anforderungen zur Bereitstellung von Energieflexibilität unabhängig von einer spezifischen Anwendungsdomäne sowie eingesetzten Technologien zu erfüllen, können sich Unternehmen bereits an vorliegenden Methodiken bedienen. In dieser VDI-Publikation wird ein systematischer Prozess mit sechs sequenziellen Prozessschritten vorgestellt, beginnend mit der initialen Analyse des Flexibilitätspotenzials bis hin zur kontinuierlichen Flexibilitätsoptimierung im laufenden Betrieb. Dieser Prozess dient der Unterstützung der sukzessiven energetischen

Flexibilisierung von Industrieprozessen unter technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Gesichtspunkten. Die energetische Flexibilisierung ist dabei als eigenständiges und interdisziplinäres Projekt innerhalb eines Industrieunternehmens einzuordnen.

Im Hinblick auf die wirtschaftliche Vermarktung von Flexibilität eröffnen sich für Industrieunternehmen verschiedene Perspektiven, um Kosten zu senken und/oder Vermarktungserlöse durch Energieflexibilität zu maximieren. Diese werden in dieser VDI-Publikation zusammenfassend und praxisnah aufgezeigt. Eine Beschreibung einzelner Vermarktungsmöglichkeiten sowie die Darstellung und Diskussion bestehender Vermarktungshemmnisse zeigen dabei auf, wie Industrieunternehmen unterschiedliche Vermarktungsmöglichkeiten bereits heute erfolgreich nutzen können. Gleichzeitig werden wesentliche Änderungsbedarfe im Hinblick auf bestehende regulatorische Rahmenbedingungen adressiert.

Abschließend wird in den neun beschriebenen Use Cases zur energetischen Flexibilisierung von Industrieprozessen branchenübergreifend aufgezeigt, auf welchen Wegen und unter welchen Voraussetzungen die Vermarktung von Flexibilität erfolgreich gelingen kann. Hierzu wird im Rahmen jedes Use Case dargestellt, wie eine Energieflexibilitätsmaßnahme identifiziert, umgesetzt und vermarktet werden kann. Angewandte Methoden und Erfahrungswerte aus erfolgreich in der Praxis umgesetzten Projekten zeigen wesentliche Potenziale in Verbindung mit der Bereitstellung von Flexibilität auf und tragen somit erheblich zur dringend benötigten Flexibilisierung der Stromnachfrage bei. Die vorgestellten Use Cases dienen zudem dazu, weiteren Unternehmen erste Ansatzpunkte und Impulse für die Einführung von Energieflexibilitätsmaßnahmen zur Verfügung zu stellen.

DOI - Zitierungsvorschlag

Bachmann A., Bank L., Bark C., Bauer D., Blöchl B., Brugger M., Buhl H. U., Dietz B., Donnelly J., Friedl T., Halbrügge S., Hauck H., Heil J., Hieronymus A., Hinck T., Ilieva-König S., Johnzén C., Koch C., Köberlein J., Köse E., Lochner S., Lindner M., Mayer T., Mitsos A., Roth S., Sauer A., Scheil C., Schilp J., Schimmelpfennig J., Schulz J., Schulze J., Sossenheimer J., Strobel N., Tristan A., Vernim S., Wagner J., Wagon F., Weibelzahl M., Weigold M., Weissflog J., Wenninger S., Wöhl M., Zacharias J., Zäh M. F., 2021, Energieflexibel in die Zukunft – Wie Fabriken zum Gelingen zur Energiewende beitragen können. <https://doi.org/10.24406/FIT-N-638765>

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

seit der Klimakonferenz in Paris im Dezember 2015 sieht sich nicht nur Deutschland, sondern sehen sich alle Länder mit der Frage konfrontiert, wie die Zukunft der Energieversorgung gestaltet werden kann und wie alternative Technologien etabliert werden können, um die Nutzung von klimaschädlichen Energieträgern nachhaltig zu reduzieren. Vor diesem Hintergrund wird der Ausbau von erneuerbaren Energien fortlaufend vorangetrieben. Deutschland ist in diesem Bereich Technologie- und Innovationstreiber. Im Jahr 2020 konnten bereits 47,4 % des deutschen Bruttostromverbrauchs durch erneuerbare Energien gedeckt werden – neue Rekordwerte. Im Klimaschutzgesetz der Bundesregierung ist vorgesehen, in Deutschland bis 2045 Klimaneutralität zu erreichen und damit auch die Stromversorgung vollständig auf erneuerbare Energien umzustellen. Für die Umsetzung muss jedoch ein Energiesystem geschaffen werden, das mit der zunehmenden Volatilität durch den steigenden Anteil an erneuerbaren Energien umgehen kann.

Eine der großen Herausforderungen für die Etablierung einer nachhaltigen Versorgung auf Basis von erneuerbaren Energien liegt in der schwankenden Stromproduktion der regenerativen Erzeugertechnologien. Leistung und Energiemengen aus Windturbinen sowie Solaranlagen fluktuieren über die Zeit und im Jahresverlauf, z. B. durch untertägige, mehrtägige oder saisonale Wetterveränderungen. Um das Energiesystem bei einem wachsenden Anteil erneuerbarer Energien in einem ständigen Gleichgewicht von Erzeugung und Verbrauch zu halten, bedarf es gleichzeitig großer Mengen an Energiespeicherkapazitäten, einem Netzausbau, der Sektorkopplung und einer Flexibilität auf Verbraucherseite. Solange dies nicht erreicht ist, müssen auf der Erzeugerseite kostenintensive Eingriffe erfolgen.

Düsseldorf im Oktober 2021

Alexander Sauer
Vorsitzender des VDI-Fachausschusses
Energieflexible Fabrik

Die aus heutiger Sicht erforderlichen Investitionen in die Stromerzeugungs- und Netzinfrastruktur können reduziert werden, wenn sich die Entwicklung weg von einer zentralen, verbrauchsorientierten Erzeugung hin zu einer dezentralen, erzeugungsorientierten Verbrauchssteuerung ändert. Innerhalb dieses Paradigmenwechsels wird die Industrie mehr und mehr dazu übergehen müssen, sich dem Energieangebot flexibel anzupassen. Der Faktor Energie wird somit zu einer variablen Planungsgröße im flexiblen Produktionsbetrieb. Hier setzt das Kopernikus-Projekt „SynErgie“ mit 90 Projektpartnern aus Industrie, Wissenschaft, Verbänden und Gesellschaft an. Untersucht wird die energetische Flexibilisierbarkeit der deutschen Industrie, um sie dazu zu befähigen, Strom vermehrt dann zu nutzen, wenn er reichlich vorhanden und damit kostengünstig ist, sowie entsprechend weniger, wenn das Gegenteil der Fall ist.

Überzeugt davon, dass die verbraucherseitige energetische Flexibilisierung ein wesentlicher Beitrag zum Gelingen der Energiewende in Deutschland ist, forscht seit dem September 2016 deutschlandweit im Rahmen des Kopernikus-Projekts „SynErgie“ eine ganze Generation an hochmotivierten Fachleuten aus Wissenschaft und Ingenieurwissenschaften, um den Technologievorsprung deutscher Unternehmen zu sichern und den Grundstein für eine bessere und saubere Zukunft zu legen. Die langfristige Umstellung des deutschen Energiesystems auf volatile erneuerbare Energien soll dadurch ermöglicht werden. Die konsequente Überführung in die Praxis treibt auch der VDI-Fachausschuss „Energieflexible Fabrik“ voran. Mit dieser VDI-Publikation möchten wir Ihnen einen Einblick in unsere wichtigsten bisherigen Ergebnisse geben und wünschen Ihnen hierbei viel Freude beim Lesen!

Jean Haeffs
Geschäftsführer der VDI-Gesellschaft
Produktion und Logistik

Inhalt

Management Summary	1
Vorwort	2
Autoren und Autorinnen	4
1 Einleitung	5
2 Methodenbeschreibung	7
3 Vermarktung	10
3.1 Möglichkeiten zur Vermarktung von Energieflexibilität im deutschen Strommarkt	10
3.1.1 Bereitstellung von Flexibilität am Strommarkt	10
3.1.2 Bereitstellung von Flexibilität am Ausgleichsenergiemarkt	11
3.2 Roadmap: Flexibilitätsbedarf und -vermarktung in Deutschland	13
4 Use Cases zur energieflexiblen Fabrik von Morgen – Fallstudien aus der Praxis	15
4.1 Vorstellung von Use Cases zur energieflexiblen Fabrik	17
4.1.1 Energieflexible Green Factory – Alois Müller	17
4.1.2 Energieflexibilisierung in nicht energieintensiven Unternehmen: Landmaschinenherstellung AGCO – Fendt	19
4.1.3 Energieflexible Kälteversorgung in der Lebensmittelindustrie – DMK	23
4.1.4 Flexible Luftzerlegungsanlagen – Linde	26
4.1.5 Maschinenbelegungsplanung in der Graphitierung – Showa Denko	29
4.1.6 Energetisches Management von elektrischen Fahrzeugflotten – Steinbacher-Consult	31
4.1.7 Energieflexibilität in der energieintensiven Aluminiumherstellung TRIMET	34
4.1.8 Flexibles Magnesium -Druckgussverfahren – Torun Bark Magnesium	36
4.1.9 Energieflexible Halbstoffherstellung in der Papierindustrie – UPM	39
4.2 Sichtweise eines Flexibilitäts-Projektentwicklers	42
5 Herausforderungen bei der Vermarktung von Nachfrageflexibilität und Lösungsvorschläge	44
5.1 Bereitstellung von Flexibilität am Strommarkt	44
5.2 Bereitstellung von Flexibilität am Ausgleichsenergiemarkt	45
6 Ausblick	47
Glossar	48
Schrifttum	50

Autoren und Autorinnen

Institute

Lukas Bank, Fraunhofer IGCV

Dennis Bauer, Fraunhofer IPA & EEP - Universität Stuttgart

Martin Brugger, Fraunhofer IGCV

Prof. Dr. Hans Ulrich Buhl, Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)

Julia Donnelly, Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)

Stephanie Halbrügge, Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)

Aljoscha Hieronymus, Fraunhofer IGCV

Jana Köberlein, Fraunhofer IGCV

Ekrem Köse, Fraunhofer IPA & EEP - Universität Stuttgart

Martin Lindner, PTW - TU Darmstadt

Prof. Alexander Mitsos, Ph.D., AVT – RWTH Aachen

Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer, Fraunhofer IPA & EEP - Universität Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Johannes Schilp, Fraunhofer IGCV

Julia Schulz, iwB – Technische Universität München

Jan Schulze, AVT – RWTH Aachen

Johannes Sossenheimer, PTW - TU Darmstadt

Nina Strobel, PTW - TU Darmstadt

Alejandro Tristan, Fraunhofer IPA & EEP - Universität Stuttgart

Dr.-Ing. Susanne Vernim, iwB – Technische Universität München

Jonathan Wagner, Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)

Felix Wagon, Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)

Dr. Martin Weibelzahl, Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold, PTW - TU Darmstadt

Jan Weissflog, Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)

Simon Wenninger, Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)

Moritz Wöhl, Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)

Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, iwB – Technische Universität München

Unternehmen

Dr.-Ing. Andreas Bachmann, AGCO GmbH

Dr.-Ing. Carlo Bark, Torun Bark Magnesium GmbH

Bruno Blöchl, Alois Müller GmbH

Benjamin Dietz, Steinbacher-Consult

Thomas Friedl, UPM GmbH

Heribert Hauck, TRIMET SE

Dr.-Ing. Joachim Heil, TRIMET SE

Torben Hinck, DMK Group

Dr. Carl Johnzén, Entelios

Carsten Koch, AGCO GmbH

Svetlina Ilieva-König, TRIMET SE

Stefan Lochner, Linde GmbH

Tim Mayer, Steinbacher Consult

Claudia Scheil, DMK Group

Jens Schimmelpfennig, Software AG

SHOWA DENKO CARBON Germany GmbH

Jan Zacharias, Entelios

1 Einleitung

Die Zukunft der Stromversorgung steht ganz im Zeichen der Energiewende. Diese umfasst eine Neuausrichtung unseres Stromsystems auf eine komplett erneuerbare Energieerzeugung. Ein Baustein, der maßgeblich zum Gelingen der Energiewende und damit zur Zukunftsfähigkeit des Wirtschaftsstandorts Deutschlands beitragen kann, ist eine energieflexible Stromnachfrage. Im Kopernikus-Projekt „SynErgie“ werden seit September 2016 viele Möglichkeiten und Chancen einer energieflexiblen Stromnachfrage erarbeitet. Zudem wurde aufgezeigt, welche Herausforderungen auf dem Weg zu einem System mit flexibler Energienachfrage noch bewerkstelligt werden müssen. Diese Chancen und Herausforderungen werden im Folgenden kurz skizziert.

Der steigende Anteil erneuerbarer Energien stellt das Stromnetz vor Herausforderungen. Wie Energieflexibilität beim Umgang mit diesen Herausforderungen helfen kann, zeigt das Video „Wie wir den Blackout verhindern können“ von Wissenschafts-YouTuber Doktor Watson.



<https://www.youtube.com/watch?v=O1ELU21wiJA>

Anhand des energiepolitischen Zieldreiecks (siehe Bild 1) lassen sich wichtige Erfolgsgrößen und darauf aufbauend Chancen und Herausforderungen des zukünftigen Energiesystems ableiten. Da eine Verbesserung einer der drei Metriken des energiepolitischen Zieldreiecks (Versorgungssicherheit, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit) in der Regel zulasten einer anderen Zielmetrik geht, wird oft auch der synonyme Begriff des Energie-Trilemmas verwendet.



Bild 1. Energiepolitisches Zieldreieck

Die **Umweltverträglichkeit** zukünftiger Maßnahmen ist im Zuge der Energiewende als Kernziel definiert, weshalb ein Wechsel zu einem rein erneuerbaren Energiesystem bis 2045 geplant ist. Erneuerbare Energieerzeugung hat jedoch gegenüber konventioneller Erzeugung typischerweise den Nachteil, dass die Erzeugung nicht verbrauchsorientiert, sondern witterungsabhängig stattfindet. Wenn die Nachfrageseite diese verlorene Flexibilität nicht anderweitig bereitstellen kann, entsteht eine Flexibilitätslücke [2], die die **Versorgungssicherheit** gefährdet. Um diese sich abzeichnende Flexibilitätslücke zu adressieren, kann industrielle Energieflexibilität einen wichtigen Beitrag zum Energiesystem der Zukunft leisten, da die deutsche Industrie mit einem Anteil von 44 % am Gesamtstromverbrauch [1] den größten Hebel bietet.

Für energieflexible Nachfrager bietet sich dabei die Chance wirtschaftliche Vorteile gegenüber einer inflexiblen Energienachfrage zu erzielen (Wirtschaftlichkeit). Eine flexible Energienachfrage befähigt Unternehmen dazu, Energie in Zeiten nachzufragen, in denen Preise niedrig sind. Dadurch lassen sich Strombezugskosten, und damit ein wesentlicher Kostenfaktor industrieller Stromnachfrager, deutlich reduzieren, wodurch Energieflexibilität sogar zu einem Teil des industriellen Geschäftsmodells werden kann [3; 4].

Energieflexibilität ist die Fähigkeit eines (Produktions-)Systems, sich schnell und prozesseffizient an Änderungen des Energiemarkts anzupassen. Eine energieflexible Fabrik ermöglicht eine potenzielle wirtschaftliche Nutzung der energetischen Flexibilität (VDI 5207 Blatt 1).

Niedrige Preise korrelieren dabei häufig mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien, da diese mit vernachlässigbaren variablen Kosten erzeugt werden können. Damit führt die industrielle Nachfrage zu Zeiten mit geringeren Strompreisen auch systematisch zu einer vermehrten Nutzung erneuerbarer Energien im Stromsystem und leistet somit auch einen Beitrag zur Umweltverträglichkeit [4].

Jedoch kommen diese großen Chancen nicht ohne zu meisternde Herausforderungen. Um Energieflexibilität zu ermöglichen und auf eine versorgungssichere und wirtschaftliche Art bestmöglich in das zukünftige Energiesystem zu integrieren, müssen eine Reihe technischer und marktlicher Voraussetzungen geschaffen und erfüllt werden.

Eine breite Implementierung flexibler Energienachfrage wird nur durch automatisierte Prozesse der

Flexibilitätsvermarktung möglich sein, die wiederum standardisierter Vermarktungsprozesse bedürfen. Diese standardisierte Vermarktung lässt sich effizient über Plattformlösungen auf Unternehmens- und Marktebene lösen, die es jedoch teilweise noch zu realisieren gilt [6; 7]. Es ist somit ein umfassendes Zusammenspiel von Informations- und Kommunikationstechnik innerhalb von Unternehmen auf gegebenenfalls vorhandenen Unternehmensplattformen notwendig, aber auch über Unternehmensgrenzen hinweg auf Markt- und Energiesynchronisationsplattformen [8].

Zu guter Letzt müssen auch Anlagen und Prozesse industrieller Unternehmen zu einem energieflexiblen Betrieb technisch befähigt werden. Für eine flexible Energienachfrage werden zumeist, entgegen aktuell

vorherrschenden Just-In-Time-Prozessen, Überkapazitäten für Zeiten erhöhter Nachfrage und Puffer für Zeiten verringerter Nachfrage aufgebaut. Dies stellt jedoch nicht den einzigen gangbaren Weg zum Aufbau von Energieflexibilität dar. So können auch entkoppelte Halberzeugnisprozesse zur Flexibilisierung genutzt werden. Alternativ kann Energieflexibilität zum Beispiel auch in der Infrastruktur vorliegen.

Insgesamt bietet Energieflexibilität bereits eine Vielzahl an wirtschaftlichen Chancen und komparativen Vorteilen für Unternehmen und ist ein wichtiger Baustein für die Energiewende, auch wenn dafür noch einige Herausforderungen zu lösen sind. Im Folgenden wird daher aufgezeigt, wie bereits heute Forschung und Industrie dazu beitragen, diese Chancen zu realisieren und Herausforderungen zu meistern.

2 Methodenbeschreibung

Die energetische Flexibilisierung von Fabriken und Unternehmen ist als eigenständiges Projekt in Industrieunternehmen einzuordnen, das interdisziplinäre Ansätze unter Berücksichtigung aller Domänen und Stakeholder erfordert. Daher ist eine klar definierte und strukturierte Methodik, die schrittweise zur erfolgreichen Flexibilisierung von Fabriken führt, notwendig. Mithilfe des in Bild 2 dargestellten Prozesses kann in sechs sequenziellen Prozessschritten, beginnend mit der initialen Analyse des Flexibilitätspotenzials bis hin zur kontinuierlichen Flexibilitätsoptimierung im laufenden Betrieb, eine Fabrik unter technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Gesichtspunkten sukzessive flexibilisiert werden.

Die ersten Schritte der sechsstufigen Methodik widmen sich der aufwandsarmen und nichtinvasiven Abschätzung der technischen und wirtschaftlichen Flexibilitätspotenziale. Zu Beginn werden vielversprechende Anlagen im Rahmen einer Bestandsaufnahme auf Voraussetzungen für eine energieflexible Betriebsweise hin geprüft, bevor das technische Flexibilitätspotenzial analysiert wird (VDI 5207 Blatt 2). Im Anschluss werden die Anlagen unter den Aspekten Art der Anlagensteuerung, Prozessrelevanz und zeitliche Entkopplung auf ihre Eignung für einen energieflexiblen Betrieb im Ökosystem der Produktion hin begutachtet, bevor die Wirtschaftlichkeit der Flexibilisierung abgeschätzt wird. Im Sinn einer Portfoliobewertung können die untersuchten Anlagen und Energieflexibilitätsmaßnahmen unter technischen und wirtschaftlichen Kriterien für detailliertere Untersuchungen priorisiert werden. Während der einzelnen Teilschritte können, parallel (Energie-)Effizienzpotenziale identifiziert und gehoben werden. Grundsätzlich

sollte Energieflexibilität und Energieeffizienz gleichermaßen behandelt und deren Wechselwirkungen (VDI 5207 Blatt 1) berücksichtigt werden, um den größtmöglichen Nutzen für das produzierende Unternehmen zu stiften.

Im zweiten Schritt der Konzeption und Planung werden die zuvor priorisierten Energieflexibilitätsmaßnahmen im Detail untersucht, Daten (z. B. Lastgänge oder individuelle Anlagenparameter) erhoben und bei Bedarf (temporäre) Messungen durchgeführt, bevor die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Energieflexibilitätsmaßnahmen analysiert und bestimmt werden kann. Auf Basis der simulationsgestützten Wirtschaftlichkeitsanalyse werden die Energieflexibilitätsmaßnahmen erneut priorisiert und die zur Umsetzung geeigneten Maßnahmen ausgewählt. Für diese wird daraufhin eine Umsetzungsplanung, u. a. mit Ansätzen des Systems Engineering, in iterativen Schleifen durchgeführt, um den Anforderungen komplexer Systeme gerecht zu werden.

Der dritte Schritt dient der tatsächlichen Umsetzung vielversprechender Energieflexibilitätsmaßnahmen sowie der Implementierung einer energieflexiblen Betriebsweise der Fabrik. Die technische Befähigung einzelner Anlagen und Systeme hierzu ist dabei ganzheitlich unter Aspekten der Hardware selbst, der Informations- und Kommunikationstechnik sowie der Produktionsplanung und -steuerung vorzunehmen. Sind die Anlagen und Systeme flexibilisiert, muss der energieflexible Betrieb mit Testläufen, Analysen und Sicherheitsüberprüfungen validiert werden, bevor die Fabrik in den operativen energieflexiblen Betrieb übergehen kann.



Bild 2. Sechsstufige Methodik zur energetischen Flexibilisierung von Fabriken

Nachdem die Fabrik flexibilisiert wurde, kann mit der operativen Vermarktung von Flexibilität begonnen werden (VDI 5207 Blatt 1). Dabei ist neben der eigentlichen Vermarktung auf einen abgestimmten Betrieb aller Anlagen und Systeme zu achten, sodass die (logistischen) Zielgrößen der Produktion eingehalten werden können.

In **VDI 5207 Blatt 2** werden Rahmenbedingungen und Konzepte sowie Vorgehensweisen zur Identifikation und technischen Bewertung von Energieflexibilität im industriellen Umfeld detailliert erläutert. Neben der Definition von technischen Randbedingungen und der Klassifizierung von Flexibilitätsmaßnahmen, werden Vorgehensweisen zur Transparenzschaffung durch Messkonzepte, Flexibilitätsmaßnahmenidentifikation und der Schaffung und Erweiterung von Flexibilität (z. B. durch Aggregation) eingeführt.

In der Controlling- und Monitoring-Phase wird während und nach der Erbringung und Vermarktung von Flexibilität die Umsetzung hinsichtlich Erbringungsgrad und -qualität analysiert. Dazu können sowohl klassische Tools des betrieblichen Energiemanagements als auch fortgeschrittenere Methoden der Data Analytics verwendet werden, um Anomalien und Verbesserungspotenziale frühzeitig zu erkennen und entsprechende Handlungsschritte abzuleiten und anzustoßen.

Mithilfe der während der Controlling- und Monitoring-Phase gewonnenen Erkenntnisse können im Schritt der Betriebsoptimierung weitere Verbesserungen im Bereich der Flexibilisierung erreicht werden. Der Nutzungsgrad verschiedener Energieflexibilitätsmaßnahmen kann beispielsweise durch datenbasierte Analysen und Simulationen weiter gesteigert werden. Dieses theoretisch ermittelte Potenzial kann anschlie-

ßend in eine weitere Iteration der Konzeption und Planung einfließen und so der energieflexible Betrieb kontinuierlich optimiert werden.

Die beschriebene Methodik ist unabhängig von einer spezifischen Anwendungsdomäne sowie bestehenden Technologien einsetzbar. Auf dem Weg zur energieflexiblen Fabrik sollte jedoch ein interdisziplinäres Projektteam unter Berücksichtigung von relevantem Domänenwissen zusammengestellt werden. Von zentraler Bedeutung sind dabei die eng miteinander verzahnten Bereiche der Energiewirtschaft, Informations- und Kommunikationstechnik, Produktionsinfrastruktur, Produktionstechnik sowie die Schaffung übergreifender organisatorischer Rahmenbedingungen. Bild 3 veranschaulicht die relevanten Bereiche samt exemplarischer Aufgaben, Ziele und Kompetenzen.

Experten aus dem Bereich der Produktionstechnik bringen ihr Wissen rund um Produktionsprozesse und Produktionsmaschinen ein. Sie unterstützen bei der technischen Flexibilisierung einzelner Produktionsanlagen, bei der Produktionsplanung und -steuerung sowie bei deren Verknüpfung mit Flexibilitätsmaßnahmen. Ergänzend bringen sich Experten aus dem Bereich der Produktionsinfrastruktur für Versorgungssysteme von Stromerzeugern bis hin zu Wärme- und Kältenetzen ein. Hierunter fallen auch die Aktivierung und Integration von Energiespeichern in die unternehmensinternen Versorgungssysteme sowie die Nutzung von Potenzialen der Sektorkopplung. Um das Zusammenspiel von Produktionstechnik und -infrastruktur mit der Energiewirtschaft zu orchestrieren, spielt die Informations- und Kommunikationstechnik in der energieflexiblen Fabrik eine zentrale Rolle. Kommunikationstechnologien müssen definiert, Anlagen und Systeme digitalisiert, kommunikationsfähig angepasst und neue Systeme in die IT-Systemlandschaft integriert werden. Energiewirtschaftliches Know-how ist

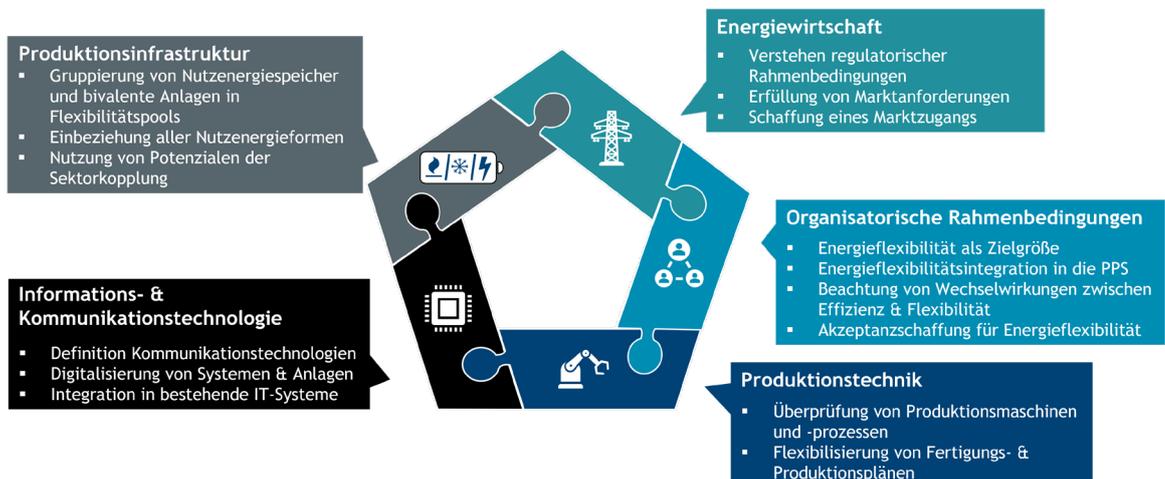


Bild 3. Relevantes Domänenwissen bei der Flexibilisierung von Industrieunternehmen

komplementär zur optimalen Ausrichtung einer energieflexiblen Fabrik an den regulatorischen Rahmenbedingungen relevant. Hier müssen Anwendungsfälle und Vermarktungsmöglichkeiten von Energieflexibilität erkannt, Marktanforderungen identifiziert und ein Marktzugang geschaffen werden. Übergreifend müssen die organisatorischen Rahmenbedingungen unternehmensweit für eine energieflexible Fabrik gebildet werden. Eine energieflexible Fabrik ist nur gemeinsam als Unternehmen, von der Führungsebene bis zum Werker, erfolgreich umsetzbar. Dazu muss Energieflexibilität als Zielgröße definiert, verstanden und schlussendlich auch in die Produktionsplanung und -steuerung integriert werden. Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienz und -flexibilität müssen analysiert und über den gesamten Prozess der Flexibilisierung beachtet werden [3]. Die Schaffung eines auf Energieflexibilität ausgerichteten organisatorischen Rahmens beinhaltet auch Maßnahmen zur Schaffung von Akzeptanz von Energieflexibilität im Unternehmen.

Die Zusammensetzung eines Projektteams kann dabei über die verschiedenen Phasen der in Bild 2 beschriebenen Prozessschritte variieren und muss individuell angepasst werden. Bei fehlendem internem Wissen oder verfügbaren Ressourcen können externe Dienstleister und Berater hinzugezogen werden. Zu Beginn des Projekts sind vermehrt strategische Entscheidungen auf Geschäftsführungs-/Leitungsebene zu treffen, die von der operativen Ebene unterstützt werden sollten. In den folgenden Schritten des sechsstufigen Prozesses verändern sich die überwiegend strategischen Entscheidungen hin zu einem höheren Anteil an operativen Aufgaben durch Ingenieure, Techniker und Mechatroniker.

Die Flexibilisierung von Industrieunternehmen ist als kontinuierlicher Prozess der Verbesserung zu verstehen. Neben der erstmaligen Identifikation und Hebung von Flexibilitätpotenzialen ist die schrittweise Erweiterung und ein erneutes Durchlaufen der initialen Potenzialanalyse sinnvoll, um kontinuierliche Verbesserungen zu erreichen.

3 Vermarktung

3.1 Möglichkeiten zur Vermarktung von Energieflexibilität im deutschen Strommarkt

Unternehmen können ihre Flexibilität am Strom- und/oder am Ausgleichsenergiemarkt anbieten, um dadurch Kosten zu senken und/oder Erlöse zu maximieren (siehe Bild 4). Mit dem Ausgleichsenergiemarkt wird in diesem Abschnitt Handel mit Systemdienstleistungen zur Frequenzhaltung und zur Betriebsführung bezeichnet; neben dem Handel mit klassischer Regelenergie werden also auch der Handel mit Momentanreserve, das Engpassmanagement sowie ab- und zuschaltbare Lasten betrachtet.

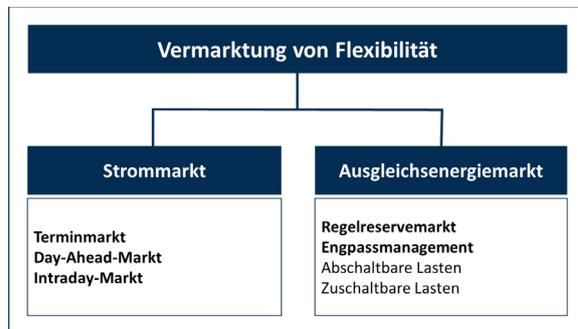


Bild 4. Vermarktung von Flexibilität

Unter bestimmten Voraussetzungen ist die Vermarktung von Flexibilität auf dem Strommarkt (insbesondere auf dem kontinuierlichen Intraday-Markt) ebenfalls systemdienlich. In diesem Abschnitt sowie in Abschnitt 5 werden zur besseren Übersicht die verschiedenen Vermarktungsmöglichkeiten getrennt beschrieben.

3.1.1 Bereitstellung von Flexibilität am Strommarkt

In Deutschland ist der Strommarkt als sogenannter Energy-Only-Markt (EOM) organisiert. Im Gegensatz zu einem Kapazitätsmarkt, wie er z. B. in Frankreich existiert, wird auf dem EOM nur der tatsächlich erzeugte Strom vergütet und nicht bereits die bloße Vorhaltung von Kapazitäten zur Stromerzeugung. Streng genommen gibt es in Deutschland dabei nicht den einen Strommarkt, sondern es existiert vielmehr eine Reihe von zeitlich aufeinander folgenden Teilmärkten für Strom (Beispiele sind der Terminmarkt, der Day-Ahead-Markt und der Intraday-Markt). In Deutschland erfolgt der Stromhandel entweder über die Energiebörsen in Leipzig (European Energy Exchange –

EEX, Terminmarkt) und Paris (European Power Exchange – EPEX SPOT, Day-Ahead- und Intraday-Markt) oder außerbörslich über den sogenannten Over-The-Counter-Handel (OTC-Handel). Bei letzterem handeln die Beteiligten ihre Strommengen individuell und bilateral, oft mithilfe eines Brokers und/oder über Online-Handelsplattformen.

SynErgie Schnell-Check-Tool

Ermitteln Sie mithilfe des SynErgie-Schnell-Check-Tools, welche Möglichkeiten bei Ihnen zur Einsparung von Energiekosten bestehen und mithilfe welcher Maßnahmen Sie Vorteile durch die Nutzung von Energieflexibilität (z. B. Netzentgeltoptimierung, Lastverschiebung, Eigenerzeugung und Systemdienstleistungen) realisieren können.



<https://synergie-projekt.de/ergebnis/schnell-check-tool>

Terminmarkt und Spotmarkt

Die börslichen Teilmärkte für Strom, die in Deutschland und Europa existieren, unterscheiden sich unter anderem hinsichtlich ihrer zeitlichen Abfolge. Langfristig werden Strommengen auf dem Terminmarkt finanziell abgesichert, wobei oftmals (aber nicht immer) keine physischen Mengen ausgetauscht werden, sondern nur die Abweichung zwischen dem im Voraus vereinbarten Preis und dem später tatsächlich realisierten Strompreis (Spotpreis) ausgezahlt wird. Rückt der Erfüllungszeitpunkt näher, das heißt der Zeitpunkt, an dem die Verbraucher den Strom aus dem Netz entnehmen, kommen kurzfristigere Teilmärkte zum Einsatz, die unter dem Begriff des Spotmarkts zusammengefasst werden. Hier wird zwischen dem Day-Ahead-Markt, der Intraday-Auktion und dem Intraday-Markt unterschieden.

Beim börslichen Handel auf dem Spotmarkt (z. B. an der Strombörse EPEX SPOT) werden Stromangebot und -nachfrage täglich um 12:00 Uhr für den darauffolgenden Tag auktioniert. Auf dem Day-Ahead-Markt werden Stunden- und Blockgebote versteigert.

Um 15:00 Uhr findet die sogenannte Intraday-Auktion statt, bei der Viertelstunden-Produkte für den nächsten Tag versteigert werden. Nach der Intraday-Auktion beginnt der kontinuierliche Intraday-Handel, über welchen Stromanbieter und -abnehmer fortlaufend und bis zu fünf Minuten vor dem Erfüllungszeitpunkt miteinander handeln können. Durch die zeitliche Staffelung der Märkte haben die Marktteilnehmer die Möglichkeit, ihr jeweiliges individuelles Risiko zu minimieren und auf etwaige Prognoseabweichungen bei der volatilen Einspeisung oder auf Nachfrageänderungen flexibel zu reagieren. Auf dem Day-Ahead-Markt (stündliche und viertelstündliche Auktion) bildet sich der Markträumungspreis, indem der Schnittpunkt zwischen der Angebots- und der Nachfragekurve ermittelt wird. Dabei bestimmt der Preis des letzten bezuschlagten Gebots den Markträumungspreis (Merit-Order-Prinzip). Während der Strompreis bei der Intraday-Auktion ebenfalls mithilfe des Merit-Order-Prinzips ermittelt wird, gilt beim kontinuierlichen Intraday-Handel das „Pay-as-bid“-Verfahren. Bei diesem Verfahren werden Kauf- und Verkaufsgesamte ebenfalls kontinuierlich in einem Stunden- oder Viertelstunden-Raster abgegeben und aufsteigend gegenübergestellt. Sobald ein Kaufgebotspreis gleich oder größer ist als der jeweils günstigste Verkaufspreis, findet eine Transaktion statt.

3.1.2 Bereitstellung von Flexibilität am Ausgleichsenergiemarkt

Bei der Vermarktung am Ausgleichsenergiemarkt generieren Unternehmen Erlöse durch die Erbringung von Systemdienstleistungen für die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB).

Frequenzhaltung

Die Hauptaufgabe der ÜNB ist es, die Netzfrequenz von 50 Hz aufrechtzuerhalten, indem sie Stromangebot und -nachfrage zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort im Stromsystem im Gleichgewicht halten. Dies ist keine triviale Aufgabe, da sich Angebot und Nachfrage oft sehr kurzfristig ändern. Beispielsweise kann ein Wetterumschwung dazu führen, dass der Wind stärker weht als ursprünglich prognostiziert und Windkraftanlagen kurzfristig mehr Strom erzeugen sowie ins Netz einspeisen. Wird dieser Strom nicht gleichzeitig zur Einspeisung verbraucht, kommt es zu Frequenzschwankungen (im beschriebenen Fall käme es zu einer Frequenzerhöhung). Auch die Stromabnahme kann unter Umständen variieren, z. B. bei einer technischen Störung mit einem kurzfristigen Produktionsausfall eines energieintensiven Prozesses,

wodurch Frequenzabweichungen im Stromnetz verursacht werden. In diesen Fällen kann am Spotmarkt nicht immer adäquat auf Abweichungen des prognostizierten Angebots oder der Nachfrage reagiert werden bzw. der Handel kann am Spotmarkt schon beendet sein. Um dennoch die Netzfrequenz halten zu können, greifen die ÜNB in der Regel auf die sogenannte Regelleistung zurück. Dabei wird entweder das Stromangebot im Netz erhöht (positive Regelarbeit) oder gesenkt (negative Regelarbeit). Bei der Regelleistung (Vorhaltung von Leistung) und der Regelarbeit (Abruf von vorgehaltener Leistung) wird zwischen Momentanreserve (MR), Primär- (PRL), Sekundär- (SRL) und Minutenreserveleistung (MRL) unterschieden, die sich in ihrer zeitlichen Abruf-Reihenfolge unterscheiden (siehe Bild 5). Diese Regelleistungsarten werden in getrennten Auktionsverfahren (nach dem Merit-Order-Prinzip) unter präqualifizierten Anbietern durch die ÜNB bezuschlagt und mit dem Regelleistungspreis (€/MW) vergütet. Die Kosten dafür werden auf die Netzentgelte umgewälzt. Die Regelarbeit wird sowohl für die SRL als auch für die MRL seit dem 03.11.2020 jeweils in einer zweiten Auktion unter präqualifizierten und nicht präqualifizierten Anbietern beschafft und mit dem Regelarbeitspreis (€/MWh) vergütet. Die Ausgaben der ÜNB für die Regelarbeit werden den für das Ungleichgewicht im System verantwortlichen Akteuren viertelstundenscharf in Rechnung gestellt (Ausgleichsenergiepreis).

SynErGame

Liegen Stromangebot und Stromnachfrage zu weit auseinander, verändert sich die Netzfrequenz und es droht im schlimmsten Fall der Blackout. Mit dem **Browserspiel SynErGame** kann jeder und jede testen, wie Energieflexibilität in der Praxis funktioniert – und das spielerisch. In SynErGame müssen Spielerinnen und Spieler einen Blackout verhindern, indem sie die Produktionsprozesse von Industriewerken so anpassen, dass Stromangebot und -nachfrage im gesamten Stromsystem übereinstimmen.



<https://synerggame.synergie-projekt.de>

Kann eine Frequenzabweichung mithilfe der vorgestellten Maßnahmen nicht verhindert werden, können die ÜNB in Notfällen zusätzlich große Lasten abschalten bzw. zuschalten (sogenannte abschaltbare

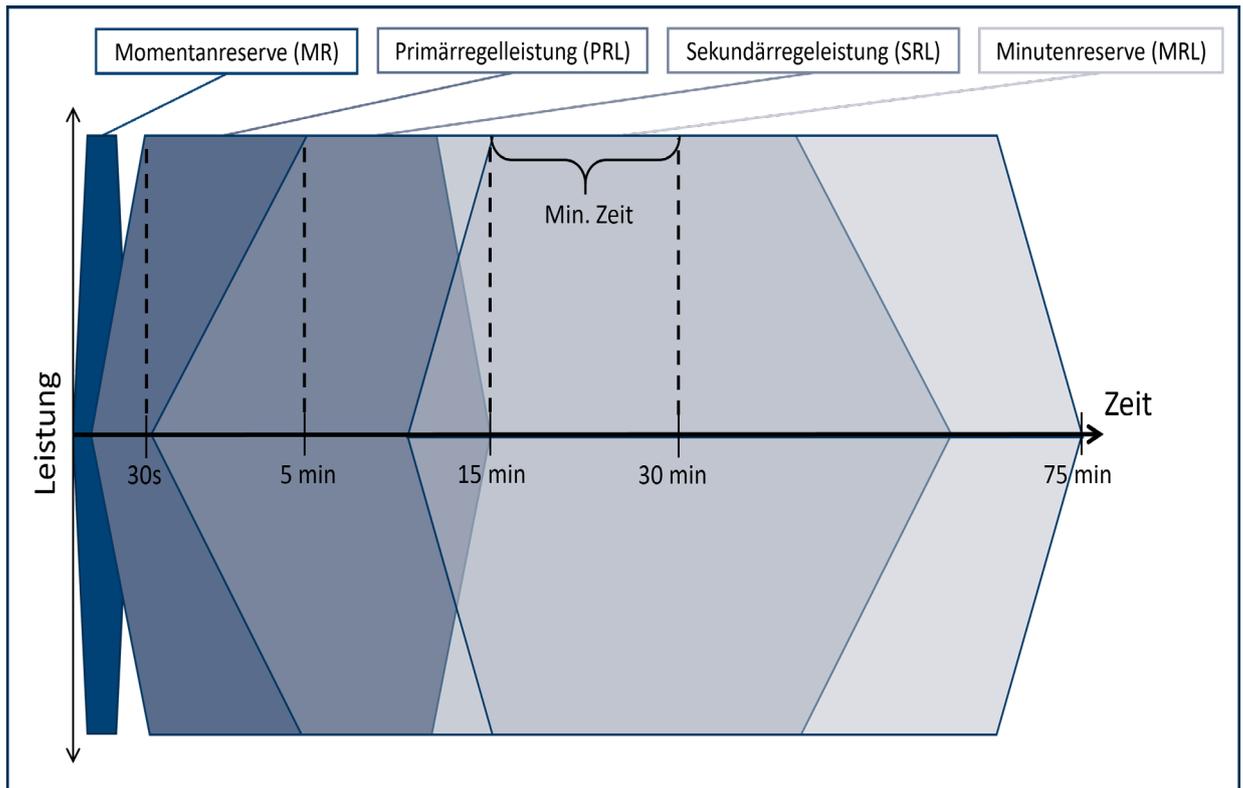


Bild 5. Regelreservearten

oder zuschaltbare Lasten). Bei den abschaltbaren Lasten wird zwischen zwei technischen Qualitäten differenziert: (1) sofort abschaltbare Lasten, deren Erbringungszeit 350 ms beträgt, und (2) schnell abschaltbare Lasten, deren Erbringungszeit 15 Minuten beträgt. Die sofort abschaltbaren Lasten können in einer betroffenen Regelzone automatisch vom Netz geworfen werden, wenn die Frequenz 49,7 Hz unterschreitet. Die Vergütung ist in der Verordnung zu abschaltbaren Lasten (AbLaV) geregelt.

Engpassmanagement

Erschwerend zu den kurzfristigen Schwankungen bei Angebot und Nachfrage kommt in Deutschland hinzu, dass der Strommarkt als Einheitspreissystem organisiert ist, bei dem auf dem Day-Ahead-Markt bzw. bei der Intraday-Auktion zu jedem Zeitpunkt ein einziger Preis für Gesamtdeutschland gebildet wird. Beim Handel von Strom – und bei der Preisbildung auf dem

Strommarkt – werden die physikalischen Restriktionen des Netzes nicht berücksichtigt, sodass der Strompreis auch keine Netzengpässe widerspiegelt. Dies hat zur Folge, dass der börslich gehandelte Strom meist physisch nicht transportiert werden kann und es ohne den Einsatz von Korrekturmaßnahmen (z. B. Redispatch) durch die ÜNB zu Leitungsüberlastungen kommen würde. Beim Redispatch (Engpassmanagement) weisen die ÜNB klassischerweise Kraftwerksbetreiber an, ihre geplante (auf dem Strommarkt verkaufte) Stromproduktion anzupassen. Dabei senkt ein Kraftwerk, das sich „vor“ dem Netzengpass befindet, seine Stromproduktion, während ein anderes Kraftwerk „hinter“ dem Netzengpass seine Stromproduktion erhöht. Durch den Redispatch des Kraftwerkpärchens ändert sich die örtliche Verteilung der Stromproduktion und der Engpass an einer (Haupt-)Transportleitung wird behoben. Neben Kraftwerken könnten zukünftig verstärkt zu- oder abschaltbare Lasten (z. B. energieflexible Fabriken) zu Redispatch-Zwecken eingesetzt werden.

3.2 Roadmap: Flexibilitätsbedarf und -vermarktung in Deutschland

Bild 6 zeigt ausgewählte Meilensteine der Energiepolitik und Flexibilitätsvermarktung in Deutschland entlang einer Roadmap. Die Meilensteine werden im Folgenden kurz beschrieben:

1. EEG

Mit Inkrafttreten des 1. Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) am 29.03.2000 wurde der Grundstein für die Förderung der Erneuerbaren in Deutschland gelegt. Unter anderem regelt das EEG den Einspeisevorrang für und die Vergütung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen.

Atomausstieg

Über einen Zeitraum von 12 Jahren (2011 bis 2022) werden in Deutschland Atomkraftwerke mit einer Gesamtkapazität von ca. 21,5 GW vom Netz genommen. Mit der Abschaltung der grundlastfähigen Atomkraftwerke geht Deutschland damit gesicherte Leistung verloren.

1. AbLaV

Die 1. Verordnung zu abschaltbaren Lasten (AbLaV) regelte erstmals, dass die Übertragungsnetzbetreiber bestimmte flexible industrielle Nachfrager anweisen können, weniger Strom zu verbrauchen.

Pariser Klimaabkommen

Mit Unterzeichnung des Pariser Klimaabkommens einigte sich die internationale Staatengemeinschaft darauf, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Zudem sollen Anstrengungen unternommen werden, den Anstieg auf 1,5 °C zu beschränken.

Clean Energy for all Europeans Package

Mit Verabschiedung des „Clean Energy for all Europeans Package“ der EU wurden maßgebliche Schritte zur Veränderung und Harmonisierung der Regelleistung auf europäischer Ebene eingeleitet (z. B. System Operations Guideline (SOGL) und Electricity Balancing Guideline (EBGL)).

European Green Deal

Der im Dezember 2019 vorgestellte European Green Deal der Europäischen Kommission soll als Fahrplan für eine nachhaltige EU-Wirtschaft dienen. Heruntergebrochen auf die Jahre bis 2030 enthält der Green Deal unter anderem Vorgaben für die verschiedenen Wirtschaftssektoren der EU, wie viel CO₂ in jedem Sektor emittiert werden darf. Damit bekräftigt der Green Deal, dass insbesondere die Industrie einen wichtigen Beitrag zur systemischen Treibhausgasneutralität leisten soll.

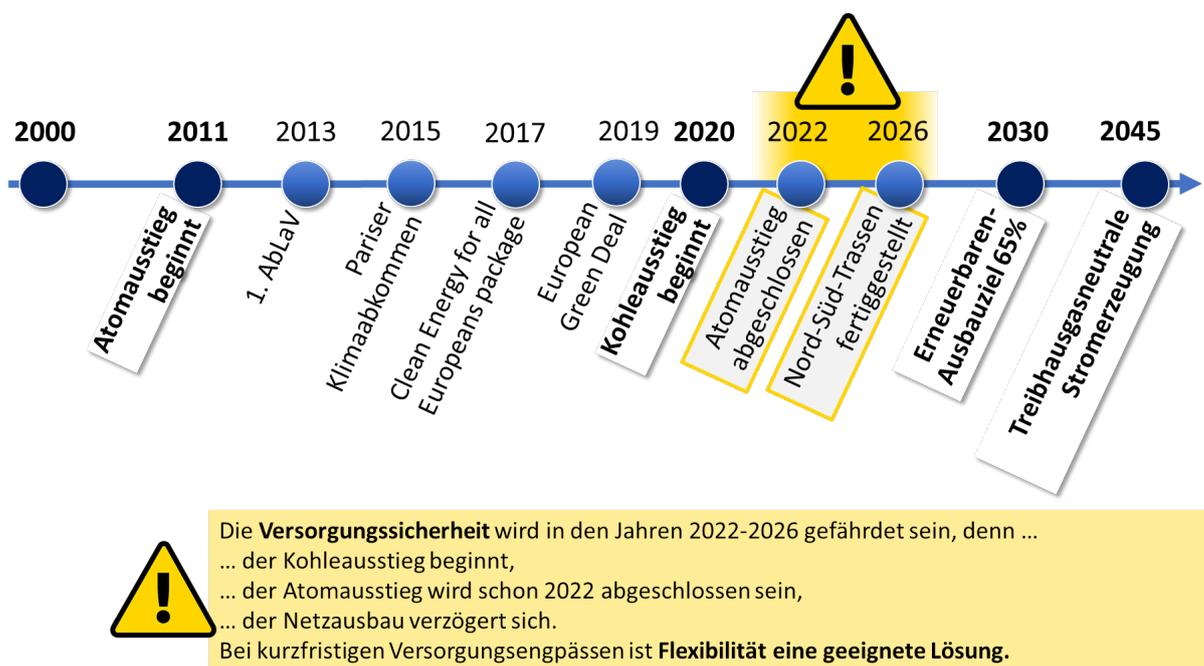


Bild 6. Roadmap Flexibilitätsvermarktung und -bedarf in Deutschland

Kohleausstieg

Bis spätestens 2038 sollen alle deutschen Kohlekraftwerke abgeschaltet werden. Durch die Abschaltung der grundlastfähigen Kohlekraftwerke mit einer Gesamtkapazität von ca. 40 GW geht Deutschland nach dem Atomausstieg weitere gesicherte Leistung verloren. Die Nachfrageflexibilität von Unternehmen muss – gemeinsam mit einer Reihe weiterer Maßnahmen – dazu beitragen, diesen Verlust an gesicherter Leistung abzufangen.

Flexibilitätslücke

Da sich der Netzausbau verzögern wird, der Atomausstieg allerdings schon 2022 abgeschlossen sein soll und der Kohleausstieg 2020 begann, ist die Versorgungssicherheit in Deutschland in den Jahren 2022 bis 2026 gefährdet. Zur Behebung kurzfristiger Versor-

gungseingänge ist Flexibilität eine geeignete, sinnvolle und vor allem notwendige Lösung.

Erneuerbaren-Ausbauziel 2030: 65 %

Bis zum Jahr 2030 sollen erneuerbare Energiequellen einen Anteil von 65 % am Bruttostromverbrauch in Deutschland ausmachen. Durch die Bereitstellung von Nachfrageflexibilität können Unternehmen dazu beitragen, die Erneuerbaren in das Energiesystem zu integrieren.

Treibhausgasneutrale Stromerzeugung

Bis zum Jahr 2045 soll der gesamte in Deutschland erzeugte und verbrauchte Strom treibhausgasneutral erzeugt werden.

4 Use Cases zur energieflexiblen Fabrik von Morgen – Fallstudien aus der Praxis

Aktuell profitieren bereits zahlreiche Unternehmen diverser Branchen von einer energieflexiblen Prozessgestaltung. Typische Chancen und Herausforderungen sind bereits in der Einleitung aufgeführt. Aufgrund der hohen Bedeutung für das Gelingen der Energiewende sollen im Folgenden Use Cases zu energieflexiblen Fabriken aus unterschiedlichen Branchen vorgestellt werden. Für jeden vorgestellten Use Case

wird beschrieben, wie die jeweilige Energieflexibilitätsmaßnahme identifiziert, umgesetzt und vermarktet wurde und welcher Benefit hierbei entstanden ist. Diese Use Cases sollen einen Leitfaden für die Industrie darstellen, um Flexibilität in der eigenen Branche oder im Werk erstmalig zu adressieren und umzusetzen. Tabelle 1 liefert eine Kurzübersicht über die Use Cases und ihre Hauptmerkmale.

Tabelle 1. Übersicht über die Use Cases zur energieflexiblen Fabrik

	Alois Müller Energieflexible Green Factory	AGCO – Fendt Energieflexibilisierung in nicht energieintensiven Unternehmen: Landmaschinenherstellung	DMK Energieflexibilität in der Lebensmittelindustrie	Linde Flexible Luftzerlegungsanlagen	Showa Denko Maschinenbelegungsplanung in der Graphitierung	Steinbacher-Consult Energetisches Management von elektrischen Fahrzeugflotten	TRIMET Energieflexibilität in der energieintensiven Aluminiumherstellung	Torun Bark Flexibles Magnesium-Druckgussverfahren	UPM Energieflexible Halbstofffertigung in der Papierindustrie
Absch.	4.1.1	4.1.2	4.1.3	4.1.4	4.1.5	4.1.6	4.1.7	4.1.8	4.1.9
Branche	Energie- und Gebäudetechnik, industrieller Anlagenbau	Landmaschinenbau	Lebensmittelindustrie	Chemie	Chemie	Elektromobilität	Aluminium-Metallerzeugung	Druckgussbranche	Papierherstellung
Prozess	flexible Speicher- und Ladetechnologien- und Erzeugungsanlagen (BHKW)	flexible Lüftungsanlage und Flurförderfahrzeuge	flexible Kältebereitstellung	kontinuierlicher Trennprozess	Graphitierung	Ladevorgänge	Metallherstellung	Magnesium-Druckguss	Halbstoffherstellung
Zielsetzungen	externes Anbieten von Energieflexibilitäten und Maximierung der Nutzung erneuerbarer Energien	Reduktion von Spitzenlast, Vermarktung von Energieflexibilität	Nutzung von Prozessoleranzen, um Kältebereitstellung mittels inhärenter thermischer Speicher zu flexibilisieren	Flexibilisierung des Energiebedarfs durch flexible Produktionsmengen; Ausnutzung von Flüssiggasinventaren als Energiepuffer	energieflexible Maschinenbelegungsplanung energieintensiver Prozesse inkl. optimaler Ressourcenallokation	netzdienliche und flexible Steuerung von Ladevorgängen und Bereitstellung von Flexibilität	Flexibilisierung einer auf konstanten Energieeintrag ausgelegten Elektrolyseanlage	Flexibilisierung der Tiegelöfen durch Ausnutzung des Schmelzbads (Temperatur und Füllstand) und durch einen dynamischen Energieträgerwechsel (bivalente Fahrweise mit Strom oder Gas)	flexible Produktion speicherbarer Produktionsstoffe

	Alois Müller	AGCO – Fendt	DMK	Linde	Showa Denko	Steinbacher-Consult	TRIMET	Torun Bark	UPM
	Energieflexible Green Factory	Energieflexibilisierung in nichtenergieintensiven Unternehmen: Landmaschinenherstellung	Energieflexibilität in der Lebensmittelindustrie	Flexible Luftzerlegungsanlagen	Maschinenbelegungsplanung in der Graphitierung	Energetisches Management von elektrischen Fahrzeugflotten	Energieflexibilität in der energieintensiven Aluminiumherstellung	Flexibles Magnesium-Druckgussverfahren	Energieflexible Halbstofffertigung in der Papierindustrie
Energieflexibilität	Energiebezug anpassen über Power-to-Heat, Energie speichern mittels Wärmepuffer und Batteriespeicher	Parameteranpassung bei den Lüftungsanlagen, (Auftrags-) Start verschieben bei den Flurförderfahrzeugen	Thermische Energiespeicherung im Kältesystem	Anpassung der Kapazitätsplanung, Vorhaltung von Produkt und Verschiebung des Prozessstarts	Anpassung der Kapazitätsplanung und Produktionsreihenfolge	Auftragsstart verschieben, Elektrische Energiespeicherung in der Ladeinfrastruktur der elektrischen Fahrzeuge	Produktionsdrosselung bzw. -erhöhung	dynamischer Energieträgerwechsel (Bivalenz) und thermische Energiespeicherung	Halbstoffproduktion verschieben über Stoffspeicherung; Reduzierter Teillastbetrieb möglich
Flexibilität	Vielzahl kleinerer Flexibilitätspotenzial	Vielzahl kleinerer Flexibilitätspotenzial (Gesamtleistung 1 MW)	< 1 MW	hoch	< 10 MW	50 kW bis 200 kW je Fahrzeug	±22 MW (Modulation) bzw. 90 MW (AbLaV)	Vielzahl kleinerer Flexibilitätspotenzial (Gesamtleistung < 1,5 MW)	< 40 MW im Endausbau bzw. 30 MW (AbLaV)
Benefits	Reduktion von Spitzenlast, Vermarktung von Energieflexibilität	Nutzung variabler Strompreise	Nutzung variabler Strompreise	Reduktion von Spitzenlasten, Nutzung variabler Strompreise	Reduktion von Spitzenlasten, Nutzung variabler Strompreise	energetisches Management von elektrischen Fahrzeugflotten, Vermarktung von Flexibilität durch Sektorkopplung	Aufnahme fluktuierender Energiemengen aus Wind-/Solarerzeugung („virtuelle Batterie“), Teilnahme am Regelenenergiemarkt, Vermarktung der Flexibilität	Reduktion von Spitzenlast, Nutzung variabler Strompreise	Reduktion von Spitzenlasten, Nutzung variabler Strompreise

4.1 Vorstellung von Use Cases zur energieflexiblen Fabrik

4.1.1 Energieflexible Green Factory - Alois Müller

Kurzcharakterisierung

Die Alois-Müller-Gruppe ist seit 1973 vom Familienbetrieb zum mittelständischen inhabergeführten Unternehmen mit über 600 Mitarbeitenden an 12 Standorten gewachsen. Alois Müller ist Spezialist für Energie- und Gebäudetechnik (Heizung, Lüftung, Sanitär, Kälte, Elektro) sowie den industriellen Anlagenbau. Gemäß dem Unternehmensleitsatz „Energie im Fokus“ liegt bei allen Projekten der Schwerpunkt auf innovativen sowie kosten- und energieeffizienten Lösungen, ohne dabei den Benutzerkomfort einzuschränken. Das Werk in Ungerhausen besteht aus einem 18.000 m² großen Produktions- und Bürogebäude. Es wurde im Sommer 2019 in Betrieb genommen. Rund 250 Menschen arbeiten hier in der Fertigung sowie in der Verwaltung. In der energieflexiblen und nahezu CO₂-neutralen Produktionsstätte, der Green Factory, produziert Alois Müller für mobile Energiezentralen in Containerbauweise sowie Energiemodulsysteme. Zudem fertigt die Unternehmensgruppe in ihrer Green Factory Lüftungskanäle und versorgungstechnische Komponenten des Anlagenbaus wie Rohrleitungssysteme aus Stahl und Edelstahl.

Identifikation von Energieflexibilität

Die Identifizierung und Befähigung zur Nutzung der Energieflexibilitätspotenziale von Alois Müller im Werk in Ungerhausen ist Teil des übergreifenden Ziels, den Standort des Unternehmens klimaneutral als „Green Factory“ zu gestalten. Der erste Schritt auf dem Weg dorthin war die Sicherstellung, dass die benötigten Energieformen – Strom, Wärme und Kälte – regenerativ und treibhausneutral bereitgestellt werden können. Dies kann in der Regel durch den Zukauf extern erzeugter erneuerbarer Energieformen oder durch Eigenerzeugung erreicht werden. In der Green Factory wurde die zweite Option gewählt, sodass die für Verwaltung und Produktion benötigte erneuerbare Energie komplett vor Ort erzeugt wird.

Um eine erneuerbare, emissionsneutrale Versorgung zu erreichen, wurden mehrere Energieanlagen vor Ort installiert. Eine Fotovoltaikanlage (PV-Anlage) mit einer maximalen Leistung von 1,2 MW und über 200.000 Solarzellen auf dem Dach der Green Factory liefert zwei Drittel der benötigten Energie als CO₂-neutralen Strom, der direkt vor Ort genutzt wird.

Überschüssiger Solarstrom wird in das öffentliche Stromnetz eingespeist oder in einer Batterie gespeichert. Die Wärmeerzeugung erfolgt durch eine Kombination aus einem 220-kW_{el}- und 250-kW_{th}-Blockheizkraftwerk (BHKW) sowie einem Holzpelletkessel, die beide mit nachwachsenden Rohstoffen betrieben werden. Zusätzlich stehen ein mit Ökogas betriebener Gaskessel sowie drei Power-to-Heat-Anlagen mit jeweils 200 kW_{el} als Back-up für Redundanzen und Spitzenlasten zur Verfügung.

Die Green Factory

Erfahren Sie mehr über die nahezu **klimaneutrale Green Factory.**

Im Video wird gezeigt, wie durch energieflexiblen Betrieb eine optimierte Nutzung der Energie aus klimafreundlicher Eigenerzeugung erreicht werden konnte.



<https://www.youtube.com/watch?v=2EVEi3w9o9w>

In dem genannten Kontext werden zwei Ziele für die Implementierung von Energieflexibilität verfolgt:

- Maximierung der Nutzungsquote der Energie aus klimafreundlicher Eigenerzeugung
- Vermarktung dieser Energieflexibilitäten

Beide Ziele dienen der technisch-ökonomischen Optimierung des Energieverbrauchs der Green Factory. Deren Systeme in Strom und Wärmenetz sind schematisch in Bild 7 dargestellt.

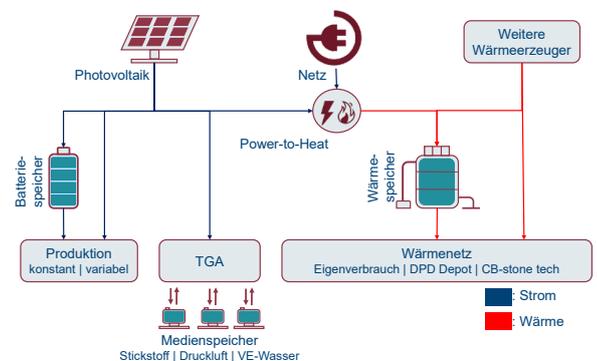


Bild 7. Alois Müller - Flexibilitäten im Strom- und Wärmenetz

Die Potenzialanalyse der Anlagen im Produktionssystem unterscheidet variable und konstante Verbraucher. Intensive, aber variable Stromverbraucher wie die Laserschneidmaschine, die Lackiererei und die

Sandstrahlarbeiten sind primär zeitlich auf die Stromerzeugung der PV-Anlage abgestimmt. Da die konstanten Verbraucher, wie Schweißgeräte sowie Biege- und Abkantmaschinen, im Dauereinsatz betrieben werden, ist hier zur Flexibilisierung die Installation eines elektrischen Stromspeichers erforderlich. Zu diesem Zweck wurde eine 107-kW/200-kWh-Li-Ionen-Batterie installiert. Die Lade- und Entladezyklen der Batterie sind auf die Erzeugung der PV-Anlage und die konstanten Verbraucher abgestimmt.

Die Analyse der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) betrachtet vier verschiedene Systeme: Luftzerlegungsanlagen zur dezentralen Erzeugung von Stickstoff, Anlagen zur Bereitstellung von vollentsalztem Wasser (VE-Wasser), Druckluftkompressoren und Lüftungsanlagen. Für diese Systeme werden jeweils Medienspeicher verwendet und ihr Betrieb ist auf das Erzeugungsprofil der PV-Anlage abgestimmt. Über eine Luftzerlegungsanlage wird Stickstoff erzeugt und komprimiert in Hochdrucktanks gespeichert. Unter Beimischung von Wasserstoff wird dieser bei Bedarf direkt in der Produktion als Schutzgas zum Schweißen verwendet. VE-Wasser wird durch eine Umkehrosmoseanlage erzeugt, die während günstiger Erzeugungszeiten der PV-Anlage betrieben wird. Für eine spätere Verwendung erfolgt die Speicherung in Tanks. Das Druckluftsystem wird verwendet, um den Kompressorbetrieb während kurzer Zeiträume auszugleichen. Die Luftqualität und die thermische Trägheit der Luft in den Produktionshallen werden im Fall von Lüftungsanlagen verwendet, um ihren Betrieb in Bezug auf das Erzeugungsprofil der PV-Anlage zu modulieren.

Bei der Wärmeversorgung speisen die verschiedenen Anlagen ihre Wärme in einen 100.000 Liter fassenden Wärmespeicher ein. Hier kann die Wärme für mehrere Tage gespeichert und bei Bedarf genutzt werden. Aufgrund der redundanten Auslegung der Wärmeerzeugungsanlagen kann zudem eine energieflexible Nutzung der Power-to-Heat-Anlagen, die am Wärmespeicher angebracht sind, erreicht werden. Dabei sind durch die Power-to-Heat-Anlagen Flexibilität des Wärme- und Stromnetzes miteinander gekoppelt.

Zusätzlich wird die klimaneutrale Energie in ein Nahwärmenetz eingespeist und versorgt auch die benachbarten Unternehmen im Industriepark.

Befähigung

Zur Befähigung werden nachfolgend diejenigen identifizierten Flexibilitätten fokussiert, die ein hohes Potenzial aufweisen und mit geringem Aufwand implementiert werden können. Das betrifft den Batteriespeicher, den Wärmespeicher sowie die Power-to-

Heat-Anlagen, da neben einer hohen flexibilisierbaren Leistung bereits technisch die benötigte Steuerung und Regelung der Anlagen und Speicher möglich ist. Zudem ist am Standort ein umfassendes Energiemanagementsystem bereits vorhanden. Hier setzt Alois Müller eine Energiedatenerfassung der Firma Siemens ein, zur Erhöhung der Transparenz bezüglich der Energieverbräuche und ein ausgeklügeltes Lastmanagement zur Steuerung der einzelnen Erzeugungseinheiten sowie der Verbraucher. Das intelligente Lastmanagement realisiert die einzelnen Anforderungen und steuert anhand der Lastenverteilung innerhalb des Werksnetzes die schaltbaren und regelbaren Einheiten.

Da die Prozesse technisch bereits flexibel sind, betrifft die Befähigung hier IT-seitige Aspekte. Diese umfassen für die dargestellten Flexibilitätten zum einen die Erweiterung des Energiemanagementsystems, um zukünftig die Größe der Energieflexibilität abbilden und berücksichtigen zu können. Zum anderen muss ein neues Steuerungs- und Regelungskonzept konzipiert und implementiert werden. Dieses wird neben der Erhöhung der Eigenverbrauchsquote auch Marktimpulse zur Flexibilitätsnutzung berücksichtigen.

Vermarktung

Eine zukünftige Vermarktung der Flexibilitätten ist ohne Beeinträchtigung des laufenden Fabrikbetriebs möglich. Unter Berücksichtigung der Versorgungssicherheit werden dabei die flexiblen Speicher je nach Bedarf entleert oder geladen. Zudem können ausgehend von vermarkteter Flexibilität die Power-to-Heat-Anlagen in der kaskadierten Regelung der Wärmeerzeuger vor der Wärmeerzeugung mittels Gaskessel, Pellet-Ofen und BHKW priorisiert werden. Dabei wird durch gleichzeitiges Laden des Wärmespeichers sowohl die zeitliche als auch leistungsbezogene Flexibilität der Power-to-Heat-Anlagen erhöht. Die Vermarktung der Flexibilitätten auf bestehenden Strommärkten ist über einen Aggregator möglich. Zudem könnte über einen lokalen Flexibilitätsmarkt die Möglichkeit der Vermarktung zum Netzengpassmanagement des Netzbetreibers geschaffen werden.

Benefits

Neben den potenziellen Erträgen aus der Vermarktung können die identifizierten Energieflexibilitätten zur Lastspitzenminimierung und damit Kostenreduktion durch geringere Netzentgelte genutzt werden. Durch eine gezielte Entladung der Speicher und gegebenenfalls das Abschalten der Power-to-Heat-Anlagen lassen sich auftretende Spitzen der Residuallast (Differenz aus Verbrauch und Erzeugung) reduzieren. Die

Maßnahme wird hier bei Überschreiten eines Grenzwerts der Residuallast gestartet.

Darüber hinaus können die Energieflexibilitäten für atypische Netznutzungsmodelle und damit zur weiteren Netzentgeltreduktion eingesetzt werden. Durch abgestimmte Nutzung der Flexibilitäten lassen sich die auftretenden Höchstlasten in Zeiten außerhalb des Hochlastzeitfensters des Netzbetreibers verschieben. Dazu wird der Netzverknüpfungspunkt am Standort überwacht und bei Überschreitung definierter Grenzwerte der Residuallast im Hochlastzeitfenster werden die verschiedenen Formen von Energiespeichern zur effektiven Reduzierung des Stromverbrauchs eingesetzt. Dabei werden die zuvor geladenen Speicher als vorrangige Energiequellen genutzt. An Wochenenden, an denen üblicherweise nicht produziert wird, und in Schwachlastzeiten wird die überschüssige Energieproduktion genutzt, um die erschöpften oder teilweise geladenen Energiespeicher wieder aufzufüllen.

Alle dargestellten ökonomischen Benefits durch Energieflexibilität führen zudem zu ökologischen Vorteilen durch einen erhöhten Energiebezug aus erneuerbaren Quellen. Naheliegender kann dazu die Maximierung der Nutzungsquote von Energie aus klimafreundlicher Eigenerzeugung aufgeführt werden. Final lassen sich durch die atypische Netznutzung zudem Regelungen im Verteilnetz vermeiden.

Die ökologisch-ökonomischen Benefits am Standort Ungerhausen lassen sich durch eine gesamtheitliche Betrachtung im Quartierverbund auch auf Nachbarunternehmen übertragen und maximieren. Diese sind bereits an das Nahwärmenetz angebunden. Eine kontinuierliche Lasterfassung und Analyse ihrer Energieflexibilitäten hat jedoch noch nicht stattgefunden. Hier könnte neben der gemeinsamen Nutzung von Flexibilitäten im Wärmenetz auch ein Anschluss im Stromnetz (unter Vorbehalt benötigter Regulatorik) neue Potenziale und Benefits erschließen.

4.1.2 Energieflexibilisierung in nicht energieintensiven Unternehmen: Landmaschinenherstellung AGCO - Fendt

Kurzcharakterisierung

Das Landtechnikunternehmen AGCO gehört zu den weltweit größten Herstellern und Anbietern von Traktoren und Landmaschinen. Seit 1997 gehört die Marke Fendt zum global agierenden Konzern, der Standorte in Deutschland, Italien, den USA und Brasilien unterhält. Das Werk Asbach-Bäumenheim im Süden Deutschlands ist auf die Herstellung von Fahrer кабинен und Karosserie-Anbauteilen (z. B. Motorhauben) verschiedener landwirtschaftlicher Nutzfahrzeuge hauptsächlich der Marke Fendt spezialisiert. Die Fahrer кабинен und Karosserie-Anbauteile verlassen das Werk voll montiert und werden Just-in-Sequence ins Hauptwerk nach Marktobendorf geliefert, wo sie in den entsprechenden Traktoren verbaut werden. Die knapp 1.200 Beschäftigten arbeiten im 1- bis 3-Schichtbetrieb auf einer Gesamtfläche von ca. 140.000 m². Der Standort ist in die drei Teilbereiche (1) Teilefertigung, (2) Kabinenrohbau und Lackierung sowie (3) Montage aufgeteilt. Der Materialfluss sowie die Prozesse der Teilbereiche sind in Bild 8 dargestellt. Die Produktionsprozesse am Standort folgen den Vorgaben des sogenannten AGCO-Produktionssystems, das nach dem Lean-Prinzip darauf ausgerichtet ist, Verschwendung zu vermeiden. Die Produktionssteuerung erfolgt nach Kundenaufträgen und entsprechend dem Pull-Prinzip zeitlich rückterminiert bis zur Teilefertigung.

Neben Erdgas und elektrischer Energie werden im Werk Asbach-Bäumenheim Flüssiggas, Heizöl und Diesel bezogen. Der gesamte Energiebedarf des Werks betrug im Jahr 2020 38,41 GWh. Mit einem erfassten Anteil von 97 % sind Erdgas (ca. 55 %) und elektrischer Strom (42 %) die dominierenden Energieträger am Standort. Neben dem prozessnahen Einsatz

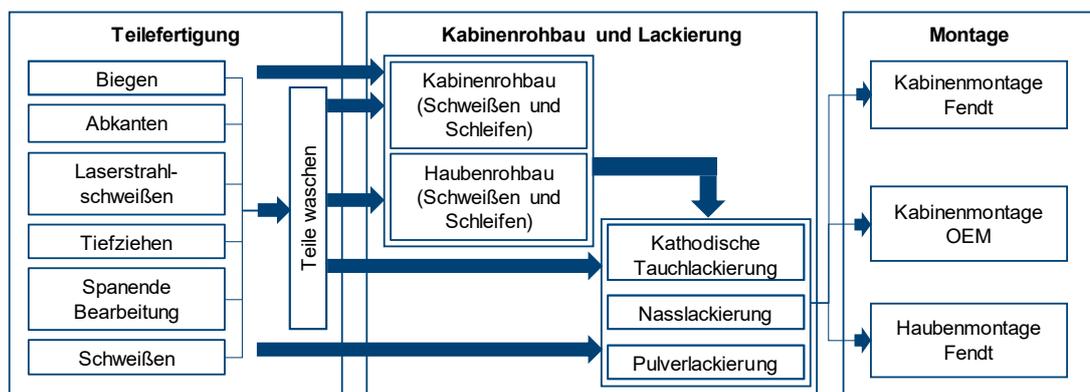


Bild 8. Materialfluss im AGCO-Fendt-Werk Asbach-Bäumenheim

von Erdgas zur Generierung thermischer Energie in Trocknungsprozessen der Lackiererei und der Reinigung von Einzelteilen verfügt das Kabinenwerk über ein internes Wärmenetz, das sowohl in Prozessen als auch für die technische Gebäudeausrüstung (Raumluft und Warmwasser) genutzt wird. Das Wärmekraftwerk besteht aus zwei Brennkesseln mit einer thermischen Gesamtnennleistung von 9.970 kW. Zusätzlich wird dem internen Wärmenetz thermische Energie durch ein Wärmerückgewinnungssystem (Abwärme der thermischen Nachverbrennung der Lackiererei) zugeführt. Während sich die thermischen Prozesslasten auf einige wenige Anlagen konzentrieren, ist der elektrische Energiebedarf auf viele Einzellasten in den Teilbereichen des Werks verteilt.

Identifikation von Energieflexibilität

Im Zuge der Transparenzschaffung wurden Energiebedarfe von Werks- bis auf Anlagenebene aufgenom-

men und analysiert sowie die größten Energiesenken des Werks identifiziert. Ausgehend davon wurden in Abstimmung mit Technologieexperten vier vielversprechende Bereiche bzw. Anlagen ausgemacht, die für die Energieflexibilisierung näher untersucht wurden:

- kathodische Tauchlackierung
- Teilwaschmaschine
- Kabinenrohbau
- Ladeprozess für Sekundärbatterien

Zur Bestimmung des technischen Potenzials wurden zunächst relevante Lastgruppen in den genannten Bereichen erfasst und hinsichtlich der Steuerungsart der Anlage, der Prozessrelevanz und der zeitlichen Entkopplung bewertet. In Tabelle 2 sind die Lastgruppen mit zugehöriger Bewertung nach (VDI 5207 Blatt 2) aufgeführt.

Tabelle 2. Tabelle der identifizierten Lastgruppen nach (VDI 5207 Blatt 2)

Lastgruppe		Beschreibung der Steuerungsart, der Prozessrelevanz und der zeitlichen Entkopplung	Bewertung
Kathodische Tauchlackierung	Beckenheizung	temperaturgesteuert, optimierte Prozesssicherheit durch Wechsel der Energiequelle, Betriebsweise innerhalb oberer und unterer Temperaturgrenzwerte	gute Eignung
	Gleichrichter	Aggregat wird bei Prozessschritt aktiviert, Ausfall der Anlage führt zu sofortigem Stopp der gesamten KTL-Linie, kein Materialspeicher vor oder nach dem KTL-Becken vorhanden	schlechte Eignung
Teilwaschanlage	Beckenheizung	temperaturgesteuert, optimierte Prozesssicherheit durch Wechsel der Energiequelle, Betriebsweise innerhalb oberer und unterer Temperaturgrenzwerte, Teilesupermarkt	gute Eignung
	Heizung Trocknungszone	temperaturgesteuert, optimierte Prozesssicherheit durch Wechsel der Energiequelle, Betriebsweise innerhalb oberer und unterer Temperaturgrenzwerte, Teilesupermarkt	gute Eignung
Kabinenrohbau	Lüftungsanlage 1 und 2	luftqualitätsgesteuert, Schichtlüftungsprinzip: zunächst sind obere Luftschichten betroffen, untere Luftschichten folgen später, Betriebsweise innerhalb oberer und unterer Luftqualitätsgrenzwerte, nachgelagerter Materialpuffer	gute Eignung
	Roboterschweißanlage 1 und 2	Aggregat wird bei Prozessschritt aktiviert, Ausfall der Anlage führt zu sofortigem Stopp des Schweißprozesses, nachgelagerter Materialpuffer	fallspezifische Eignung
Ladeprozess für Sekundärbatterien	Flurförderfahrzeuge	keine technischen Restriktionen, alternative Flurförderfahrzeuge nutzbar, Traktionsbatterie speichert Energie	gute Eignung

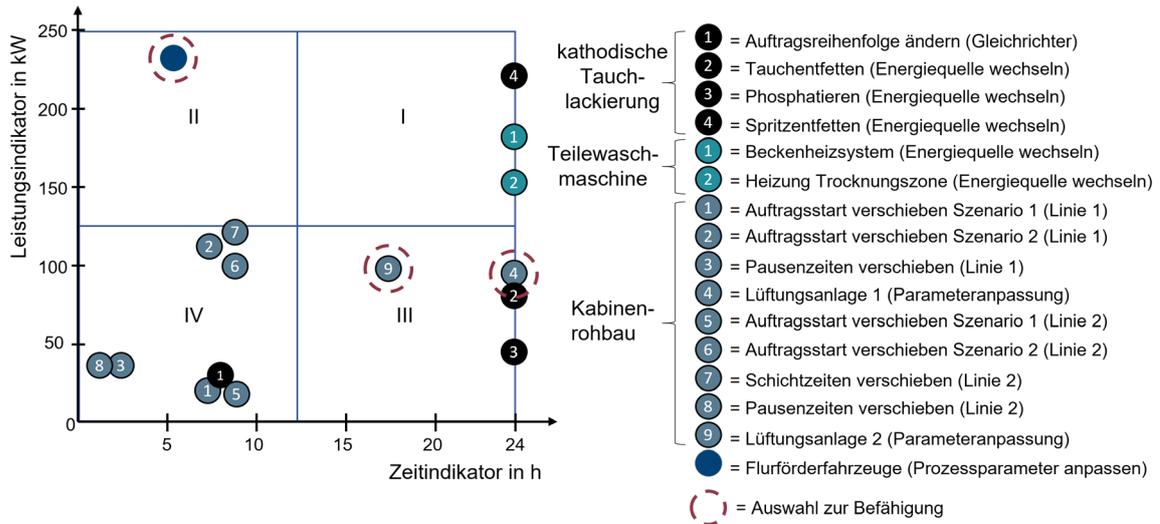


Bild 9. Portfolio-Darstellung der technischen Potenzialabschätzung in den Bereichen kathodischer Tauchlackierung, Teilewaschmaschine, Kabinenrohbau und Lademanagement für Sekundärbatterien bei einem Landmaschinenhersteller

Im Anschluss daran wurden Bedarfsmessungen in allen vier Bereichen durchgeführt. In Kombination mit möglichen Flexibilitätsmaßnahmen konnten die Leistungs- und Zeitindikatoren ermittelt werden. In Bild 9 sind die ermittelten Indikatoren des technischen Potenzials in einem Portfolio-Diagramm dargestellt. Aus der im Werk Asbach-Bäumenheim durchgeführten Potenzialanalyse ergab sich eine Vielzahl möglicher Flexibilisierungsmaßnahmen. Die in den Bereichen I, II und III der Portfolio-Darstellung liegenden Maßnahmen wurden zunächst als am vielversprechendsten bewertet.

Die Umsetzung bivalenter Heizsysteme in der kathodischen Tauchlackierung und bei der Teilewaschmaschine verspricht die höchsten technischen Energieflexibilitätspotenziale. Jedoch müssten zur Realisierung der bivalenten Systeme in beiden Bereichen elektrische Heizsysteme nachgerüstet werden. Aufgrund hoher Investitionen sowie des Aufbaus von Überkapazitäten wurden diese Anwendungsfälle zunächst zurückgestellt. Im Bereich des Kabinenrohbaus zeigen die Maßnahmen 4 und 9 die höchsten technischen Potenziale. Bei beiden Maßnahmen handelt es sich um Parameteranpassungen der Lüftungsanlage in dem Bereich der Schweißerei. Der Ladeprozess der Sekundärbatterien (Flurförderfahrzeuge) besitzt nach den bivalenten Heizsystemen und den Lüftungsanlagen das dritthöchste technische Potenzial für eine Energieflexibilisierung. Für die anschließende Befähigung wurden auf Basis der technischen Potenzialanalyse die Parameteranpassung der Lüftungsanlage im Bereich des Kabinenrohbaus und der Ladeprozess für Sekundärbatterien (Flurförderfahrzeuge) ausgewählt.

Befähigung

Für die Befähigung der Bereiche des Kabinenrohbaus und des Lademanagements bedarf es einer kommunikationstechnischen Anbindung sowie des Nachrüstens von Sensorik und Aktorik. Dabei besteht die Herausforderung darin, die benötigten Informationen aus verteilten Quellen zu bündeln, um sie zur Flexibilitätsvermarktung zu nutzen. Nach erfolgreicher Vermarktung wird das angebotene Potenzial abgerufen, sodass ein bidirektionaler Informationsaustausch nötig ist. Im Folgenden wird das Vorgehen zur Befähigung in den ausgewählten Bereichen beschrieben.

Prozess des Kabinenrohbaus: Lüftungsanlagen 1 und 2

Bei den Lüftungsanlagen handelt es sich um informations- und kommunikationstechnisch ansteuerbare Systeme. Für die Erfassung der Betriebsdaten sind alle notwendigen Sensoren vorhanden und es bestehen Schnittstellen zum übergeordneten Leitsystem, der Gebäudeleittechnik (GLT) und dem Energiemanagement-Tool. Die GLT ist als offene Plattform gestaltet und ermöglicht, über externe Applikationen sowie Service-Schnittstellen Informationen zu lesen und zu schreiben. Ausgehend von der GLT können bestehende Kommunikationswege zwischen der Steuerung der Lüftungsanlage der GLT weiterhin genutzt werden. Zur Erstellung von Energieflexibilitätsdatenmodellen (EFDM) ist ein kurzfristiger Datentransfer zwischen der Lüftungsanlage und dem smarten Konnektor notwendig. Das Zeitintervall des Datentransfers der Produktionsplanung ist vergleichsweise groß (ca. alle 2 bis 3 Tage) und der Aufwand zur Erfassung der Daten gering, sodass MES-Daten manuell erfasst und übermittelt werden. Das Konzept zur kommunika-

tionstechnischen Anbindung der Lüftungsanlagen ist in Bild 10 a) dargestellt.

Ladeprozess für Sekundärbatterien

Bei der Flexibilitätsbefähigung der Flurförderfahrzeuge (Bild 10 b) muss berücksichtigt werden, dass unterschiedliche Ladestationen verwendet werden. Es sind sowohl informations- und kommunikationstechnisch ansteuerbare Ladestationen als auch Stationen ohne kommunikationsfähige Steuerung im Werk vorhanden. Bei der Datengenerierung zur Erstellung eines EFDM haben die intelligenten Ladestationen den Vorteil, dass hier der aktuelle State of Charge (SOC) automatisch ermittelt werden kann. Sowohl bei den einfachen Ladestationen als auch bei den ansteuerbaren Ladestationen ist es notwendig, Informationen bezüglich nächster Betriebszeiten, dem gewünschten SOC und dem aktuellen SOC zu erfassen (z. B. durch eine Benutzerschnittstelle für das Bedienpersonal zur manuellen Eingabe der Nutzerdaten). Zur Erstellung eines EFDM je Flurförderfahrzeug wird jedem Flurförderfahrzeug eine charakteristische Ladekurve zugeordnet. Bei den Ladestationen ohne kommunikationsfähige Steuerung besteht weiterhin Nachrüstbedarf von Steuerungen und Relais zur Informationsverarbeitung nach Abruf der Flexibilitätsmaßnahme (beispielsweise ist eine direkte datentechnische Anbindung der Steuerung an ein Leitsystem möglich).

Vermarktung

Der Energieeinkauf des Landmaschinenherstellers erfolgt zentral für alle deutschen Standorte. Für die Bedarfsermittlung werden dem zentralen Energieeinkauf vom Energiemanagement des jeweiligen Standorts entsprechende Kennzahlen aufbereitet. Durch die Übermittlung des Produktionsplans und der entsprechenden Kennzahlen des Energiemanagements kann der zentrale Einkauf den elektrischen Bedarf des Werks prognostizieren. Elektrische Energie wird nach dem Modell der Stichtagbeschaffung für einen Planungszeitraum von einem Jahr bezogen. In einem Ausschreibungsverfahren handelt der zentrale Energieeinkauf jährlich mit den Energieversorgern einen vertraglich festgelegten Festpreis für den vollständigen Bezug der benötigten Energiemengen aus. Vorteile des Modells sind vor allem die kalkulatorische Planungssicherheit für das Unternehmen und der mit der Energiebeschaffung verbundene geringe Aufwand. Nachteilig ist jedoch, dass beim bisherigen Vorgehen des Energieeinkaufs kein Profit durch Nutzung variabler Strompreise, z. B. an Spot-Märkten, gewonnen werden kann. Die Reduzierung der Energiekosten erfolgt derzeit ausschließlich durch die Effizienzoptimierung von Produktionsprozessen und Anlagen.

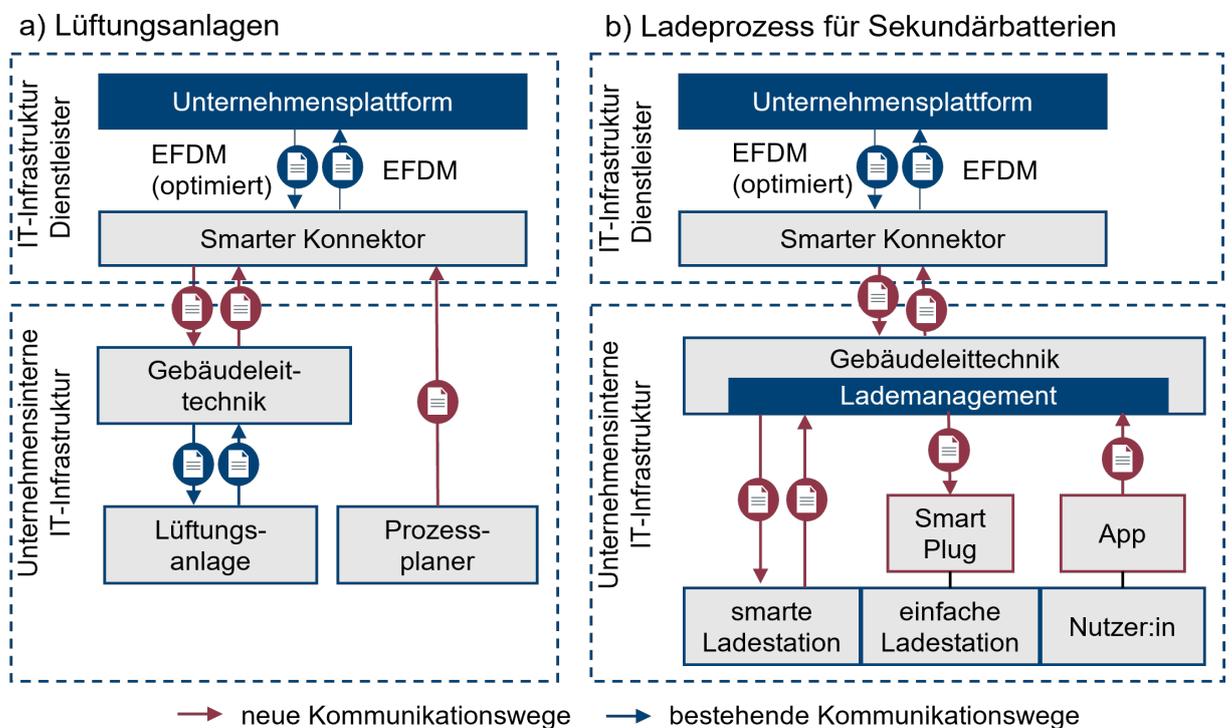


Bild 10. Konzepte zur kommunikationstechnischen Anbindung der a) Lüftungsanlagen im Bereich des Kabinenrohbaus und des b) Ladeprozesses für Sekundärbatterien

Benefits

Bei AGCO am Standort Asbach-Bäumenheim handelt es sich um ein nicht energieintensives Unternehmen. Zur Stabilisierung der Netze ist die Umsetzung von vielen einzelnen Energieflexibilitätsmaßnahmen im Werk Asbach-Bäumenheim notwendig. Dank der Aggregation der Flexibilitätsmaßnahmen kann ein energieangebotsorientierter Anlagenbetrieb einen Mehrwert für Netzbetreiber bieten. Durch den geringen Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten des Unternehmens ist es im Vergleich zu energieintensiven Branchen schwieriger, einen wirtschaftlichen Vorteil durch Energieflexibilisierung zu generieren. Aufgrund der geringen abgenommenen elektrischen Leistung des Werks besteht kein direkter Kontakt zu Verteilnetzbetreibern oder Bilanzkreisverantwortlichen. Eine weitere Herausforderung ergibt sich folglich aus der Identifikation einer Schnittstelle zwischen energie-wirtschaftlichen Stakeholdern und dem Energiemanagement, um einen wirtschaftlichen Vorteil für das Unternehmen zu generieren. Fehlende Anreize bei der Vermarktung von Energieflexibilität können durch regionale Vermarktungsmechanismen oder Aggregatoren behoben werden.

4.1.3 Energieflexible Kälteversorgung in der Lebensmittelindustrie - DMK

Kurzcharakterisierung

Die DMK Group ist eines der größten Molkereiunternehmen Europas. Neben dem Kerngeschäft, der Veredelung von Rohmilch zu diversen Molkereiprodukten und Käse, werden Eis, Babynahrung und Zutaten für die weiterverarbeitende Lebensmittelindustrie

erzeugt. Dazu gehören auch zunehmend Grundstoffe für Nahrungsmittel aus pflanzlichen Rohstoffen.

Im Rahmen des seit 2011 laufenden Nachhaltigkeitsprogramms der DMK Group werden konkrete Ziele in über 20 Aktionsfeldern verfolgt. Ein besonders wichtiges Thema sind hierbei die Energie- und Ressourceneffizienz an den Produktionsstandorten, die im Rahmen des Energie- und Umweltmanagements nach DIN EN ISO 50001 und DIN EN ISO 14001 systematisch verbessert werden.

Die energieintensiven Produktionsprozesse der Milchveredelung haben einen wesentlichen Einfluss auf die Herstellungskosten der Endprodukte. Egal um welches Milcherzeugnis es sich handelt – um gewünschte Produkteigenschaften herzustellen und gleichzeitig das Wachstum unerwünschter Bakterienstämme zu verhindern, müssen bei jedem Verarbeitungsschritt individuell definierte Erhitzungs- und Abkühlprozesse eingehalten werden. Darüber hinaus ist bei Lagerung und Vertrieb die lückenlose Kühlkette einzuhalten. Die Kälteerzeugung allein verbraucht daher meist 20 % bis 30 % des Gesamtstrombedarfs eines Produktionsstandorts der Milchindustrie und steht in diesem Use Case im Fokus.

Bei den im Folgenden betrachteten Kältemaschinen der Molkereiindustrie, die auch für andere Sparten der Lebensmittelindustrie typisch sind, handelt es sich in der Regel um NH₃-Kälteanlagen, wie beispielhaft in Bild 11 zu sehen ist. Die vorherrschende Kältesystemkonfiguration ist in Bild 11 dargestellt und umfasst eine NH₃-Kältemaschine, die Kälteübertragung auf einen Wasser-Glycolkreislauf, ein Eiswasserbecken oder Eisspeicher und die Eiswasserverteilung an verschiedene Kälteverbraucher. Diese Konfiguration zieht einerseits zahlreiche Energieumwandlungs- und Übertragungsvorgänge mit sich, was die Energieeffizienz des Gesamtsystems verringert.



Bild 11. Abbildung einer NH₃-Kältemaschine (links) und eines Salzbeckens (rechts) von DMK (Quelle: DMK)

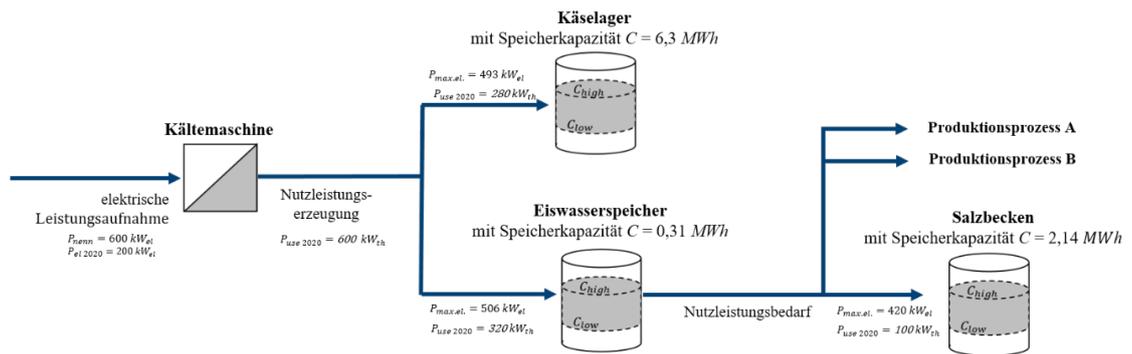


Bild 12. Vereinfachte Darstellung eines typischen Kältesystems in der Molkereindustrie [10]

Es ermöglicht jedoch andererseits eine vorteilhafte Auslegung der Kältemaschine hinsichtlich der Dimensionierung und des Lastverhaltens. Außerdem wird hiermit der im Rahmen der Lebensmittelsicherheit geforderten aseptischen Bauweise (kein Kontakt zwischen Kältemittel und Produkt) Rechnung getragen. Ein weiterer Vorteil ist das klimaneutrale Kältemittel, das zudem aufgrund seines intensiven Geruchs eine schnelle Lokalisierung von Undichtigkeiten ermöglicht. Die Regelung der Kälteanlagen erfolgt meist kaskadiert, mit Gruppen konstant- oder drehzahl geregelter Kompressoren zur Deckung von Grundlasten und Lastspitzen bei unterschiedlichen Anforderungsprofilen.

Kälteübertragung, eignen sich besonders gut für eine energetische Flexibilisierung. Hierfür wird die Speicherkapazität „inhärenter“ – also prozessinterner – Energiespeicher ausgenutzt. Wenn ein Kälteprozess zwischen einer zulässigen oberen und unteren Temperaturgrenze gehalten werden muss, kann die Kälteerzeugung innerhalb der vorgegebenen Temperaturgrenzen hoch- bzw. heruntergeregelt werden, je nachdem, ob das Angebot an erneuerbaren Energien im Netz bzw. der Strompreis hoch oder niedrig ist. Vielversprechende Flexibilisierungspotenziale haben klimatisierte Lager, Eis- bzw. Eiswasserspeicher und, bei der Käseherstellung, die großen Salzwasserbecken, in denen die Aufsatzung der Käselaibe und die Rindenbildung erfolgt (siehe Bild 13). Um das Flexibilitätspotenzial der drei oben genannten Kältespeicher aufwandsarm bewerten zu können, werden diese analog zu VDI 5207 anhand der Kenngrößen Leistungsindikator (LI) und Zeitindikator (ZI) bewertet. Hierbei ist der Leistungsindikator ein Maß für die flexibilsierbare Leistung (ΔP) und der Zeitindikator beschreibt die Dauer (Δt), in der die Anlage für mögliche Flexibilitätsmaßnahmen (in dem Fall Energiespeicherung) zur Verfügung steht.

Identifikation von Energieflexibilität

Das Vorgehen zur Identifizierung der Energieflexibilitätspotenziale erfolgte bei der DMK Group nach VDI 5207. Hierfür wurde zuerst das technische Potenzial vielversprechender Kältespeicher und -verbraucher bewertet. Darauf aufbauend erfolgte die wirtschaftliche Potenzialabschätzung, die im Folgenden genauer beschrieben wird. [10]

Temperaturträge Kälteverbraucher mit großen thermischen Speicherkapazitäten und meist indirekter

Das in Bild 12 dargestellte Kältesystem hat eine elektrische Anschlussleistung von 600 kW, eine gemittelte elektrische Leistungsaufnahme von 200 kW bei

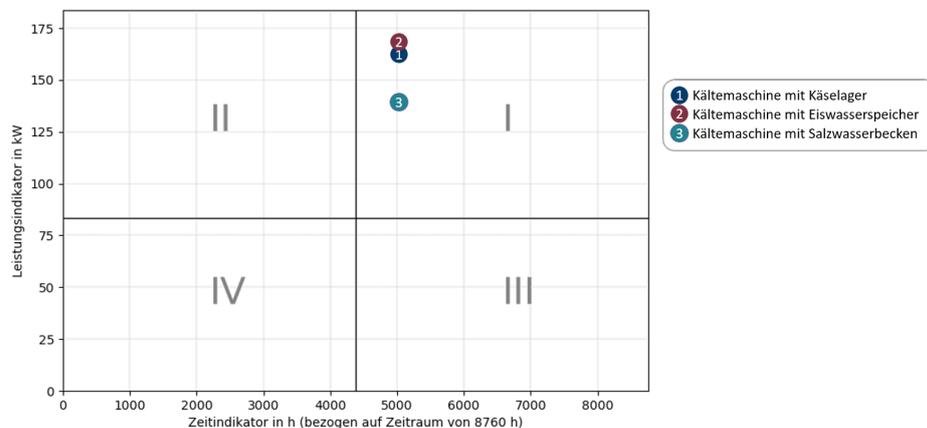


Bild 13. Portfolio-Darstellung der technischen Potenzialabschätzung von Kälteanlagen des Lebensmittelsektors (VDI 5207 Blatt 2)

durchschnittlich 5.000 Jahresbetriebsstunden und eine Leistungszahl von 3. Hieraus ergibt sich ein Zeitindikator von 5.000 Stunden bezogen auf ein Jahr und ein Leistungsindikator, der die maximal abrufbare elektrische Leistung abzüglich des von anderen Prozessen benötigten Grundlastkältebedarfs beschreibt. Die Ergebnisse der technischen Potenzialanalyse sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Um das wirtschaftliche Energieflexibilitätpotenzial zu ermitteln, wurde eine simulative Betriebsoptimierung der Kältemaschinen durchgeführt. Die Optimierung erfolgt unter Annahme einer idealen Kältebedarfsprognose sowie stundenscharfen Day-Ahead-Strompreisen der Jahre 2017 bis 2019. Demnach kann bei einem energieflexiblen Betrieb des Käselagers, mit 4.000 Tonnen eingelagertem Käse, bzw. des Salzwasserbeckens, mit 1.000 m³ Fassungsvermögen, etwa 1 ct/kWh eingespart werden. Die Flexibilisierung des Eiswasserbeckens mit 180 m³ Fassungsvermögen ermöglicht Einsparungen von 0,2 ct/kWh. Für die Berechnung der prozentualen Energiekostenreduktion des Kälteaggregats wurde ein Brutto-Strompreis von 10 ct/kWh angenommen.

Die Potenzialbewertung wurde mit dem E-Flex Scanner des SynErgie Projekts durchgeführt.

Befähigung

Bei Produktionsprozessen mit hohen Anforderungen an Lebensmittelsicherheit und Qualität darf es keine Unsicherheiten bei der Kälteversorgung geben. Daher

ist in der Lebensmittelverarbeitung ein tiefes Verständnis für den zugrundeliegenden Produktionsprozess die Grundvoraussetzung für die Integration einer energieflexiblen Anlagenbetriebsweise. Die potenziellen Zielkonflikte zwischen Produktion, Qualität und Lebensmittelsicherheit müssen im Vorhinein vollständig identifiziert und verstanden sein.

Dies erfordert aus organisatorischer Sicht die frühzeitige Einbindung aller Prozessverantwortlichen bei der Ermittlung, Bewertung und Realisierung von Flexibilisierungspotenzialen.

Der E-Flex Scanner ist ein kostenloses webbasiertes Assistenzsystem zur vereinfachten Identifikation und Bewertung des energetischen Flexibilitätpotenzials in der Produktionsinfrastruktur. Er ermöglicht eine Priorisierung der identifizierten Anlagen sowie eine erste Abschätzung der Wirtschaftlichkeit von Befähigungsmaßnahmen.

Bewerten Sie jetzt das Energieflexibilitätpotenzial Ihrer Nutzenergiespeicher-Wandler-Systeme und bivalenten Anlagen.



<https://synergie-projekt.de/ergebnis/e-flex-scanner>

Tabelle 3. : Übersicht der Ergebnisse der technischen und wirtschaftlichen Potenzialanalyse bei DMK

Energiespeicher	Technisches Potenzial		Wirtschaftliches Potenzial	
	LI in kW	ZI in h/a	Strompreisreduktion in ct/kWh	Prozentuale Reduktion der Brutto-Energiekosten in %
Käselager	91	5.000	1,0	10
Eiswasserspeicher	107	5.000	0,2	2
Salzwasserbecken	33	5.000	1,1	11

Aus technischer Sicht müssen sowohl die Anlagen-, die Mess- und Steuerungstechnik als auch Datenverarbeitungssysteme für die Umsetzung einer optimalen energieflexiblen Anlagenfahrweise geeignet sein. Die systemtechnischen Anforderungen ähneln denen von digitalen Lastmanagementsystemen. Die jeweiligen Systeme müssen bei der Planung überprüft und unter Umständen ertüchtigt werden. Insbesondere müssen für eine kontinuierliche Betriebsoptimierung echtzeitfähige Prognose- und Optimierungsmodelle der Kältesysteme erstellt werden.

Aus wirtschaftlicher Sicht muss der flexible Kälteanlagenbetrieb langfristig erfolgreich sichergestellt sein, was einen kontinuierlichen Prozess darstellt. Der dafür notwendige, unter Umständen ebenso dauerhafte Einsatz von personellen und finanziellen Ressourcen muss einer wirtschaftlichen Abwägung standhalten.

Vermarktung

Die Energieflexibilität der Raumkälteprozesse, also die Klimatisierung der Auslieferungs- und Reifelager sowie der Produktionsräume wird zurzeit bereits an einigen Produktionsstandorten im Lastmanagement zur kurzzeitigen Reduzierung von Spitzenlasten genutzt.

Ziel der laufenden Projekte ist es, den Spotmarkt auf 15-Minutenbasis zu erschließen. So sollen mittels einer Modellierung der Produktions- und Kälteversorgungsprozesse die optimalen Betriebspunkte der Kälteanlagen in Abhängigkeit vom Strombörsenpreis ermittelt werden. Im Falle eines zu großen Stromangebots und folglich niedrigen Beschaffungspreisen an der Strombörse würden die Kälteanlagen innerhalb der zulässigen Prozessparameter ihre Leistung hochfahren und die genannten Lager und Prozesse, die als thermische Kältespeicher dienen, herunterkühlen. Im gegensätzlichen Fall der Unterversorgung und entsprechend hohen Strompreisen würden die Kälteanlagen heruntergefahren werden und die Kälteversorgung wäre für eine gewisse Zeit über die im Lager bzw. Prozess gespeicherte Kältemenge abgedeckt.

Benefits

Die Energiekostensparnis der beschriebenen Vermarktungsstrategie in der Kälteerzeugung ist abhängig von der durchschnittlichen Auslastung der Kälteanlage. Ein intern ermittelter Richtwert, der sich auch mit den oben ermittelten Einsparpotenzialen deckt,

liegt bei etwa 1 ct/kWh. In den kommenden Jahren soll das Potenzial weiterer Kälteversorgungsanlagen bewertet und bei aussichtsreicher Wirtschaftlichkeit erschlossen werden.

4.1.4 Flexible Luftzerlegungsanlagen - Linde

Kurzcharakteristik

Kryogene Luftzerlegungsanlagen (Air Separation Unit – ASU) trennen Luft nach dem Prinzip der Rektifikation in seine Bestandteile Sauerstoff und Stickstoff und, bei Bedarf, Edelgase auf. Die produzierten Gase werden in einer Vielzahl von industriellen Herstellungsprozessen, sowie auch in Forschung und Gesundheitswesen benötigt. Das Unternehmen Linde ist ein weltweit führendes Industriegase- und Engineering-Unternehmen sowie einer der größten und erfahrensten Anlagenbauer und -betreiber von ASUs. Linde bedient eine Vielzahl von Endmärkten, darunter die Chemie-, Petrochemie-, Lebensmittel-, Getränke-, Elektronik- und Metallindustrie, das Gesundheitswesen und den verarbeitenden Sektor. Linde Gase werden in unzähligen Anwendungen eingesetzt: von lebensrettendem Sauerstoff für Krankenhäuser über hochreine und Spezialgase für die Elektronikfertigung bis hin zu Wasserstoff für saubere Brennstoffe und vieles mehr. Mit über 4.000 Referenzen weltweit bietet Linde ein breites Anlagenportfolio von modularisierten und kundenspezifischen Konzepten mit unterschiedlichsten Reinheiten und Produktmengen von bis zu 5.000 t/Tag an. In einer kryogenen ASU wird Luft zunächst verdichtet und mit einer Kombination aus Wärmetauschern und Turbinen auf Temperaturen von ca. -180 °C gekühlt (siehe Bild 14). Die vorgekühlte Luft wird anschließend in einer oder mehreren verschalteten Rektifikationskolonnen in ihre Bestandteile aufgetrennt.

Das ASU-Portfolio von Linde umfasst Anlagen mit rein gasförmigen Produktströmen, kombinierter Gas- und Flüssigproduktion sowie reine Flüssiganlagen. Idealerweise wird versucht, die Flüssigproduktion vor Ort mit der Gasversorgung eines Kunden mittels einer Pipeline zu kombinieren. Ist dies nicht realisierbar, kommen Anlagentypen, die nur flüssige Gasprodukte produzieren, zum Einsatz. In Industrieländern ist der Bedarf an flüssigem Stickstoff typischerweise höher als der Bedarf an flüssigem Sauerstoff.



Bild 14. Hauptschritte bei der kryogenen Luftzerlegung

Vorstellung des FLEXASU®-Konzepts

Mit Hilfe des FLEXASU®-Konzepts entwickelt Linde eine Technologie, die eine Unterstützung für die globale Energiewende sein kann. Dafür sollen Linde-Industrieanlagen flexibilisiert werden. Das untenstehende Video gibt einen Überblick über FLEXASU®.



<https://www.youtube.com/watch?v=Y0DFyd4wFeg>

Flüssiganlagen verflüssigen die komplette Zerlegungsluft, mit Ausnahme von Prozessgas, das für einen Vorbehandlungsschritt der Luft in ASUs benötigt wird. Diese Anlagen sind damit eine Spezialausführung, deren Produkte eine maximale Energiedichte aufweisen und sich deshalb hervorragend zur Lastflexibilisierung eignen.

Identifikation von Energieflexibilität

Die kryogene Luftzerlegung ist ein sehr energieintensiver Prozess, weshalb industrielle ASUs mit ca. 1 % zum industriellen Stromverbrauch in Deutschland beitragen¹. Für die Trennung, Verflüssigung und Kompression von Luftgasen werden Verdichter eingesetzt, die für nahezu den gesamten Energieverbrauch

verantwortlich sind. Die Produktion von flüssigen und gasförmigen Luftzerlegungsprodukten teilt sich wie in Bild 15 dargestellt auf.

Gasförmige Produkte werden entsprechend des Bedarfs der Endabnehmer produziert und über Pipelines transportiert. Die ASUs für diese Anwendung sind konventionell für den kontinuierlichen Betrieb mit möglichst wenig Stillständen optimiert. Solche Anlagen können bis zu drei Jahre ohne Stillstand betrieben werden. Anlagen mit Flüssigproduktion speichern die Flüssigproduktgase zunächst in Tanks, aus denen diese entnommen und zum Kunden transportiert werden.

Der spezielle Anlagencharakter von ASUs liefert ein hohes Flexibilisierungspotenzial, denn der Luftdurchsatz sowie die Verflüssigungsrate einer ASU können bei Schwankungen in der Stromverfügbarkeit und den Kosten variiert werden. Flüssiginventare des Prozesses sowie Flüssigproduktbestände aus Speichertanks können hierbei als indirekter Energiepuffer dienen und ermöglichen ein schnelles Verfahren der Anlage zwischen verschiedenen Lastpunkten. Durch die wesentlich höhere Energiedichte und Speicherbarkeit bietet insbesondere die Flüssiggasproduktion ein hohes Flexibilisierungspotenzial.

In Anlagen für die Gas- und Flüssigproduktion wird allgemein versucht, die Anzahl an Kompressoren zu reduzieren. Für viele Anlagentypen wird nur ein Verdichter eingesetzt, dessen Design die Flexibilität der ASU bestimmt. Bei für maximale Flüssigproduktion optimierten Anlagen werden die Verdichter für die

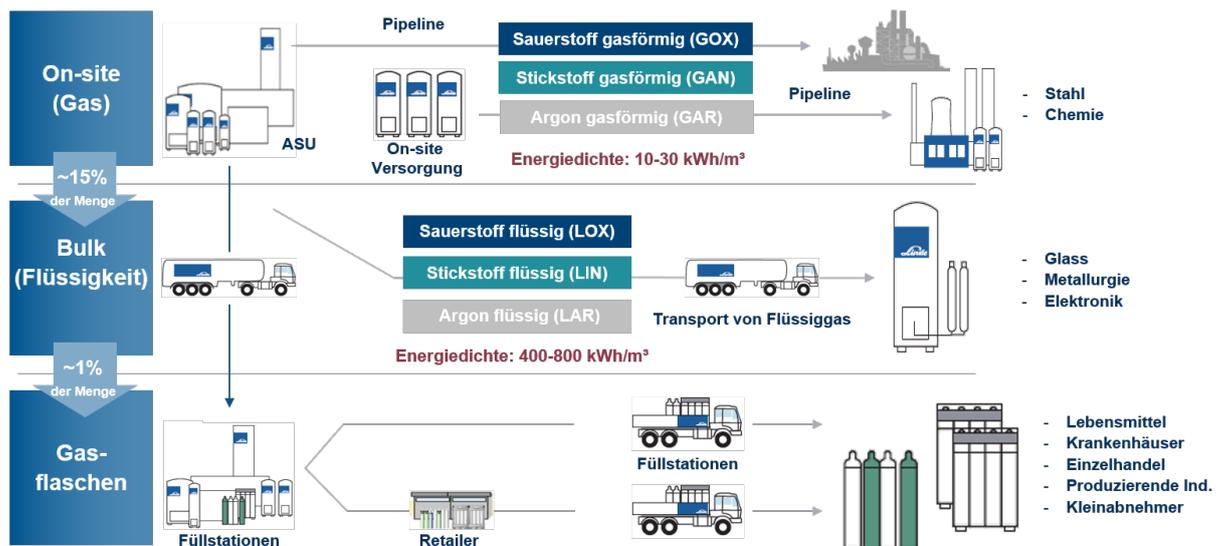


Bild 15. Wertschöpfungskette und Energiedichte

¹ Abschätzung anhand der Marktanteile und eigenem Stromverbrauch: zwischen 900 MW und 1.000 MW.

Trennung und Verflüssigung hingegen getrennt ausgeführt. Solche Anlagen haben entsprechend im Vergleich zu Gasproduktanlagen einen weiteren Freiheitsgrad zur Flexibilisierung, da die Produktverflüssigung entkoppelt von der Luftverdichtung erfolgen kann. Durch die Abschaltung der Verflüssigungsleistung kann der Energieverbrauch um bis zu 80 % reduziert werden.

Eine darüberhinausgehende Maßnahme ist die zeitweise Vollabschaltung einer ASU, bei der auch die Luftkompressoren vollständig heruntergefahren werden. Die Befähigung zu einem solchen „Shut-down“ und anschließendem „Start-up“ erfordert über Teilabschaltungs- und Lastwechsellaspekte hinausgehende Maßnahmen.

Befähigung

Die Befähigung von Luftzerlegungsanlagen für den lastflexiblen Betrieb erfordert eine Vielzahl konstruktiver und operativer Maßnahmen. Stetige Lastwechsel und Abschaltvorgänge gehen mit einer thermischen und mechanischen Belastung aller Prozesskomponenten einher. Dies führt bei konventionellem Prozessdesign zum Bauteilverschleiß und schlimmstenfalls zum Versagen. Eine „Robustifizierung“ der Anlagenkomponenten im Hinblick auf einen flexiblen Betrieb ist deshalb unbedingt erforderlich. Ferner ist das Design aller Anlagenkomponenten hinsichtlich eines breiteren Effizienzbereichs zu optimieren.

Das hohe Maß an energetischer Integration sowie strikte Sicherheits- und Qualitätsbeschränkungen führen zu hohen Anforderungen an die Prozessführungskonzepte für den automatisierten Betrieb flexibler Luftzerlegungsanlagen. Die (Weiter-)Entwicklung solcher Strategien ist Gegenstand derzeitiger Forschung und Entwicklung und wird auch im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie II untersucht. Eine im Rahmen von SynErgie I entwickelte Software zur Betriebsoptimierung wird bereits zur Unterstützung des Betriebs von Flüssigproduktanlagen bei Linde eingesetzt. Die Software minimiert hierbei die Betriebskosten in Abhängigkeit von den Stromkosten und der Produktionsplanung.

Die für eine Flexibilisierung von Luftzerlegungsanlagen erforderlichen Maßnahmen können wie folgt untergliedert werden:

Flexibilisierung des kontinuierlichen Betriebs

Die Flexibilisierung des kontinuierlichen Betriebs erfordert eine Erweiterung des Lastbereichs aller Anlagenkomponenten. Dies umfasst z. B. die Entwicklung flexibler Kompressoren mit einem breiten Betriebs-

bereich. Für die Erhöhung der Lastwechselgeschwindigkeit sind zudem innovative Prozesskontrollkonzepte für den automatisierten flexiblen Betrieb erforderlich. Darunter fällt u. a. die Identifikation geeigneter Lastwechselstrategien mithilfe hochdetaillierter digitaler Zwillinge sowie die Entwicklung und die Anwendung fortgeschrittener Regelungskonzepte, wie einer nicht linearen modellprädiktiven Regelung.

Teilabschaltung

Im Teilabschaltungsmodus wird der Verflüssigungskreislauf einer Flüssiganlage abgeschaltet. Da die Turbinen hier nicht mehr in Betrieb sind, muss der Kältehaushalt der ASU zeitweise gedeckt werden, indem kryogene Flüssigkeit aus dem Flüssigprodukt tank in die Anlage zurückgeführt wird. Durch diese Maßnahme wird die Produktion der Anlage aufrechterhalten. Unter diesem Aspekt sind auch die Flüssigprodukt tanks auszulegen. Zudem müssen die Rektifikationskolonnen durch geeignete Einbauten zur Aufrechterhaltung der Konzentrationsprofile während eines Stillstands befähigt werden.

Beim Ein- und Ausschalten der Verflüssigungsleistung schwankt der Druck zwischen Betriebsdruck und Umgebungsdruck im Stillstand. Die betroffenen Druckbehälter bzw. drucktragenden Bauteile sind für diese Druckwechselbelastung auszulegen. Analog zur Flexibilisierung des kontinuierlichen Betriebs kommen auch hier hochdetaillierte digitale Zwillinge für die Identifikation geeigneter Anfahrstrategien sowie fortgeschrittener Regelungskonzepte zur Anwendung.

Vollabschaltung

Kompressoren und Turbinen müssen den häufigen, wechselnden mechanischen Belastungen standhalten. Bislang sind diese für den kontinuierlichen Betrieb ausgelegt, das heißt geplante Anlagenstillstände nach mehreren Jahren. Eine Vollabschaltung erfordert zudem Design- und Betriebskonzepte, die eine Belastung der Bauteile beim An- und Abfahren vermeiden. Sogenannte „Smart-Restart“-Konzepte werden mithilfe detaillierter Thermofluid-3-D-Modelle und einer dynamischen Prozesssimulation entwickelt und ebenfalls im Projekt SynErgie untersucht. Auch hier ermöglichen Betriebsstrategien basierend auf detaillierten digitalen Zwillingen ein effizientes und sicheres Ab- und Anfahren des Prozesses.

Vermarktung

Die flexibilisierbare Leistung einer klassischen ASU ergibt sich aus dem Betriebsbereich von ca. 80 % bis 100 % nominaler Produktionsleistung, beschränkt durch den Betriebsbereich der Verdichter. Mittels der

dargestellten Flexibilisierungsmaßnahmen wird langfristig ein Lastbereich von ca. 50 % bis 100 % angestrebt. Darüber hinaus bieten Flüssigproduktanlagen durch die Option der Teilabschaltung eine sprunghafte (unsymmetrische) Lastreduktion um ca. 80 % mit Aktivierungszeiten im Größenbereich von Minuten bis Stunden. Vermarktungsoptionen dieser Flexibilisierungsmaßnahmen bestehen in der Teilnahme an den Energiemärkten des jeweiligen Standorts sowie potenziell am Regelenergiemarkt. Die diskutierten Flexibilitätsoptionen wurden in zwei flexiblen Luftzerlegungsanlagen bereits zum Teil umgesetzt:

- Standort Röthenbach: Die Linde-Anlage in Röthenbach ist eine Pilotanlage mit FLEXASU®-Eigenschaften. Die Anlage verfügt über die Option zur Teilabschaltung und kann die Leistungsaufnahme dadurch temporär um ca. 80 % reduzieren. Aufgrund regulatorischer Hemmnisse in Deutschland ist der lastflexible Betrieb derzeit (Stand: Frühjahr 2021) jedoch nicht wirtschaftlich.
- Standort Vejle (Dänemark): Die Linde-Anlage ist eine kommerzielle Anlage mit FLEXASU®-Eigenschaften, die in der Praxis bereits flexibel betrieben wird. Die Anlage verfügt über die Option zur Teilabschaltung, die Leistungsaufnahme kann temporär um ca. 80 % reduziert werden.

Benefits

Die Flexibilisierung von Luftzerlegungsanlagen kann klare energiewirtschaftliche Anreize bieten und wurde an einigen Standorten bereits implementiert. Da die Flexibilisierungskosten weit unter den zu erwartenden Kosten zukünftiger Batterien liegen, sind flexible Luftzerlegungsanlagen ein wirtschaftlich und ökologisch attraktives Konzept. Durch ihren hohen Energiebedarf und die gleichzeitig hohe Energiedichte der Flüssigprodukte (400 kWh/m³ bis 800 kWh/m³, siehe Bild 15), können flexible ASUs hohe Energiepufferkapazitäten bereitstellen.

Anlagen für den Flüssigmarkt werden in der Kapazität für den zukünftigen Bedarf „überdesigned“, das heißt, dass das maximale Produktionsvolumen über der durchschnittlichen Bedarfsmenge liegt. Die Überkapazität ist notwendig, um im lastflexiblen Betrieb angepasst an schwankende Strompreise die Stromkosten zu reduzieren. Eine erhöhte Lastflexibilität reduziert zudem das Risiko der nicht marktgerechten Produktion.

4.1.5 Maschinenbelegungsplanung in der Graphitierung - Showa Denko

Kurzcharakterisierung

Die japanische Showa-Denko-Gruppe ist als Chemieunternehmen in den Bereichen Petrochemie, Chemikalien, Elektronik, Anorganik und Aluminium tätig und ist zudem Marktführer in der Herstellung von Ultra-Hochleistungs-Graphitelektroden, die in Elektrolichtbogenöfen zur Aufschmelzung von Stahlschrott verwendet werden. Am Standort Meitingen fertigt die Showa-Denko-Carbon-Germany GmbH als Teil dieser Gruppe Verbindungselemente, sogenannte Nippel, die zum Zusammenfügen einzelner Elektrodenteile dienen. Hierbei werden die Ausgangsmaterialien (Kokse, Peche und Additive) gemahlen, vermischt und mittels Strangpressen verdichtet und so in die gewünschte Form der Nippelstangen gebracht. Die imprägnierten und gebrannten Nippelstangen werden dann, mittels Widerstandserhitzung, bei Temperaturen von mehr als 2.600 °C graphitisiert. Hierzu werden die Kohlenstoffkörper zwischen zwei Elektroden eingespannt, sodass der induzierte Gleichstrom zu einem Temperaturanstieg innerhalb des Materials führt. Die Graphitierung ist der finale chemische sowie energieintensivste Prozessschritt bei der Herstellung von synthetischem Graphit. Im letzten Schritt werden die Nippelstangen mechanisch bearbeitet, um die einzelnen doppelkonischen Nippel zu erhalten [11]. Aufgrund des hohen Energieverbrauchs des Herstellungsprozesses und insbesondere der Graphitierung ist Showa Denko bereits seit mehreren Jahren in den Bereichen der Energieeffizienz und Flexibilisierung, beispielsweise in Form der atypischen Netznutzung zu Hochlastzeiten, aktiv. Die Firma Showa Denko ist nach DIN EN ISO 50001 zertifiziert und war bereits an mehreren Forschungsprojekten zur Energieflexibilisierung der Industrie beteiligt.

Um während der Graphitierung eine konstante Temperaturverteilung im Material zu gewährleisten, sind spezifische Ofenkurven notwendig. Diese lassen sich in die drei Phasen Plateau 1, eine Aufheizphase und Plateau 2 unterteilen. Nachdem das Material vorgeheizt wurde, wird dieses anschließend langsam weiter erhitzt und zuletzt die Maximalleistung eingebracht, durch die die nötige Zieltemperatur erreicht wird. Im vorliegenden Fall stehen für diesen Prozessschritt acht identische Längsgraphitierungsöfen zur Verfügung. Mittels zweier Transformatoren, die über Schienen zu den Öfen bewegt werden, wird die elektrische Energie umgewandelt und in das Material eingespeist (siehe Bild 16). Aufgrund der begrenzten Leistung des Vortransformators kann dieser lediglich zum Vorheizen genutzt werden, während der Haupttransformator die gesamte Ofenkurve abbilden kann. Durch Nutzung des Vortransformators zum Vorheizen besteht die

Möglichkeit, Prozesse teilweise zu parallelisieren. Sobald der Graphitierungsprozess vollständig durchlaufen ist, kann der Transformator an den nächsten Ofen verschoben werden, während das Material zum Abkühlen im Ofen verbleibt, bevor dieser entleert wird. Bild 17 zeigt die Entnahme des Materials aus den Graphitierungsöfen.

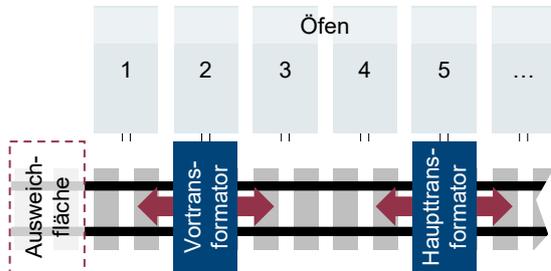


Bild 16. Layout des zugrunde liegenden Produktionssystems des Use Cases



Bild 17. Entnahme des Materials aus den Graphitierungsöfen

Identifikation von Energieflexibilität

Die identifizierten Energieflexibilitätsmaßnahmen lassen sich grundsätzlich in Maßnahmen zur Verschiebung einzelner Aufträge und Maßnahmen zur Anpassung von Ofenkurven unterteilen. Aufgrund der Tatsache, dass das Material einige Zeit zum Abkühlen im Ofen verbleiben muss, bieten sich bei der Produktionsplanung zeitliche Puffer zur Verschiebung einzelner Aufträge. Folgende Flexibilitätsmaßnahmen

konnten identifiziert werden: Änderung der Auftragsreihenfolge, Verschieben von Prozessstarts und (teilweise) Parallelisieren von Aufträgen. Darüber hinaus wurde eine weiterführende Flexibilisierung in Form einer Anpassung der Ofenkurven untersucht. Hierzu wurden in einem ersten Schritt die Anforderungen in den drei Phasen des Produktionsprozesses definiert und darauf aufbauend Grenzwerte abgeleitet, innerhalb derer eine Anpassung der Ofenkurven möglich ist. Auf Basis dieser Anforderungen und Grenzwerte wurden verschiedene Flexibilitätsmaßnahmen für eine flexible Fahrweise ermittelt. Diese umfassen Abschaltungen sowie Leistungsabsenkungen und -erhöhungen (siehe Bild 18).

Befähigung

Um die identifizierten Maßnahmen zur Stromkostenreduktion nutzen zu können, wurde eine energieorientierte Planung der Maschinenbelegung unter Berücksichtigung sämtlicher relevanter organisatorischer und technischer Randbedingungen in einem Optimierungstool umgesetzt.

Zum einen erfolgt dabei die Einplanung der Ofenkurven für einen Planungshorizont von einer Woche auf Basis einer Day-Ahead-Strompreisprognose mit automatisiertem Datenabruf. Zum anderen ist auch eine kurzfristige Feinplanung (innerhalb eines Tages) von Prozessstarts und Prozessunterbrechungen anhand von Intraday-Preisprognosen möglich.

Die Umsetzung der energieorientierten Maschinenbelegungsplanung in einer Optimierung und die praktische Erprobung flexibler Graphitierungskurven stellen die notwendige Basis für eine automatisierte Produktionsplanung und -steuerung der energieflexiblen Graphitierung dar. Um eine bestmögliche Ausnutzung des Flexibilitätspotenzials unter Berücksichtigung aller relevanten Rahmenbedingungen und somit die Nutzung zusätzlicher Vermarktungsmöglichkeiten zu erreichen, ist eine weitere Erhöhung des Automatisierungsgrads notwendig.

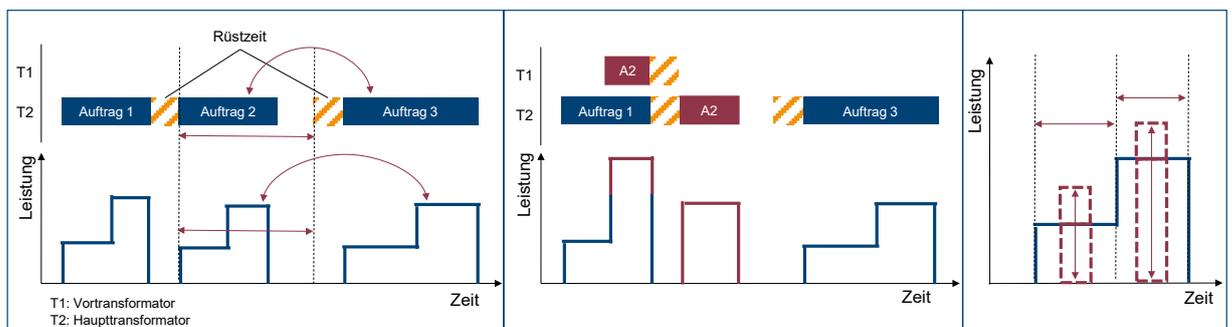


Bild 18. Identifizierte Flexibilitätsmaßnahmen: Verschieben und Tauschen von Aufträgen (links), (teilweise) Parallelisieren von Aufträgen (Mitte) und Anpassen von Ofenkurven durch Zu-/Abschaltungen (rechts)

Vermarktung

Das Unternehmen nutzt die vorhandene Energieflexibilität sowohl zur Vermarktung am Regelleistungsmarkt als auch zur Reduktion von Spitzenlasten in Hochlastzeitfenstern. Außerdem wird anhand von Day-Ahead- Marktpreisprognosen die Maschinenbelegung unter Berücksichtigung der identifizierten Maßnahmen energieorientiert geplant. Die Erweiterung der Flexibilisierung des Graphitierungsprozesses in Form der Anpassung der Ofenkurven ermöglicht darüber hinaus eine kurzfristige Einflussnahme auf die Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Stromverfügbarkeit. Hierdurch können auch kurzfristigere Märkte erschlossen werden, beispielsweise über Steuerung anhand von Intraday-Marktpreisprognosen.

Benefits

Durch die Bereitstellung von Regelleistung, die Reduktion von Spitzenlasten in Hochlastzeitfenstern sowie die Ausnutzung volatiler Strompreise am Spotmarkt können die Stromkosten wesentlich gesenkt werden. Dabei sind jedoch zwingend die Rahmenbedingungen der Netzentgeltsystematik zu berücksichtigen. Nach der derzeitigen Regelung kann die Reduktion von Spitzenlasten höhere Netzentgelte zur Folge haben, da gegebenenfalls Vergünstigungen der Netzentgelte entfallen. Diese Abwägung wird auch zukünftig maßgeblich bestimmen, inwieweit eine Bereitstellung von Flexibilität unter der Maßgabe der Wirtschaftlichkeit sinnvoll ist.

4.1.6 Energetisches Management von elektrischen Fahrzeugflotten - Steinbacher-Consult

Kurzcharakterisierung

Die Steinbacher-Consult GmbH ist ein mittelständischer Ingenieurdienstleister für Infrastrukturentwicklungen, die in den Bereichen Mobilität, Verkehr, Umwelt und Energie die Expertisen aus Energie, Elektrotechnik und Mobilität sektorübergreifend vereint. Das Unternehmen beschäftigt über 300 Mitarbeitende an europaweit neun verschiedenen Standorten. In zahlreichen Projekten mit Kommunen und Unternehmen verfolgt Steinbacher-Consult die Vernetzung der Sektoren mit den Zielen einer intelligenten Steuerung und Verteilung von Energie, der optimalen Auslastung von Infrastruktur und der Maximierung der Eigenenergieversorgung. Als Pionier im Bereich Elektromobilität hat das Unternehmen die Fahrzeugflotte nahezu vollständig elektrifiziert und betreibt einen

firmeneigenen Schnellladepark am Hauptsitz in Neusäß mit einer Gesamtleistung von über 700 kW.

Bei Steinbacher-Consult steht im Hinblick auf die Bereitstellung von Nachfrageflexibilität die intelligente Steuerung von Ladevorgängen elektrischer Fahrzeuge im Vordergrund. Je nach Nutzer- und Fahrzeuggruppe beeinflussen unterschiedliche Charakteristika das (gewünschte) Ladeverhalten und somit das Flexibilitätspotenzial. Zusätzlich ist die verwendete Ladetechnik sowie die Ladeinfrastruktur zur Hebung der Flexibilitätspotenziale der Elektromobilität entscheidend. Die Befähigung von Fahrzeugflotten zur Bereitstellung von Nachfrageflexibilität wird dabei besonders vor dem Hintergrund des energetischen Flottenmanagements in Industrieunternehmen untersucht. Durch die oftmals großen Fuhrparkflotten können dabei signifikante Energieflexibilitäten realisiert werden. Die hierfür entwickelten Lösungen werden anhand der bei Steinbacher-Consult vorhandenen Ladeinfrastruktur und Nutzergruppen getestet.

Identifikation von Energieflexibilität

Wie in Bild 19 gezeigt, können innerhalb eines Industrieunternehmens verschiedene Nutzer- und Fahrzeuggruppen in die Kategorien Fuhrparkflotte, Dienstfahrzeuge, Flurförderfahrzeuge und Transportfahrzeuge unterteilt werden. Die Ladeinfrastruktur eines Unternehmens kann darüber hinaus zusätzlich auch Nutzergruppen aus dem öffentlichen Bereich zur Verfügung gestellt werden. Hierzu zählen die privaten Fahrzeuge der Mitarbeitenden, die Fahrzeuge von Kunden sowie Shuttle-Busse bzw. des öffentliche Personennahverkehrs (ÖPNV). Das Flexibilitätspotenzial der verschiedenen Nutzergruppen steigt durch die vorschreitende Elektrifizierung von Fahrzeugen immer weiter an. Zusätzlich können gezielte Anreizmechanismen zur Hebung der Potenziale beitragen.

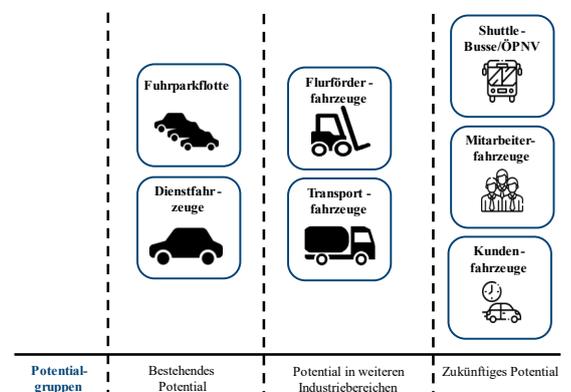


Bild 19. Nutzergruppen der elektrischen Fahrzeuge eingeteilt in Potenzialgruppen

Fuhrparkflotten, Dienst- und Mitarbeiterfahrzeuge sowie die Fahrzeuge von Kunden des Unternehmens

sind zurzeit oft noch in sehr geringem Maße elektrifiziert. Der bereits elektrifizierte Teil der Fahrzeuge lädt meist ungesteuert zu typischen Stoßzeiten wie Arbeitsbeginn und Arbeitsende. Intelligente Bedarfsanalysen können in Zukunft die Terminpläne der Belegschaft berücksichtigen, historische Daten analysieren und durch den gezielten Einsatz von beispielsweise KI-Technologien die Ladevorgänge optimal auf das fluktuierende Energieangebot abstimmen. Zudem wird eine leistungsstarke Ladeinfrastruktur benötigt, um die ausreichende Energieversorgung der steigenden Zahl an Elektrofahrzeugen zu gewährleisten. Hier reichen sogenannte Wallboxen auf Basis von Wechselstrom nicht aus, um das Flexibilitätspotenzial voll auszuschöpfen.

Betrachtet man die Kategorien im produktionstechnischen Umfeld, zeigt sich, dass Flurförderfahrzeuge bereits heute zu weiten Teilen elektrifiziert sind. Deren Ladevorgänge sind stark vom Produktionsplan abhängig und werden aktuell nicht flexibel gesteuert. Ein weiteres Hemmnis der flexiblen Steuerung von Ladevorgängen im produktionstechnischen Umfeld ist die teilweise fehlende Ausstattung mit steuerbarer, intelligenter Ladeinfrastruktur. In Zusammenarbeit mit der Firma AGCO untersucht Steinbacher-Consult das Flexibilitätspotenzial und die Einbindung dieser Nutzergruppe in ein intelligentes Lademanagement (siehe Abschnitt 4.1.2).

Im Transportbereich und ÖPNV ist die Elektrifizierungsrate bislang noch gering. Jedoch zeigen Projekte von Unternehmen wie Amazon oder die ansteigende Elektrifizierung im ÖPNV, dass zukünftig diese Nutzergruppe künftig ein großes Flexibilitätspotenzial darstellt. Bei Steinbacher-Consult selbst wird das energetische Flottenmanagement unter Berücksichtigung der firmeneigenen Fuhrparkfahrzeuge sowie der Dienstfahrzeuge exemplarisch untersucht.

Flexibilisierung der Ladevorgänge

Das Flexibilisierungspotenzial bei Ladevorgängen ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Hinsichtlich der technischen Charakteristika des Fahrzeugs sind die Batteriekapazität, die Ladeleistung, das Batteriemanagementsystem, der Ladezustand der Batterie sowie die Batterie- und Außentemperatur zu nennen. Das gesamte Flexibilitätspotenzial hängt maßgeblich von der Anzahl an elektrischen Fahrzeugen ab, die dem Unternehmen zur Verfügung stehen. Auch die Ladeinfrastruktur ist von Bedeutung. Hier sind die Anzahl an Ladepunkten, die Ladetechnik (Wechsel- oder Gleichstrom), die Ladeleistung und die Ladesteuerung zu berücksichtigen. Daneben spielt auch das Nutzerverhalten eine große Rolle bei der Ausschöpfung des Flexibilitätspotenzials. Hier müssen Nutzergruppen mit verschiedenen Eigenschaften und

Zielen klar unterschieden und individuelle Anreizsysteme betrachtet werden.

Befähigung

IT-Infrastruktur

Um die Flexibilisierung der Ladevorgänge automatisiert zu ermöglichen, bedarf es eines IT-Systems, das die Ladevorgänge auf das Energieangebot abgestimmt steuert und dabei die durch die Nutzer vorgegebenen Rahmenbedingungen berücksichtigt. Die verschiedenen Komponenten der IT-Infrastruktur werden in Bild 20 dargestellt.

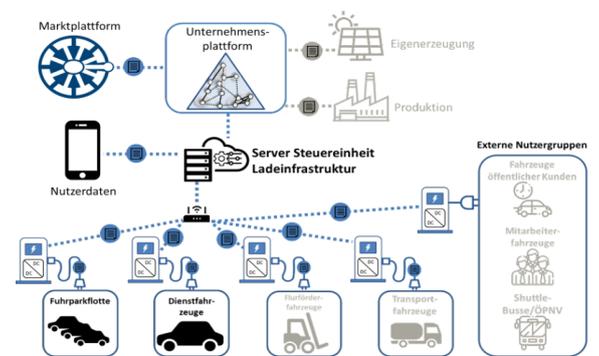


Bild 20. Komponenten der IT-Infrastruktur bei Steinbacher-Consult

Das IT-System sorgt dafür, dass Daten vom Elektrofahrzeug über die Ladesäule an den Server der Steuereinheit der Ladeinfrastruktur übermittelt werden. Darüber hinaus werden relevante Nutzerdaten, wie beispielsweise die zeitliche Verfügbarkeit des Fahrzeugs, über eine Applikation an die Steuereinheit der Ladeinfrastruktur übermittelt. Diese werden ausgewertet und ein Zeitreihenmodell erstellt, das an die eingerichtete Unternehmensplattform übermittelt wird. Darauf aufbauend wird ein Energieflexibilitätsdatenmodell, das zur einheitlichen Beschreibung von Nachfrageflexibilität dient, befüllt.

Ladeinfrastruktur

Neben dem Nutzerverhalten und den technischen Charakteristika der elektrischen Fahrzeuge ist das Flexibilitätspotenzial vor allem von der Ladetechnik abhängig. Das Flexibilitätspotenzial kann nur dann vollständig ausgeschöpft werden, wenn die Ladeinfrastruktur genügend Ladeleistung bereitstellt. Die nachfolgende Tabelle 4 zeigt beispielhaft die Ladezeiten des Opel Corsa-e in Abhängigkeit der Ladetechnik. Wird dieser mit Wechselstrom geladen, ist seine Ladeleistung auf 11 kW begrenzt und er benötigt mindestens 4 h, um voll aufgeladen zu werden. Nur bei entsprechender Schnellladeinfrastruktur kann das

gesamte Flexibilitätspotenzial des Fahrzeugs innerhalb von 30 min realisiert werden. Für die Vermarktung des Flexibilitätspotenzials von Unternehmensflotten ist daher einer geeignete Ladeinfrastruktur nötig.

Tabelle 4. Darstellung der Ladeleistung sowie Ladezeit in Abhängigkeit der Ladetechnik

Ladetechnik	AC/DC	Ladel-eistung in kW	Ladezeit bis 80 % SOC hh:mm
Haushaltssteckdose	AC	1,8 kW	24:56
Leistungsoptimierte Steckdose	AC	3,7 kW	12:05
Wall Box, Industriesteckdose (3-ph)	AC	11 kW	04:03
Schnellladestation (bis 50 kW)	DC	50 kW	00:53
Schnellladestation (ab 100 kW)	DC	100 kW	00:30

Anmerkung: Ladezeiten eines Opel Corsa-e gemäß Spezifikation Deutschland 2020 (Dreiphasiger 11-kW-Onboard-Charger; 100 kW max. Ladeleistung (Quelle: [12])

Energiemanagementsystem

Die Steuereinheit der Ladeinfrastruktur kann in ein bestehendes Energiemanagementsystem des Unternehmens integriert werden. Durch die Vernetzung mit anderen Bereichen, wie beispielsweise der Produktion, können Lastspitzen abgepuffert und die verfügbare Energie zielgerichtet verteilt werden. Zudem können hierdurch Flexibilitäten gebündelt und kurzfristige Leistungsänderungen durch Flexibilitätsmaßnahmen abgefangen werden.

Vermarktung

Aktuell wird die Flexibilität der unternehmenseigenen Flotte von Steinbacher-Consult noch nicht vermarktet. Durch die Aggregation der Flexibilität vieler einzelner Fahrzeuge, auch über Unternehmensgrenzen hinweg, können perspektivisch jedoch größere Flexibilitätsmaßnahmen realisiert werden. Ist die elektrische Unternehmensflotte entsprechend groß oder werden verschiedene Unternehmensflotten virtuell aggregiert, können die Flexibilitäten beispielsweise auch über an die Marktplattform angebundene Aggregatoren auf

klassischen Strommärkten vermarktet werden. Zudem erlaubt die hohe zeitliche Flexibilität und die feingranulare Steuerbarkeit der Ladevorgänge die Vermarktung an hochdynamischen Märkten, wie dem Intraday-Strommarkt oder Regelenergiemarkt, unter Berücksichtigung der jeweiligen Voraussetzungen (z. B. Präqualifikation zur Teilnahme am Regelenergiemarkt). Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der Vermarktung auf einem lokalen Flexibilitätsmarkt, um Netzengpässen entgegenzuwirken. Die Unterbrechung des Ladevorgangs hat keine negativen Auswirkungen auf nachgelagerte Prozesse oder die Produktqualität, wie dies in der Industrie der Fall sein kann.

Benefits

Das energetische Management von elektrischen Fahrzeugflotten ermöglicht eine variable und kurzfristige Bereitstellung von Flexibilität, ohne die Nutzergruppen oder andere (Produktions-)Prozesse negativ zu beeinträchtigen. Ein weiterer Vorteil besteht in der einfachen Übertragbarkeit auf eine Vielzahl an Unternehmen. Durch einen entsprechenden Ausbau der Ladeinfrastruktur können nahezu alle Unternehmen das entwickelte Lademanagementsystem adaptieren. Vor allem nicht energieintensive Unternehmen können so ihre Flexibilitätspotenziale deutlich heben.

Durch die zunehmende Elektrifizierung im Mobilitätsbereich kann über alle Nutzergruppen hinweg mit einem deutlichen Anstieg an elektrischen Fahrzeugen gerechnet werden. Damit nimmt insbesondere das energetische Management von elektrischen Fahrzeugflotten eine wichtigere Rolle für die Bereitstellung von Flexibilität ein.

Wie wird Aluminium hergestellt?

Aufgrund seiner hohen chemischen Stabilität kann Aluminiumoxid nur mit dem schärfsten verfügbaren Reduktionsmittel – Elektronen in Form von elektrischem Strom – zu Aluminium-Metall reduziert werden. Eine karbothermische Reduktion ist dagegen nicht möglich, ebenso wenig die Reduktion mit Wasserstoff.

Im globalen Mittelwert sind für die Aluminium-Elektrolyse etwa 14,3 kWh/kg erforderlich.

4.1.7 Energieflexibilität in der energieintensiven Aluminiumherstellung TRIMET

Kurzcharakterisierung

TRIMET ist ein 1985 gegründetes mittelständisches Familienunternehmen, das mit rund 3.300 Mitarbeitern an acht Produktionsstandorten moderne Leichtmetallprodukte aus Aluminium entwickelt, produziert, recycelt, gießt und vertreibt. Zum Unternehmen gehören drei deutsche und ein französisches Werk, in denen aus Aluminiumoxid mittels Elektrolyse Aluminium erstmalig gewonnen wird. TRIMET Aluminium SE ist mit einer Elektrolyse-Kapazität von 540.000 t pro Jahr der größte deutsche Erzeuger von Primäraluminium. Die drei deutschen Elektrolyse-Standorte verbrauchen etwa 1,5 % der elektrischen Energie in Deutschland. Nachfolgend steht das Werk in Essen im Fokus, wo die installierte Zelltechnologie der drei Elektrolysesysteme mit jeweils 120 Zellen (oder auch Öfen) Ende der 1960er-Jahre entwickelt und 1971 in Betrieb genommen wurde. Aluminium wird global ausschließlich nach dem 1886 patentierten Hall-Héroult-Verfahren der Schmelzflusselektrolyse aus Aluminiumoxid gewonnen. Als Elektrolyt dient dabei eine Salzschnmelze, die durch ihre Schmelztemperatur von etwa 960 °C die Betriebstemperatur vorgibt; diese liegt im Normalfall nur etwa 5 °C bis 10 °C oberhalb dieser Schmelztemperatur.

Das produzierte Aluminium fällt dabei flüssig an (Schmelzpunkt 660 °C). Aufgrund der elektrochemischen Aggressivität von Flüssigaluminium und Elektrolyt müssen die Oberflächen der Elektrolysezellen an den Seitenwänden durch eine Randkruste aus erstarrtem Elektrolyt vor Verschleiß geschützt werden. Dies wird durch den Einbau von Randsteinen mit relativ hoher Wärmeleitfähigkeit und die daraus resultierende Wärmeabgabe durch die Seitenwände erreicht.

Die wichtigsten Aluminiumelektrolyse-Key-Performance-Indicators (KPIs) sind dabei nachfolgend aufgelistet:

- 1 möglichst geringer spezifischer Energieverbrauch ECsp (in kWh/kg)
- 2 bei gleichzeitig hoher Stromausbeute (CE) und
- 3 möglichst lange Standzeit der feuerfesten Auskleidung der kostenintensiven Elektrolysezellen

Der traditionelle Elektrolysebetrieb orientiert sich dabei an den folgenden Leitlinien:

- Betrieb 24/7 mit bestenfalls nur minutenweisen Abschaltungen, Anlagenverfügbarkeit von über 99,7 %
- konstante Spannung und Stromstärke, damit konstanter Wärmeeintrag bzw. -haushalt der Zelle
- möglichst geringe (und statische) Aufwölbung des flüssigen Aluminiums
- gleichmäßiges Strömungsfeld des flüssigen Aluminiums über die gesamte Zelle, niedrige Gradienten, keine Wirbel

Identifikation von Energieflexibilität

Wegen der großen Anschlussleistung könnten Aluminiumelektrolysen einen nennenswerten Beitrag zur Verbrauchsflexibilisierung leisten. Dies bedeutet jedoch eine radikale Abkehr von den Idealbedingungen des traditionellen Elektrolysebetriebs. Ohne flankierende Maßnahmen wäre mit einer drastischen Verschlechterung der KPIs bis hin zur vollständigen Unwirtschaftlichkeit zu rechnen. Um das Flexibilisierungspotenzial der Aluminiumelektrolyse dennoch nutzen zu können, hat TRIMET eine innovative Ausrüstung der bestehenden Elektrolyse-Halle 1 am Standort Essen unternommen, die in dieser Form weltweit einmalig ist.

Ziel ist es, während ‚Hellbrisen‘ die Stromstärke zu erhöhen und damit vorzuproduzieren. Im Gegenzug soll während einer ‚Dunkelflaute‘ die Stromstärke und damit die Produktion gedrosselt werden. Ausgehend von einer Schwankungsbreite von $\pm 25\%$ über maximal 48 Stunden ergibt sich hieraus eine Leistungsspanne bzw. Speicherkapazität von rund ± 1.000 MWh.

Soll nun die elektrische Leistung um bis zu 25 % flexibilisiert werden, ist zusätzlich eine leistungsfähige Prozesssteuerung nötig, die in der Lage ist, u. a. Produktionsmenge, Rohstoffzufuhr und Wärmehaushalt ohne Effizienzeinbuße an die Leistungsmodulation anzupassen.

Befähigung

Eine Änderung der Betriebsstromstärke von $\pm 25\%$ hat einen gravierenden negativen Einfluss vor allem auf die magnetisch bedingte Aufwölbung und Rotation sowie den Wärmehaushalt des flüssigen Aluminiums. Zur Ermöglichung der flexiblen Fahrweise war daher eine zweigleisige technologische Ertüchtigung der Elektrolysezellen erforderlich. Dies beinhaltet

- die Magnetfeldkompensation und
- die thermische Kompensation

Beide Teilmaßnahmen sind inzwischen an allen 120 Zellen der Elektrolyse-Halle 1 implementiert worden. Die im Werk Essen durchgeführten Ertüchtigungsmaßnahmen sollen im Folgenden vorgestellt werden.

TRIMET – Virtuelle Batterie

Im TRIMET-Video zum Kopernikus-Projekt “Virtuelle Batterie” werden die Ertüchtigungsmaßnahmen anhand einer Modellzelle plastisch vorgestellt und erläutert. Ebenso kann man einen Blick in die umgebaute Elektrolysehalle werfen.



<https://youtu.be/fhImQ1Qn6ts>

Magnetfeldkompensation

Die Magnetfeldkompensation (MK) besteht im Wesentlichen aus dem Zubau geeigneter angeordneter Stromschienen im kathodischen Teil aller 120 Elektrolysezellen in Halle 1. In Bild 21 sind die zusätzlichen MK-Stromschienen (in grüner Farbe) in einer vereinfachten Darstellung des Stromschienensystems gezeigt.

Die zusätzlichen MK-Stromschienen verringern die Aufwölbung des flüssigen Aluminiums bei 162 kA von fast 9 cm auf 4,7 cm. Für den MK-Fall bei 185 kA ergibt sich eine Metallaufwölbung von etwas über 6 cm, das heißt, dass die Situation gegenüber dem unkompensierten Zustand trotz höherer Stromstärke weiter vorteilhaft bleibt.



Bild 21. Vereinfachte Darstellung der MK-Stromschienen (grün)

Ohne MK herrscht in den Zellen ein Strömungsfeld mit Geschwindigkeiten von bis zu etwa 16 cm/s. Mit MK beträgt die Strömungsgeschwindigkeit nur noch 5,8 cm/s. Das Metall strömt insgesamt deutlich gleichmäßiger und die Wirbel verschwinden nahezu gänzlich.

Thermische Kompensation

Die Lastmodulation der Aluminiumelektrolyse erfolgt über die Modulation der Systemstromstärke, was aber zu einer Veränderung der Wärmeerzeugung im Elektrolyten als ohmscher Widerstand führt.

Dadurch schmilzt die schützende Randkruste aus erstarrtem Elektrolyten entweder auf oder erstarrt vom Rand ausgehend nach innen. Im ersten Fall geht die notwendige Schutzwirkung verloren, im zweiten Fall ergeben sich Erstarrungsprobleme bis hin zum vollständigen Einfrieren des nur minimal überhitzten Elektrolyten mit Prozessstillstand. Dies geschieht in diesen Fällen aufgrund der elektrischen Reihenschaltung jeweils in der gesamten Linie (120 Öfen).

Daher wurden zur thermischen Kompensation an jeder Elektrolysezelle 22 Wärmetauscher montiert und mit einer steuerbaren Absaugung verbunden. So kann nun im Falle einer positiven Modulation der Luftmengenstrom erhöht werden, um die zusätzliche Wärmeenergie zu kompensieren und ein Aufschmelzen der Randkruste zu verhindern. Bei negativer Modulation kann der Luftmengenstrom verringert oder unterbunden werden, um durch die Isolationswirkung der gestauten Luft ein Fortschreiten der Erstarrung des Elektrolyten zu vermeiden.

Vermarktung

In der Bild 22 sind alle Einsatzmöglichkeiten dargestellt, die von TRIMET bereits bedient werden können. Die Flex-Elektrolyse ist für die Erbringung von Primär-, Sekundär- und Minutenreserve präqualifiziert sowie als sofort abschaltbare Last präqualifiziert und nimmt aktiv an allen Auktionen teil.

Aufgrund von regulatorischen Hemmnissen wird jedoch nur ein kleiner Teil der vollen Flexibilität am Strom- und Ausgleichsenergiemarkt angeboten.

Bei einer erfolgreichen Simulation eines Blackouts mit anschließendem Versorgungswiederaufbau konnte sich die Aluminium-Elektrolyse als präzise steuerbare Großlast für ein kontrolliertes Wiederhochfahren von schwarzstartfähigen Kraftwerken beweisen.

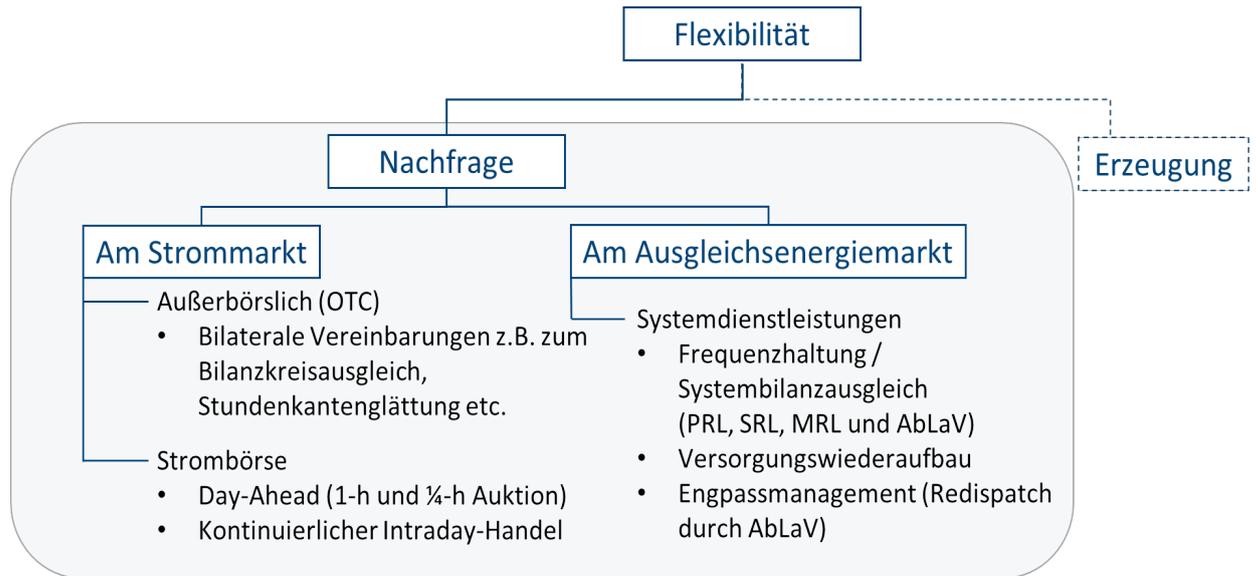


Bild 22. Einsatzmöglichkeiten von Nachfrageflexibilität

Benefits

Die zur Verfügung gestellte lastseitige Flexibilität kann systemdienlich am Strom- und am Regelenergiemarkt eingesetzt werden. Sie wirkt exakt wie ein Pumpspeicher bzw. eine Großbatterie und kann die Volatilität erneuerbarer Einspeiseprofile glätten und damit

- 1 einen wertvollen und kostengünstigen Beitrag zur Sicherung eines stabilen Netzbetriebs leisten und
- 2 die eigenen Energiekosten durch die Möglichkeit, in Hochpreisstunden den Strombedarf zu drosseln und Niedrigpreisphasen für eine vorübergehende Produktionserhöhung zu nutzen, dämpfen.

Allerdings ist auch die Umrüstung einer bestehenden Aluminiumelektrolyse auf einen flexiblen Betrieb mit signifikanten Investitionen verbunden, die mittels angemessener und nachhaltiger Erlöse über einen absehbaren Zeitraum refinanziert werden müssen. Hierzu müssen auch die regulatorischen Rahmenbedingungen (Netzentgeltsystematik) so angepasst werden, dass insbesondere die zur Nutzung der Flexibilität notwendige Leistungsmodulation ohne negativen Einfluss auf die zu entrichtenden Netzentgelte bleibt.

Ohne die Perspektive auf Amortisation der notwendigen Umbauinvestitionen wird es keinen Zubau weiterer, über diesen ‚Showcase‘ hinausgehende Lastflexibilitäten geben können. Das gilt besonders für stromintensive Produktionsanlagen wie die Aluminiumstandorte in Deutschland, die mit Rücksicht auf die aktuell geltende Netzentgeltsystematik einen nur sehr geringen Spielraum haben, ihr typischerweise gleichförmiges Bandlastprofil mit Flexibilitätsbeiträgen zu verlassen, da dies einen hohen Anstieg der Netzkosten bis hin zum Verlust des individuellen Netzentgelts

(gemäß § 19.2.2 StromNEV) zur Folge hätte. Diese in der bestehenden Regulatorik begründete Hürde ist grundsätzlich auch für andere flexibilisierbare (groß)industrielle Produktionsanlagen mit gleichförmigem Grundlastprofil zu erwarten.

4.1.8 Flexibles Magnesium-Druckgussverfahren - Torun Bark Magnesium

Kurzcharakterisierung

Die Firma Torun Bark Magnesium GmbH ist ein mittelständisches Unternehmen, das sich auf die Herstellung von Magnesiumdruckgussteilen für vielfältige Anwendungen konzentriert. Das Produktangebot des Unternehmens umfasst die Bereiche Kraftfahrzeuge, Elektronik, Elektrowerkzeuge, Optik und Luft- und Raumfahrt. Der hochmoderne Maschinenpark mit Warm- und Kaltkammermaschinen von 80 Tonnen bis 1.600 Tonnen Schließkraft erlaubt die Fertigung von Bauteilen zwischen einem Gramm und 5.000 Gramm. Das Druckgussverfahren ist ein Gießverfahren, bei dem die Schmelze unter hohem Druck und hoher Geschwindigkeit in eine metallische Dauerform eingebracht wird. Im Vergleich zu anderen Gießverfahren ist mit dem Druckguss eine hohe Taktfrequenz und damit eine größere Mengenleistung möglich. Die wirtschaftliche Stückzahl hängt von der Art des zu fertigenden Teils ab. Druckgussteile zeichnen sich im Übrigen durch besonders hohe Maßgenauigkeit und eine gute Oberflächenbeschaffenheit aus, was einen geringen Nachbearbeitungsaufwand zur Folge hat. Das Druckgussverfahren gilt als wirtschaftlichstes gießtechnisches Verfahren für Großserien mit Stückmassen von unter 50 kg und als wichtigste Gieß-

technik für Nichteisenmetalle. Die größte Bedeutung kommt hierbei Aluminium, Zink und Magnesium zu [13].

Identifikation von Energieflexibilität

Im Wesentlichen lassen sich die Maßnahmen in drei Kategorien einteilen: Maßnahmen mit Energieträgerwechsel (ETW), Maßnahmen zur Speicherung von Energie und organisatorische Maßnahmen. Bild 23 zeigt die untersuchten Maßnahmen und gibt Aufschluss über die für das Energieflexibilitätspotenzial entscheidenden Kennzahlen: die „Abrufleistung“ und die „Abrufdauer“. Als besonders vielversprechende Maßnahmen konnten jene mit Energieträgerwechsel ausgemacht werden. Großer Vorteil ist, dass diese Maßnahme theoretisch unendlich lange zu relativ niedrigen Kosten durchgeführt werden kann. Dies ist insofern interessant, da bei anderen Flexibilitätsmaßnahmen (FM) nach einer Abrufdauer über 100 Minuten kaum noch Potenziale ausgemacht werden. Anwendung findet ein Wechsel der Energiequelle zum Beispiel bei den Tiegelöfen der Warm- und Kaltkammerdruckgussanlagen (FM1). Gegenwärtig werden diese ausschließlich mit elektrischen Widerstandselementen beheizt. Im Falle einer zusätzlichen Ausstattung mit Gasbrennern, könnte bei Bedarf zwischen den beiden Energieträgern umgeschaltet und somit die Energieflexibilität erhöht werden. Weitere Anwendungsmöglichkeiten finden sich bei den Temperiergeräten (FM 2), der Druckluftversorgung (FM 3) und dem Masselvorwärmegerät (FM 4) (siehe Bild 23).

Die reglementierende Größe bei der Abrufdauer ist die Arbeitswoche. Theoretisch ist die Abrufdauer beim Energieträgerwechsel unendlich, allerdings wird nicht – zumindest nicht dauerhaft – durchgängig produziert.

Durch den Einsatz von Energiespeichern können Erzeugung und Bedarf zeitlich entkoppelt werden. Mögliche Maßnahmen sind die thermische Speicherung an den Heiz-/Kühlgeräten (FM 8) sowie die elektrische Energiespeicherung auf Aggregateebene, Anlagenebene und Werksebene (FM 5, FM 6, FM 7).

Im weiteren Sinn kann durch eine erhöhte Druckluft-erzeugung (FM 9) das Druckniveau im Werksnetz kurzzeitig erhöht und zu einem späteren Zeitpunkt genutzt werden. Eine weitere Energieflexibilitätsmaßnahme stellt die Magnesiumschmelze (FM 10) dar. So kann die Temperatur in Schmelzöfen innerhalb einer gewissen Spannbreite sowohl leicht reduziert als auch angehoben werden, ohne die Qualität der Schmelze bzw. des Produkts zu gefährden.

Zu den organisatorischen Maßnahmen zählen zum Beispiel die Pausenzeitverschiebung in der Nacht (FM 11), die Auftragsverschiebung (FM 12), die Prozessunterbrechung (FM 13) oder die zeitweise Abschaltung von Anlagen und Systemen (FM 14). Während bei der Verschiebung von Pausenzeiten und Aufträgen vor allem die Auftragslage sowie die Verfügbarkeit von Mitarbeitenden und Maschinen eine Rolle spielen, sind bei der Unterbrechung und Abschaltung von Prozessen auch eventuelle Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zu berücksichtigen.

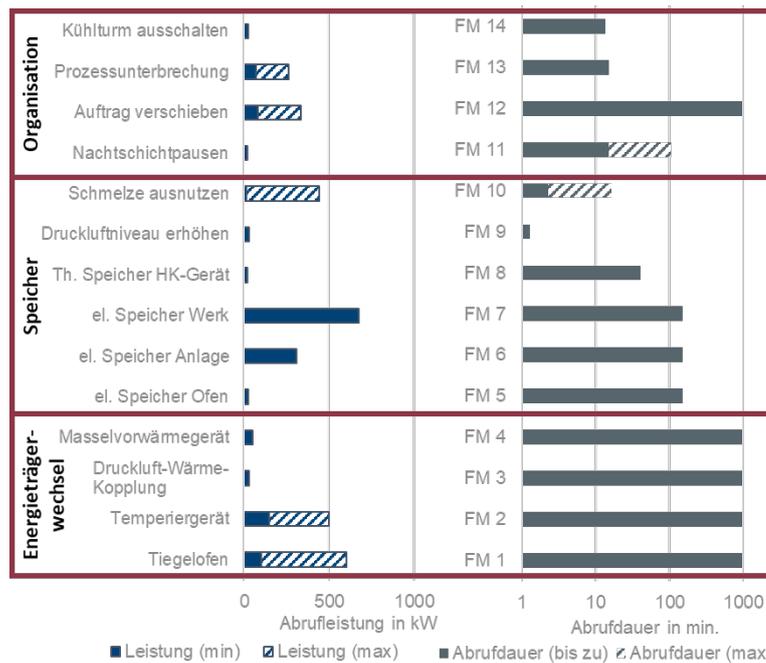


Bild 23. Identifizierte Energieflexibilitätsmaßnahmen mit Abrufleistung und -dauer

Befähigung

Um die identifizierten Energieflexibilitätspotenziale in Zukunft nutzen zu können, müssen zum einen die Anlagen dahingehend befähigt werden, das Potenzial aus technischer Sicht abzurufen. Zum anderen müssen sie darüber hinaus im Stande sein, auf Impulse aus dem Energiemarkt zu reagieren. Im Folgenden wird dargestellt, welche Maßnahmen konkret umgesetzt wurden.

Umbau einer Druckgussanlage mit bivalentem Ofen

Exemplarisch wird die technische Ertüchtigung am Beispiel eines bivalenten Druckgussofens aufgezeigt. Wie eingangs beschrieben, kann ein Tiegelofen sowohl mit fossilen Brennstoffen als auch mit Strom beheizt werden. Aus dem aktuellen Produktionsplan und durch Erstellung von Typtagen konnte der Energiebedarf zum Aufschmelzen von Magnesium-Masseln ermittelt werden. Darauf aufbauend konnte die benötigte Leistung der Widerstandsheizelemente und der Gasbrenner identifiziert werden. Da sich Effizienz und Flexibilität zum Teil beeinflussen, wurde bewusst – dem Efficiency-first-Gedanken folgend – ein hocheffizienter Brenner eingebaut.

Anschließend konnte durch eine thermische Simulation die ideale Anordnung der entsprechenden Komponenten bestimmt werden. Die Anpassung des Tiegels an Störkonturen, die Vermeidung von Hotspots oder die Auswahl des richtigen Isolationsmaterials etc. standen hier u. a. verstärkt im Fokus. Die Integration des Ofens an die vorhandene Infrastruktur erfolgt durch eine Pinch-Analyse. Da der noch heiße Abgasstrom weiter genutzt werden kann, wurde darauf

geachtet, dass beim Umbau der Infrastruktur später eine Wärmerückgewinnung erfolgen kann. Der heiße Abgasstrom kann beispielsweise zur Luftvorwärmung oder Vorwärmung anderer Medien genutzt werden.

Umsetzung einer intelligenten Steuerung

In einem ersten Schritt konnte die Energieflexibilität mithilfe des EFDM generisch modelliert werden. Die Informationen für das EFDM konnten erfasst und in das Modell eingearbeitet werden. Die sowohl physische als auch kommunikationstechnische Anbindung von Sensoren und Maschinen an die Unternehmensplattform konnte evaluiert und priorisiert werden (siehe Bild 24). Dabei wird für die Anbindung und das Auslesen der Sensordaten der smarte Konnektor genutzt. Dieser deckt die Anlagenrepräsentation und die Darstellung des EFDMs ab.

Weiter können die ausgelesenen Daten in der Unternehmensplattform mit anderen Services, wie der evolutionären Optimierung, verbunden werden, um den Flexibilitätsraum in Abhängigkeit von externen Faktoren (organisatorische Restriktionen, Strompreis etc.) einzugrenzen. Das EFDM und die smarten Konnektoren wurden mit historischen Daten von zwei Öfen modelliert. Dabei konnte die Anbindung simuliert werden. Um den Produktionsprozess nicht zu gefährden, werden zusätzliche Widerstandsthermoelemente installiert, die die Temperatur innerhalb des Ofens messen. Die Leistungsaufnahme wird durch Rogowski-Spulen erfasst. Sowohl die Leistungsaufnahme als auch die Temperatur werden durch Mess-Hardware geloggt und sind mittels eindeutiger IP abrufbar. Diese Daten werden als Anlagenrepräsentation und EFDM erfasst und können von anderen Services (PPS, MIBS etc.) konsumiert werden.

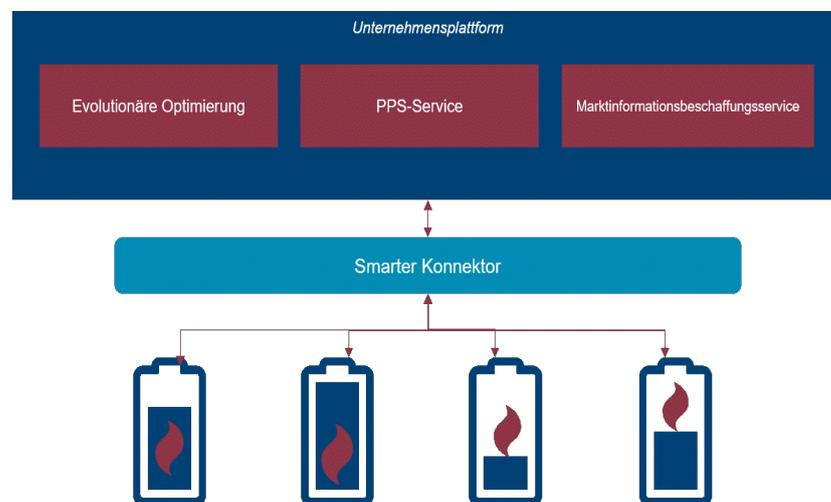


Bild 24. Komponentenarchitektur zur Anbindung an die Unternehmensplattform

Vermarktung

Energieflexibilität wird aktuell bereits genutzt, um die Energiekosten zu senken. Hierzu wurden die monovalenten Öfen an ein übergeordnetes Lastmanagement-System angeschlossen. Bei einer möglichen Überschreitung der definierten Leistungsgrenze wird automatisch kaskadiert die Leistung der einzelnen Öfen entsprechend dem Flexibilitätsbedarf gedrosselt. Zudem ist angedacht, die vorhandene PV-Anlage zur Erhöhung der Eigennutzungsquote einzusetzen. Hierzu soll die Residuallast (Differenz aus Verbrauch und Erzeugung) kontinuierlich berechnet werden. Im Fall einer negativen Residuallast, wird ein Signal den bivalenten Öfen oder die monovalenten Öfen forcieren, den Energieträger zu wechseln oder die Leistung zu erhöhen. Dadurch wird die Eigennutzungsquote erhöht.

Als letztes Vermarktungspotenzial soll die Regelung des bivalenten Ofens an die variablen Börsenstrompreise gekoppelt werden. Hierzu wird der Umschalt- punkt zwischen den beiden Energieträgern ökonomisch bestimmt. Bei Über- oder Unterschreitung dieses Umschaltpunkts soll der Energieträgerwechsel forciert werden. Perspektivisch könnte der bivalente Ofen auch an den Regelenergiemarkt angebunden werden, um so das Stromnetz zu stabilisieren und weitere Erlöse zu erwirtschaften. Diese Vermarktungsmöglichkeit erscheint insbesondere vor dem Hintergrund interessant, dass der bivalente Ofen Energieflexibilität anbieten kann, ohne den Produktionsablauf zu beeinträchtigen.

Benefits

Erhöhung der Qualität und der Versorgungssicherheit

Starke Temperaturschwankungen am Tiegel des Druckgussofens können zum Teil sehr beachtlich sein. Insbesondere das kontrollierte Hochfahren ist besonders wichtig, um Schäden am Tiegel und somit ein Auslaufen der Schmelze zu vermeiden. Bivalente Druckgussöfen können dabei auf die elektrischen Heizelemente zurückgreifen. Somit ist eine bessere Kontrolle gewährleistet und die Schäden können reduziert werden. Darüber hinaus bieten bivalente Druckgussöfen eine höhere Versorgungssicherheit. Bei unerwarteten Stromausfällen können die Beheizung und Temperierung der Schmelze weiterhin gewährleistet werden und ein schneller Anlauf der Produktion nach der Behebung des Problems ist möglich.

Reduzierung der Energiekosten

Die Energieflexibilität der sowohl bivalenten als auch monovalenten Öfen kann die Energiekosten senken. Das Ausnutzen der Schmelze als thermischer Speicher zur Kappung von kostenintensiven Lastspitzen stellt dabei einen Hebel dar, der bereits jetzt genutzt wird. Langfristig gesehen kann der bivalente Ofen auch über einen längeren Zeitraum Energieflexibilität anbieten. Ein attraktives Einsatzszenario stellt dabei das Profitieren von negativen Strompreisen an der Börse dar.

Reduzierung der CO₂-Emission

Der Klimaschutz rückt immer stärker in den Vordergrund der Gesellschaft und ist auch ein Thema, das Industrieunternehmen zunehmend beschäftigt. Die Erhöhung der Eigennutzungsquote stellt dabei ein probates Mittel zur Reduzierung des CO₂-Footprints dar. Hier kann insbesondere bei negativen Residuallasten auf den elektrischen Betrieb gewechselt und somit der CO₂-Ausstoß direkt reduziert werden. Auch die Anpassung der Betriebsstrategie an die Höhe der regenerativen Energien im Netz kann dazu beitragen, die CO₂-Emissionen zu senken und somit einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten.

4.1.9 Energieflexible Halbstoffherstellung in der Papierindustrie - UPM

Kurzcharakterisierung

In dieser Case Study soll der Aufbau einer energieflexiblen Halbstoffherstellung in der Papierindustrie am Standort Schongau der UPM GmbH näher beleuchtet werden. Das Unternehmen gehört zum finnischen UPM Kymmene Oyi Konzern (UPM), der auf unterschiedliche Bereiche der Beschaffungs- und Verarbeitungskette von Bio- und Forstwirtschaft spezialisiert ist. In Deutschland zählt UPM zu den größten hier tätigen ausländischen Papier- und Zellstoffherstellern. Das Produktportfolio umfasst dabei den Bereich der grafischen Papiere, zu dem insbesondere Magazin-, Zeitungs- und Feinpapiere zählen. Insgesamt beschäftigt UPM ca. 7.500 Mitarbeitende an 14 Papierfabrikstandorten in Europa und den USA. Sechs der 14 UPM-Standorte befinden sich dabei in Deutschland (Augsburg, Ettringen, Hürth, Dörpen, Plattling und Schongau).

Als Papierhersteller zählt UPM zu den stromintensivsten Unternehmen in Deutschland [14] und ist somit angehalten, die Chancen der Energiewende im Hinblick auf die Flexibilitätspotenziale der Papierindustrie zu nutzen und damit gleichzeitig Risiken der Energiewende zu adressieren. Am Standort Schongau finden dazu Bestrebungen bei der Identifikation von

Energieflexibilitäten sowie beim Aufbau neuer Energieflexibilitäten in der Papierherstellung statt.

Der Papierherstellungsprozess lässt sich grundsätzlich in zwei Sub-Prozesse unterteilen, zum einen in die Halbstoffproduktion (Altpapier und Faserstoff aus pflanzlichen Stoffen) und zum anderen in die Papierproduktion im engeren Sinn, die den Einsatz einer Papiermaschine umfasst (siehe Bild 25). Eine Papiermaschine erhält dabei über einen Stoffauflauf eine wässrige Suspension aus Halbstoff sowie Binde- und Hilfsmittel, die daraufhin in Trocken- und Walzprozessen zum Endprodukt Papier verarbeitet werden. Am Standort Schongau wurde dabei zunächst intensiv das Flexibilitätspotenzial der relevanten Energieverbraucher im gesamten Papierherstellungsprozess untersucht, wobei die Halbstoffherstellung aufgrund der nachfolgend dargelegten Voranalysen bei den Untersuchungen im Fokus standen. Zudem wurden am Standort Schongau erste energieflexible Befähigungsschritte eingeleitet, die nachfolgend ebenfalls näher beleuchtet werden.

Identifikation der Energieflexibilität

Die Analyse der beiden Sub-Prozesse (siehe oben) ergab zunächst, dass eine Flexibilisierung der Papiermaschine nicht zielführend ist, da die Maschine zum einen keinen Teillastbetrieb ermöglicht und ein temporäres Abschalten – außer in seltenen Ausnahmefällen – nicht in Frage kommt. Zum anderen wäre die Flexibilisierung mit einem hohen Investitionsbedarf verbunden. Darüber hinaus würde die kontinuierlich laufende Papierproduktion in ihrem Fluss unterbrochen werden. Durch die Trägheit der Maschine sind lange Hoch- und Herunterfahrprozesse zu erwarten, weshalb grundsätzlich ein kontinuierlicher Betrieb angestrebt wird. Schließlich können Papierabrisse die Folge der An- und Abfahrprozesse sein. Aus diesen Gründen wurde der Fokus bei den Untersuchungen auf die Halbstoffproduktion gelegt.

Ein wesentlicher Untersuchungsgegenstand des Halbstoffproduktionsprozesses war hierbei die stromintensive Thermo-Mechanical-Pulp-Anlage (TMP-Anlage) sowie die Lagerung des Halbstoffs. Die TMP-Anlage stellt den erforderlichen Halbstoff zunächst durch Zerkleinerung von Hackschnitzeln her. Dabei werden zwei gegenläufig rotierende Mahlplatten eingesetzt. Der Halbstoff wird daraufhin mit Hilfe von Schneckenpressen verdichtet und vor der Weiterverarbeitung in den Papiermaschinen in sogenannten Büttensilos (Speicher für Halbstoff) gelagert (siehe Bild 25). Bei einem parallel dazu laufenden Altpapierverarbeitungsprozess wird ebenfalls Halbstoff hergestellt, dieser wird wiederum in separaten Büttensilos gelagert.

UPM konnte insgesamt zwei wesentliche Flexibilitätspotenziale in ihrer Halbstofffertigung identifizieren:

- Flexibilitätspotenziale in der Halbstoffherstellung aus Frischfaser:

Ein großes Flexibilitätspotenzial bietet die TMP-Anlage. Diese benötigt am Standort Schongau ca. 30 % der gesamten elektrischen Energie. Das bisher geringe Flexibilitätspotenzial der TMP-Anlage kann durch technische Ertüchtigungen deutlich vergrößert werden. Die Produktion des Halbstoffs ist an dieser Stelle besonders gut steuerbar, da kein kontinuierlicher Betrieb, wie etwa bei der Papiermaschine, gewährleistet werden muss. Dies liegt darin begründet, dass der Halbstoff in den Büttensilos als Zwischenprodukt gespeichert wird.

- Flexibilitätspotenziale beim Halbstoff:

Darüber hinaus stellt auch die begrenzte Substitution des TMP- und Altpapierhalbstoff im Endprodukt, durch ihren jeweils unterschiedlichen spezifischen Energiebedarf, eine weitere energetische Flexibilität dar.

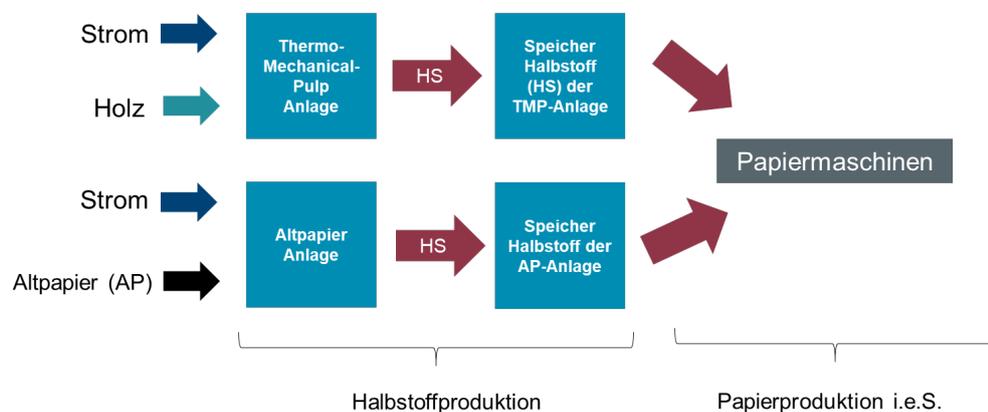


Bild 25. Halbstoff- und Papierherstellungsprozess

Im Fokus stehen im Folgenden die Flexibilitätspotenziale in der Halbstoffherstellung aus Frischfasern, da die erzielbaren Flexibilitätspotenziale bei der Halbstoffsubstitution des TMP- und Altpapierhalbstoff gewissen Einschränkungen unterliegen. TMP- und Altpapierhalbstoff lassen sich lediglich in einem bestimmten Umfang substituieren, wodurch zugleich die Flexibilitätspotenziale begrenzt werden. Zudem ist die Substitution der Halbstoffe sortenabhängig.

Befähigung

Um die Flexibilisierungspotenziale der gut steuerbaren und stromintensiven Halbstoffproduktion im Werk Schongau nutzen zu können, bedarf es einer Befähigung von Anlagen und des Aufbaus einer auf die energieflexible Produktion abgestimmten IT-Architektur mit intelligenter Anlagensteuerung.

Befähigung der TMP-Anlage und der Stoffspeicherung

Wie zuvor dargelegt steht bei der Halbstoffproduktion die stromintensive TMP-Anlage im Fokus. In ihrer jetzigen technischen Auslegung lässt diese aus Anlagensteuerungssicht lediglich ein sehr enges Betriebsband zu. Um den Handlungsspielraum der TMP-Anlage im vollen Umfang zu nutzen, bedarf es daher der Befähigung zu einem flexibleren Anlagenbetrieb, der deutlich präzisere Teillastzustände über ein größeres Band ermöglicht. Hierzu sind Komponenten innerhalb der Anlage umzubauen, sowie die Anschlüsse an die Produktionsinfrastruktur (z. B. Dampf oder Druckluft) für einen flexibleren Betrieb zu befähigen.

Darüber hinaus bietet auch die Erhöhung der Speicherkapazität für den in der TMP-Anlage erzeugten Halbstoff das Potenzial, die Flexibilität der gesamten Anlage zu erhöhen. Hierzu wurde eine intelligente Stoffspeicherungslösung entwickelt, im Rahmen welcher eine innovative, vertikale Schneckenpresse zum Einsatz kommt. Diese neue Schneckenpresse ermöglicht dabei eine variable und erhöhte Verdichtung des Halbstoffs, bevor dieser in den Büttensilos eingelagert wird. Konventionelle Schneckenpressen können diese hohen Verdichtungsverhältnisse bisher nicht leisten. Dadurch lässt sich die Speicherkapazität in den bestehenden Silos erhöhen, ohne weitere Lagerfläche aufbauen zu müssen.

IT-Architektur mit intelligenter Steuerung

Der oben beschriebene energieflexible Betrieb der TMP-Anlage und die Stoffspeicherung bedingt eine

intelligente Anlagensteuerung, worauf auch die IT-Architektur ausgerichtet sein muss. Ziel ist daher die Implementierung einer modularen und wandlungsfähigen Unternehmensplattform, die der Abbildung und Verarbeitung aller flexibilitätsrelevanten Daten im Werk dient. Dies stellt die Grundlage für eine intelligente Steuerung dar. Erst wenn die Unternehmensplattform umgesetzt ist, kann in Hinblick auf die intelligente Steuerung auch der Automatisierungsgrad auf Basis von Signalen der Energiemärkte erhöht werden. Zudem sollen Einzeloptimierungen auf Anlagenebene zukünftig zu einem Gesamtoptimierungssystem gebündelt werden und somit die verfügbaren Flexibilitätspotenziale eines Werkes dynamisch bewertet werden können. Erst diese Gesamtsteuerung ermöglicht es, das volle wirtschaftliche Flexibilitätspotenzial am UPM-Standort Schongau zu nutzen.

Vermarktung

In Deutschland sind die sechs Standorte von UPM (siehe oben „Kurzcharakterisierung“) mit ihren Kraftwerken und energieintensiven Produktionsanlagen bereits seit mehr als acht Jahren auf dem Regelenergiemarkt tätig. Vermarktet werden dabei Produkte der Sekundärregelenergie und der Minutenreserve. Dies wird ermöglicht durch die Energieeigenerzeugung an den jeweiligen Standorten und den energieintensiven Halbstoffherstellungsprozessen. So wird am Standort Schongau der energieintensive TMP-Prozess, der ca. 30 % des Strombedarfs am Standort ausmacht, bereits seit mehreren Jahren am Regelenergiemarkt in Form von Sekundärleistung und Minutenreserve angeboten.

Die zuvor beschriebene Erhöhung der Flexibilität des TMP-Prozesses soll zudem zukünftig dazu genutzt werden, um die Strombezugskosten auf dem Day-Ahead-Markt weiter zu senken und perspektivisch auch eine Anpassung im Intraday-Handel zu ermöglichen und so weiteres Kostensenkungspotenzial zu nutzen.

Benefits

Die Bereitstellungsmöglichkeiten von Regelenergie ließe sich durch weitere Flexibilitätspotenziale noch vergrößern, wodurch grundsätzlich eine noch bessere Vermarktung erreicht werden kann. Der größte Vorteil liegt jedoch in der Nutzung variabler Strompreise, was durch Lastverschiebungen erreicht werden kann. UPM rechnet perspektivisch damit, dass im Jahr 2030 durch die Verschiebung der Stromnachfrage in Zeiten mit geringen Strompreisen eine Einsparung von bis zu 15 % gegenüber einer inflexiblen Fahrweise erzielen zu können.

4.2 Sichtweise eines Flexibilitäts-Projektentwicklers

Seit der Gründung im Jahr 2010 hat sich Entelios mit seinen digitalen kundenspezifischen Lösungen zu dem führenden Anbieter für die Realisierung und Vermarktung vor allem von nachfrageseitiger Flexibilität im Strommarkt entwickelt. Der Fokus liegt dabei auf Lösungen für Unternehmen der energieintensiven Industrie mit der Vision, diesen zu helfen, ihren Verbrauch gemäß der zunehmend erneuerbaren Erzeugung zu flexibilisieren und somit Kosten- bzw. Wettbewerbsvorteile zu realisieren (auch Demand Response genannt). In enger Zusammenarbeit mit den Kunden wird das Potenzial projektspezifisch identifiziert und eine individuelle Lösung erarbeitet. Die teilnehmenden Unternehmen können neben einem Beitrag zur Versorgungssicherheit des Stromnetzes auch attraktive Zusatzerlöse generieren.

Wie funktioniert Demand Response in der Umsetzung?

Tiefere Kenntnis über das Flexibilitätspotenzial der Anlagen und Kenntnis über den Markt sind kritische Erfolgsfaktoren bei Demand Response. Bei Entelios werden auf Basis mehrjähriger Erfahrung für die spezifischen Anforderungen der verschiedenen Industriezweige individuell abgestimmte Konzepte erstellt und die dafür geeigneten Märkte lokalisiert. Die operative Vermarktung wird dann in enger regelmäßiger Abstimmung durchgeführt, um die aktuelle Situation der Anlage zu kennen.

Technische Anbindung der Anlage und Vorbereitung zur Vermarktung

Einer der entscheidenden Bestandteile der Flexibilitätsvermarktung ist die Echtzeitkommunikation zwischen dem jeweiligen Teilnehmer des Entelios Virtuellen Energiesystems (VES) und der Entelios-Leitwarte. Vor Ort wird eine Kommunikationsschnittstelle (die sogenannte E-Box) installiert, über welche Schalteempfehlungen an die Anlagen gesendet werden. Entelios ist vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) als kritische Infrastruktur (KRITIS) zertifiziert, was die hohe Bedeutung der gesicherten Kommunikation nochmals unterstreicht.

Bei Lastflexibilität ist grundsätzlich zwischen zwei Anreizen zu unterscheiden: reine Preissignale sowie systemdienliches Verhalten.

Im Zusammenhang mit Preissignalen kann Flexibilität beispielsweise (proaktiv) durch Intraday-Handel an der Strom-börse EPEX-SPOT vermarktet werden. Bei

den systemdienlichen Produkten wird hingegen Flexibilität bereitgestellt, um das Stromnetz jederzeit ausgeglichen zu halten. Dazu zählt neben der Regelleistung mit verschiedenen Unterprodukten, je nach Reaktionsgeschwindigkeit der Anlagen, auch die Verordnung über Abschaltbare Lasten (AbLaV), eine Art Notinstrument für besonders kritische Netzzustände.

Neben der technischen Anbindung wird im Rahmen eines gemeinsamen Projekts vor allem das individuelle Vermarktungskonzept gemeinsam entwickelt.

Vermarktung (inklusive Aggregation und Besicherung)

Entelios bündelt die Flexibilität mehrerer Anlagen. Durch Aggregation können die unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Anlagen für eine optimale Vermarktung genutzt werden. Wenn beispielsweise eine Anlage kurzfristig ausfällt und ihre eingeplante Leistung nicht weiter erbringen kann, können Anlagen von anderen Teilnehmern des Entelios VES genutzt werden, um den Flexibilitätsbedarf auszugleichen. Ebenso können Anlagen mit unterschiedlichen Charakteristika – also mit anwendungsspezifischen Vor- und Nachteilen – gebündelt und den Flexibilitätsmärkten zur Verfügung gestellt werden. Wenn z. B. ein Asset Flexibilität sehr schnell liefern kann, dafür aber eine begrenzte Lieferkapazität hat (beispielsweise aufgrund von Produktionsanforderungen), kann das Entelios VES komplementäre Anlagen beistellen, um somit einen idealen Flexibilitätserbringer zu erzeugen. Die dadurch verfügbare Flexibilität wird je nach Qualifikation sowohl an den Regelenergie- als auch am eigentlichen Strommarkt (Day-Ahead und Intra-day) vermarktet.

Regelenergiemärkte

Nach seinem 360°-Konzept vermarktet Entelios die Flexibilität ihrer Kunden in allen Regelenergiemärkten (siehe auch die Beschreibung in Abschnitt 3). So lässt sich eine Anlage, die für mehrere Märkte präqualifiziert ist, in dem Markt vermarkten, wo der höchste Erlös zu erwarten ist bzw. wo die Anlage am besten Leistung erbringen kann.

Kurzfristmärkte

Neben den verschiedenen Systemdienstleistungsprodukten entwickelt und bietet Entelios vermehrt individualisierte Produkte zur Flexibilitätsnutzung im Kurzfristhandel an (siehe Abschnitt 3.1.1). Der Kurzfristhandel bietet für Entelios die Möglichkeit, Use Cases und entsprechende Handelsstrategien für Branchen

und Anlagen zu entwickeln, die aktuell noch in keinem der vordefinierten Systemdienstleistungsprodukte genutzt werden können. Verfolgt man diesen Ansatz fokussiert weiter, können künftig weitere Flexibilitätspotenziale realisiert werden, die – obwohl sie hervorragende Flexibilitätseigenschaften aufweisen – heute noch vollkommen brach liegen.

Für das Entelios VES und im Interesse aller seiner Teilnehmer ist eine konsequente Diversifikation einer der erfolgskritischen Faktoren, um regulatorischen Risiken zu entgegnen und zunehmend dynamischen Marktentwicklungen, in Form von Preissignalen, kurzzyklisch zu folgen.

Digitale Trading-Dienstleistungen

Neben der Flexibilitätsvermarktung bietet Entelios weitere digitale Trading-Dienstleistungen inklusive einem entsprechenden Marktzugang zum Kurzfristhandel an. Stellvertretend seien hier ein durchgängig automatisiertes Nachlademanagement für Batteriespeicher im Zuge der PRL-Vermarktung sowie ein digitales Verfahren zur automatisierten Reduktion von Ausgleichsenergie für Industriebetriebe genannt.

5 Herausforderungen bei der Vermarktung von Nachfrageflexibilität und Lösungsvorschläge

Nachdem in Abschnitt 3 die zwei grundlegenden Vermarktungsmöglichkeiten vorgestellt wurden, werden in diesem Abschnitt wesentliche Herausforderungen erläutert, die für Unternehmen in Bezug auf die Flexibilitätsvermarktung bestehen. Derartige Herausforderungen werden regelmäßig im SynErgie-Projekt benannt und es werden wissenschaftlich fundierte Lösungsvorschläge zur Beseitigung der Herausforderungen gezielt an politische Entscheidungsträger herangetragen. Zu jeder Herausforderung wird im Folgenden ein Lösungsvorschlag präsentiert, mithilfe dessen die Politik die jeweilige Herausforderung reduzieren oder ganz abbauen könnte.

Das deutsche Strommarktdesign ist aktuell insbesondere wegen der nationalen und europäischen Bemühungen im Zuge der Dekarbonisierung sowie der Umgestaltung der Energiesysteme von einer großen Dynamik geprägt. Daraus resultiert eine grundsätzliche Herausforderung, die die Bereitstellung von Flexibilität am Strommarkt und am Ausgleichsenergiemarkt gleichermaßen betrifft: Es gibt in Deutschland aktuell **keine langfristige Planungssicherheit für die Refinanzierung von Investitionen** in Maßnahmen zur Flexibilisierung der Nachfrage.

Lösungsvorschlag

Als Investitionsanreiz für die nächsten fünf bis zehn Jahre könnte kurzfristig eine Flexibilitätsprämie – ähnlich der Flexibilitätsprämie, die es bis zum Jahr 2019 für Betreiber von Biogas- und Biomethananlagen gab – Stromverbraucher für die Bereitstellung zusätzlicher flexibler Leistung belohnen. Eine solche Prämie könnte z. B. aus den Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung oder dem Staatshaushalt finanziert werden. Anschließend sollte langfristig sichergestellt werden, dass Unternehmen ihre Investitionen in Flexibilität mittels abgesicherter marktlicher Instrumente refinanzieren können.

5.1 Bereitstellung von Flexibilität am Strommarkt

Unsicherheit bzgl. des Bedarfs und der Kosten von Flexibilität

Die zentrale Voraussetzung für die Vermarktung von Flexibilität durch Unternehmen auf dem EOM ist, dass die Preise auf dem EOM den Flexibilitätsbedarf des Stromsystems adäquat widerspiegeln. Unternehmen bieten ihre Flexibilität nur dann auf dem EOM an, wenn der Marktpreis über den Opportunitätskosten, die sie durch die Bereitstellung von Flexibilität haben, liegt. Derartige Kosten können z. B. aufgrund einer verringerten Produktion von Gütern anfallen. Da sich viele Projekte zur Flexibilisierung von industriellen Prozessen noch im Forschungsstadium befinden, ist es für die Unternehmen äußerst schwierig, ihre Opportunitätskosten korrekt abzuschätzen.

Lösungsvorschlag

Die Möglichkeit zur Erprobung der Flexibilität in sogenannten Modellregionen und Reallaboren unter speziellen Rahmenbedingungen kann eine signifikante Hilfestellung leisten. Die Bedingungen solcher Erprobungen können z. B. durch Experimentierklauseln geregelt werden.

Intransparente und verzerrte Preissignale

Bei der Bereitstellung von Flexibilität am Strommarkt ist es wichtig, dass Marktpreise, die Preisbildung sowie die Preiszusammensetzung für die Unternehmen transparent und nachvollziehbar sind. Insbesondere für wenig energieintensive Unternehmen mit einem Energieliefervertrag (Vollversorgungsvertrag mit einem Lieferanten) ohne selbständige Beschaffung sind die Großhandelspreise auf dem EOM oft nicht zugänglich. Zudem verzerren fixe, staatlich veranlasste Strompreisbestandteile (z. B. Abgaben, Umlagen, Steuern) den „wahren“ Strompreis und damit den „wahren“ Wert einer Flexibilitätsmaßnahme.

Lösungsvorschlag

Strompreise sollten sichtbar und staatlich veranlasste Strompreisbestandteile transparent kommuniziert sowie – wo möglich – reduziert werden. Ebenso besteht in diesem Zusammenhang die Möglichkeit der Dynamisierung solcher Preisbestandteile, z. B. über relative statt über absolute Zuschläge auf die Großhandelspreise auf dem EOM. Neben der Neugestaltung von Abgaben, Umlagen und Steuern stellen zeitvariable Stromtarife, mit deren Hilfe nicht nur die Angebots- und Nachfragesituation am EOM zu jedem Zeitpunkt, sondern auch lokale Netzengpässe kommuniziert werden könnten, eine mögliche Lösung dar [15]. Eine gesetzlich geregelte Verpflichtung der Energielieferanten zur detaillierten und transparenten Darstellung aller Strompreisbestandteile und Weitergabe an ihre Kunden könnte ebenfalls zu einer Verbesserung der Situation beitragen.

Keine unnötigen regulatorischen Eingriffe:

Ab dem 01.07.2020 ist der Ausgleichsenergiepreis nicht nur an die Ausgaben für Regelreserve, sondern auch an den ¼-h-Intraday-Preis geknüpft. Damit soll angereizt werden, dass Knappheitssituationen schon durch den Spotmarkt beseitigt werden und der Bedarf an Regelreserve reduziert wird (50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH und TransnetBW GmbH, 2021). Der Strommarkt selbst hat dadurch auch einen systemdienlichen Charakter. In diesem Kontext ist es geboten, dass keine unnötigen direkten und indirekten regulatorischen Eingriffe das Marktgeschehen verzerren und dadurch Marktanreize dämpfen, die zu den benötigten Investitionen in und zum Einsatz von Flexibilität beitragen würden.

Geringe Preisvolatilität am EOM

Die Marktdaten für die Jahre 2017 bis 2019 zeigen eine eher geringe Volatilität der Strompreise. Setzt sich dieser Trend in den kommenden Jahren fort, könnte dies eine hemmende Wirkung auf Unternehmen haben, die überlegen, ihre Produktionsprozesse zu flexibilisieren, da sich damit verbundene Investitionen unzureichend refinanzieren ließen. Im ersten und zweiten Quartal des Jahres 2020 wurde eine verstärkte Preisvolatilität am kurzfristigen Strommarkt beobachtet. Diese ist allerdings auf die außergewöhnlichen Maßnahmen im Zusammenhang mit der Corona-Pandemie und deren Auswirkungen auf die industrielle

Produktion zurückzuführen und dürfte damit keine langfristige Relevanz für die Flexibilisierung der Nachfrage haben.

Lösungsvorschlag

Eine noch stärkere Verknüpfung des kontinuierlichen Intraday-Markts mit systemstabilisierenden Maßnahmen könnte zu einer besseren Abbildung von Netzknappheit und -überschuss am EOM führen. Zusammen mit einer Anerkennung des marktpreisgetriebenen Stromhandels am kontinuierlichen Intraday-Markt als systemdienlich (unter der Bedingung, dass bestimmte Kriterien erfüllt sind) kann dies zur, für die Refinanzierung von Investitionen in Maßnahmen zur Flexibilisierung der Nachfrage, erforderlichen Preisvolatilität beitragen.

5.2 Bereitstellung von Flexibilität am Ausgleichsenergiemarkt**Anspruchsvoller Präqualifikationsprozess**

Um im deutschen Stromsystem Regelleistung erbringen zu dürfen, müssen alle Anbieter einen Präqualifikationsprozess durchlaufen und bestehen. Dieser aktuell sehr langwierige Prozess ist formal und technisch anspruchsvoll, was viele Unternehmen davon abhalten könnte, die Anstrengungen der Präqualifikation auf sich zu nehmen.

Lösungsvorschlag

Eine wichtige Voraussetzung für die Vermarktung von Flexibilität durch Unternehmen am Regelreservermarkt ist, den Präqualifikationsprozess zu verschlanken bzw. für (kleinere) Unternehmen zu erleichtern, ohne dabei die Qualität und/oder Zuverlässigkeit der anzubietenden Systemdienstleistung zu gefährden.

Unzureichende Produktstruktur

Historisch bedingt richten sich die bestehenden Produkte am Regelleistungsmarkt noch immer stark an konventionelle Energieerzeuger. Zwar wurde die Produktstruktur in den letzten Jahren bereits angepasst, um neuen Anbietern von Flexibilität den Zugang zum Regelreservermarkt zu ermöglichen/erleichtern, aller-

dings besteht hier weiterer Handlungsbedarf – z. B., um neben den volatilen Erneuerbaren auch stärker sehr gut prognostizierbare Anlagen auf der Nachfrageseite für die Bereitstellung von Flexibilität zu mobilisieren.

Lösungsvorschlag

Mit Blick auf die geplante Reduktion des konventionellen Kraftwerkparcs können weitere, technologieoffene Produktneugestaltungen und -ergänzungen die Mobilisierung von Lastflexibilitäten zur Sicherstellung ausreichender Regelreservekapazitäten anreizen.

Bestrafung von Flexibilität durch Netzentgelte

Neben den wirtschaftlichen Faktoren hat auch die derzeitige regulatorische Situation bzgl. der Netzentgelte eine hemmende Wirkung auf den Flexibilitätsinsatz und -ausbau. Aus heutiger Sicht wirkt sich die fehlende Vereinbarkeit von Flexibilitätserbringung mit bestehenden Regelungen, z. B. § 17 II S. 2 StromNEV und § 19 Abs. 2 StromNEV, hemmend auf die Aktivierung und Bereitstellung von Nachfrageflexibilität aus. Unternehmen riskieren bei Erbringung von Systemdienstleistungen (mit in Folge höheren Leistungsspitzen) die Entrichtung höherer Netzentgelte (§ 17 II S. 2 StromNEV). Darüber hinaus gefährdet der flexible Betrieb einer gleichförmigen Last den Anspruch auf ein individuelles Netzentgelt (§ 19 Abs. 2 StromNEV). Die Möglichkeit zur Inanspruchnahme dieses individuell berechneten Netzentgelts ist jedoch existenziell für stromintensive Unternehmen im internationalen Wettbewerb.

Lösungsvorschlag

Damit die Nachfrageflexibilität den Sprung vom Forschungsstadium in den Rollout in die Praxis schafft, benötigt es einer klugen Umgestaltung der regulatorischen und politischen Instrumente. Eine Anpassung der StromNEV mit dem Ziel, dass die Bereitstellung systemdienlicher Flexibilität keinen negativen Einfluss auf die Berechnung von Netzentgelten hat, kann in diesem Fall eine schnelle und unkomplizierte Lösung sein.

Niedrige Vergütung am Regelreserve- **markt**

In den letzten Jahren sank die Vergütung am Regelreservemarkt kontinuierlich. Dies verstärkt die weiter oben bereits angesprochene Herausforderung für Unternehmen, ihre Investitionen in Maßnahmen zur Flexibilisierung der Nachfrage zu refinanzieren. Dabei können insbesondere Preisobergrenzen, wie sie beispielsweise am Regelarbeitsmarkt eingeführt wurden, das Entstehen von Preisspitzen verhindern, die einen Beitrag zur Refinanzierung leisten können.

Lösungsvorschlag

Neben den weiter oben bereits dargestellten Lösungsvorschlägen (kurzfristig Flexibilitätsprämie, langfristig marktliche Instrumente) würde die Anpassung der technischen Preisobergrenze am Regelarbeitsmarkt an den Harmonisierungsvorschlag der ENTSO-E, der als Ergebnis des derzeit laufenden Konsultationsprozesses [16] vorgelegt werden wird, eine langfristige Signalwirkung bzw. einen Anreiz für neue Flexibilitätsanbieter geben, in Maßnahmen zur Flexibilisierung der Nachfrage zu investieren und in den Regelarbeitsmarkt einzusteigen.

6 Ausblick

Der World Energy Outlook 2020 zeigt, dass bedingt durch die COVID-19-Pandemie weltweit die Energienachfrage um 5 % zurückgegangen ist, die CO₂-Emissionen um 7 %. Es wird jedoch erwartet, dass bereits 2023 wieder das Vorkrisenniveau erreicht ist [17]. Entsprechend müssen langfristige Lösungen geschaffen werden, um auch in wirtschaftlichen Wachstumszeiten eine klimaneutrale Industrie zu erreichen. Die Vision eines klimaneutralen Deutschlands sieht deshalb vor, dass bis 2045 der Strom zu 100 % aus erneuerbaren Energien erzeugt wird. Durch die zunehmende Elektrifizierung sowie die Erzeugung von grünem Wasserstoff nimmt jedoch bis dahin auch die Nettostromerzeugung um etwa 50 % zu. Vor diesem Hintergrund ist mit einer erheblichen Zunahme der Volatilität einer überwiegend erneuerbaren Nettostromerzeugung sowie damit verbunden des Bedarfs für Energieflexibilität zu rechnen. Die Agora Energiewende geht in ihrem Szenario davon aus, dass im deutschen Stromsystem dann 7 GW Energieflexibilität auf der Nachfrageseite, 7 GW durch Pumpspeicher und 50 GW durch Batteriespeicher erbracht werden, um diesen Bedarf zu decken. Dies zeigt, welche wichtige Rolle die Industrie zukünftig bei der Stabilisierung des Stromsystems spielen kann und wie wichtig jedes zusätzliche Potenzial ist, das dort identifiziert und gehoben werden kann [5].

Damit die Industrie dieses Flexibilitätspotenzial auch bereitstellt, müssen insbesondere die regulatorischen Rahmenbedingungen stimmen und die richtigen finanziellen Anreize gesetzt werden, was Stand heute nicht der Fall ist. Regulatorischer Änderungsbedarf ergibt sich für die Politik deshalb aus der Anpassung der Stromnetzentgeltverordnung mit dem Ziel, dass die Bereitstellung netz- und systemdienlicher Flexibilität keinen negativen Einfluss auf die Berechnung von Netzentgelten haben darf [15].

Eine zusätzliche Motivation zur Flexibilisierung und der damit einhergehenden Möglichkeit zur Maximierung des Einsatzes erneuerbarer Energie ergibt sich für die Industrie aus der CO₂-Bepreisung. Seit Januar 2021 liegt der Preis pro Tonne CO₂ bei 25 Euro und steigt schrittweise jährlich auf 55 Euro pro Tonne CO₂ im Jahr 2025. Nach dieser Einführungsphase einer CO₂-Bepreisung müssen die Emissionsrechte per Auktion ersteigert werden. Die Gesamtmenge der Zertifikate für den CO₂-Ausstoß wird dabei entsprechend den Klimazielen begrenzt [9].

Aus der Flexibilisierung der Stromnachfrage in der Industrie ergeben sich vielfältige Vorteile für das Stromsystem in Deutschland und damit die Gesellschaft ebenso wie für jedes einzelne Unternehmen, das seinen Stromverbrauch flexibilisiert.

Glossar

Allgemeine Begriffe zum Stromsystem

Engpassmanagement

Übertragungsnetzbetreiber gleichen Ungleichgewichte mithilfe des Engpassmanagements, auch Redispatch genannt, aus

Frequenzhaltung

Die Hauptaufgabe der Übertragungsnetzbetreiber ist es, die Netzfrequenz von 50 Hz aufrechtzuerhalten, indem sie Stromangebot und -nachfrage zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort im Stromsystem im Gleichgewicht halten

Grundlast

Grundbedarf an Strom, der unabhängig von allen Lastschwankungen besteht

Grundlastfähigkeit

Fähigkeit eines Kraftwerks bzw. von Kraftwerkstypen zur dauerhaften Bereitstellung von elektrischer Energie, ohne dass es dabei zu häufigen oder längeren Unterbrechungen kommt

Regelzone

geografisch festgelegter Verbund von Hoch- oder Höchstspannungsnetzen, deren Stabilität vom für sie zuständigen Übertragungsnetzbetreiber organisiert wird

Anmerkung: Deutschland ist derzeit in vier Regelzonen unterteilt.

Spitzenlast

kurzzeitig auftretende, hohe Leistungsnachfrage im Stromnetz

Bereitstellung von Flexibilität

Abrufdauer

Zeitintervall vom voll entwickelten Lastwechsel bis zum Beginn der Deaktivierung der Flexibilitätsmaßnahme

Abrufleistung

Leistungsdifferenz des im Rahmen einer Flexibilitätsmaßnahme ausgelösten Lastwechsels

Betriebspunkt

Wert der betriebsbedingten Freiheitsgrade einer technischen Einheit oder Fabrik

Anmerkung: Im Kontext der Energieflexibilität ist eine Prozessführung vorzunehmen, das heißt eine ständige Anpassung des Betriebspunkts.

Energieflexibilität (energieflexibel)

Fähigkeit eines Produktionssystems, sich schnell und prozesseffizient an Änderungen des Energiemarkts anzupassen

Anmerkung: Die Produktqualität muss dabei unverändert bleiben.

Energieflexibilitätsmaßnahme

bewusste Aktion zur Durchführung eines definierten Zustandswechsels in einem Produktionssystem, die den Zustandswechsel einer Produktionsstation und die damit verbundenen Wechselwirkungen im Produktionssystem umfasst

Energieflexibilitätspotenzial

veränderbare Last unter vorherrschenden Rahmenbedingungen

Lastverschiebung

Erhöhung oder Reduktion der Leistungsaufnahme im Vergleich zum Referenzbetrieb

Anmerkung: Lastnachholbedarf kann notwendig sein.

Referenzbetrieb

vorgesehener Lastgang ohne Nutzung von

Anmerkung: Der Lastgang des Referenzbetriebs kann auch als „Business as usual“ bezeichnet werden.

technisches Potenzial

Möglichkeit, den Leistungsbedarf im Rahmen der technologischen Rahmenbedingungen zu variieren

Anmerkung: Darunter sind anlagenspezifische Bedingungen zu verstehen, die insbesondere Einfluss auf die Leistungsaufnahme und die einzelnen Zeitintervalle haben.

wirtschaftliches Potenzial

Anteil des technischen Potenzials, der wirtschaftlich genutzt werden kann

Anmerkung: Dies ist der Fall, wenn die durch die Flexibilität generierten Erlöse die entsprechenden Kosten (inklusive Investitionen) übersteigen.

Marktliche Bereitstellung von Flexibilität

Baseload

Der feststehende Begriff aus dem Stromhandel beschreibt den gewichteten Durchschnittspreis für 24 h Grundlaststrom, der an der European Energy Exchange (EEX) gebildet wird.

Anmerkung: Ein deutsches Äquivalent des Begriffs existiert nicht.

Day-Ahead-Markt

Der Day-Ahead-Markt erlaubt den Handel von Strom für den darauffolgenden Tag. In der Day-Ahead-Auktion können an jedem Tag eines Jahres bis 12:00 Uhr mittags Gebote für den kommenden Tag abgegeben werden.

Energy-Only-Markt

Der Sammelbegriff des Energy-Only-Markts umfasst diejenigen Energiemärkte, auf denen ausschließlich tatsächlich zu erbringende Stromlieferungen gehandelt werden. Darunter fallen im Wesentlichen der Spotmarkt (Day-Ahead-Markt und Intraday-Markt) sowie der Terminmarkt.

Intraday-Markt

Der Intraday-Markt ermöglicht den kurzfristigen, viertelstundengenauen Stromhandel bis zu 5 min vor physikalischer Lieferung. Dabei unterscheidet man zwischen der Eröffnungsauktion des Intraday-Markts (Intraday-Auktion) sowie dem kontinuierlichen Handel (Intraday-Handel).

Kapazitätsmarkt

Der Sammelbegriff des Kapazitätsmarkts umfasst diejenigen Energiemärkte, auf denen ein Handel über die Vorhaltung einer bestimmten Kapazität für die Erzeugung von Strom zu einem bestimmten Zeitpunkt stattfindet

Peakload

gewichteter werktäglicher Durchschnittspreis für den Zeitraum 08:00 bis 20:00 Uhr, der an der European Energy Exchange (EEX) gebildet wird

Anmerkung: Feststehender Begriff aus dem Stromhandel. Ein deutsches Äquivalent existiert nicht.

Spotmarkt

Auf dem Spotmarkt werden kurzfristig lieferbare Strommengen in der Regel für den nächsten Tag gehandelt. Der Spotmarkt wird im Gegensatz zum Terminmarkt dazu genutzt, das Erzeugungs- oder Absatz-/Verbrauchsportfolio kurzfristig zu optimieren.

Terminmarkt

der Terminmarkt dient der langfristigen finanziellen Absicherung von Strommengen, bzw. Erzeugung und Bedarf. Strom wird in der Regel in standardisierten Monats-, Quartals- und Jahreskontrakten für Grundlast (Base) und Spitzenlast (Peak) gehandelt.

Systemdienliche Bereitstellung von Flexibilität**abschaltbare Lasten**

Stromverbraucher, die durch den Übertragungsnetzbetreiber im Falle von Netzengpässen steuerbar im Sinne einer Lastreduktion sind

Minutenreserveleistung (MRL)

Bereitstellung von kurzfristigen Stromreserven (Regelenergie) zum Ausgleich von Schwankungen im bundesdeutschen Stromnetz nach einer Vorlaufzeit von 15 min

Präqualifikationsprozess

Der Präqualifikationsprozess überprüft die technische Tauglichkeit anhand der Vorgaben der Bundesnetzagentur (Aktivierungszeit, Bereitstellungsdauer etc.).

Primärregelleistung (PRL)

erste zu aktivierende Regelenergieart und die unmittelbare Maßnahme auf eine Abweichung der Netzfrequenz durch die Übertragungsnetzbetreiber

Anmerkung: innerhalb von 30 s verfügbar

Sekundärregelleistung (SRL)

kurzfristig aktivierbare Reserve im Stromnetz der Sicherstellung der Netzfrequenzstabilität, separat von jedem Übertragungsnetzbetreiber ausgeschrieben

Anmerkung: vollständige Aktivierung kann zwischen 30 s und 5 min erfolgen.

Systemdienstleistung

für die Funktionstüchtigkeit notwendiger Dienst in der Elektrizitätsversorgung, den Netzbetreiber neben der Übertragung und Verteilung elektrischer Energie zusätzlich erbringen

Anmerkung 1: Dies sind unter anderem Frequenzhaltung, Spannungshaltung, Versorgungswiederaufbau sowie Betriebsführung und Netzengpassmanagement.

Anmerkung 2: Definition anhand der Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten (AbLaV)

zuschaltbare Lasten

Stromverbraucher, die durch den Übertragungsnetzbetreiber im Falle von Netzengpässen steuerbar im Sinne einer Lasterhöhung sind

Anmerkung: Definition anhand der Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten (AbLaV)

Schrifttum

Technische Regeln

DIN EN ISO 14001:2015-11 Umweltmanagementsysteme; Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung. Berlin: Beuth Verlag

DIN EN ISO 50001:2018-12 Energiemanagementsysteme; Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung. Berlin: Beuth Verlag

VDI 5207 Blatt 1:2020-07 Energieflexible Fabrik; Grundlagen. Berlin: Beuth Verlag

VDI 5207 Blatt 2:2021-01 (Entwurf) Energieflexible Fabrik; Identifikation und technische Bewertung. Berlin: Beuth Verlag

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2019). Energieeffizienz in Zahlen. Entwicklungen und Trends in Deutschland 2019 unter www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=72 (Zuletzt abgerufen am 01.06.2021).
- [2] Palensky, Peter; Dietrich, Dietmar (2011). Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 7 (3). 381–388.
- [3] Rövekamp, Patrick; Schöpf, Michael; Wagon, Felix; Weibelzahl, Martin; Fridgen, Gilbert (2021). Renewable electricity business models in a post feed-in tariff era. *Energy*. 216. 119–228.
- [4] Schott, Paul; Sedlmeir, Johannes; Strobel, Nina; Weber, Thomas; Fridgen, Gilbert; Abele, Eberhard (2019). A Generic Data Model for Describing Flexibility in Power Markets. *Energies*. 12 (10). 1893.
- [5] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020). Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität.
- [6] Seitz, Philipp; Abele, Eberhard; Bank, Lukas; Bauernhansl, Thomas; Colangelo, Eduardo; Fridgen, Gilbert et al. (2019). IT-based Architecture for Power Market Oriented Optimization at Multiple Levels in Production Processes. *Procedia CIRP*. 81. 618–623.
- [7] Sauer, Alexander; Abele, Eberhard; Buhl, Hans U. (2019). Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt - Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie). Fraunhofer Verlag. Stuttgart.
- [8] Körner, Marc-Fabian; Bauer, Dennis; Keller, Robert; Rösch, Martin; Schlereth, Andreas; Simon, Peter et al. (2019). Extending the Automation Pyramid for Industrial Demand Response. *Procedia CIRP*. 81. 998–1003.
- [9] Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz – BEHG).
- [10] Strobel, Nina; Fuhrländer-Völker, Daniel; Weigold, Matthias; Abele, Eberhard (2020). Quantifying the Demand Response Potential of Inherent Energy Storages in Production Systems. *Energies*. 13 (16). 4161.
- [11] Jäger, Hubert; Frohs, Wilhelm; Banek, Manfred; Christ, Martin; Daimer, Johann; Fendt, Franz et al. Carbon, 4. Industrial Carbons. In: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2000).
- [12] OPEL (2021). Einfach elektrisch - Aufladen unter www.opel.de/einfach-elektrisch/aufladen.html (Zuletzt abgerufen am 01.06.2021).
- [13] Spur Günter (2014). *Handbuch der Fertigungstechnik*. 2nd ed. Hanser. München.
- [14] EEG 2021 (2021). Anlage 4 - Einzelnorm unter www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/anlage_4.html (Zuletzt abgerufen am 16.05.2021).
- [15] Das Kopernikus-Projekt SynErgie (2020). Positionspapier zu regulatorischen Änderungen unter synergieprojekt.de/wp-content/uploads/2020/09/SynErgie-Positionspapier-Regulatorische-Rahmenbedingungen.pdf (Zuletzt abgerufen am 16.05.2021).
- [16] ENTSO-E (2021). First amendment of Methodology for pricing balancing energy and cross-zonal capacity used for the exchange of balancing energy or operating the imbalance netting process [Pricing Methodology Amendment Proposal] unter consultations.entsoe.eu/markets/proposal-for-amendment-of-pricing-methodology/supporting_documents/210602_Pricing%20Methodology%20Amendment%20Proposal.pdf (Zuletzt abgerufen am 30.06.2021).
- [17] International Energy Agency (2021). *World Energy Outlook 2020*.

Der VDI

Sprecher, Gestalter, Netzwerker

Die Faszination für Technik treibt uns voran: Seit mehr als 160 Jahren gibt der VDI Verein Deutscher Ingenieure wichtige Impulse für neue Technologien und technische Lösungen für mehr Lebensqualität, eine bessere Umwelt und mehr Wohlstand. Mit rund 140.000 persönlichen Mitgliedern ist der VDI der größte technisch-wissenschaftliche Verein Deutschlands. Wir sprechen für Ingenieurinnen und Ingenieure sowie für die Technik und gestalten so die Zukunft aktiv mit. Über 12.000 ehrenamtliche Expertinnen und Experten bearbeiten jedes Jahr neueste Erkenntnisse zur Förderung unseres Technikstandorts. Als drittgrößter technischer Regelsetzer ist der VDI Partner für die deutsche Wirtschaft und Wissenschaft.

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik
Jean Haeffs
Tel. +49 211 6214-281
haeffs@vdi.de
www.vdi.de