

Diskussionspapier

OPTIMIERUNG AUF DER ENERGIE- SYNCHRONISATIONS- PLATTFORM



Optimierung auf der Energiesynchronisationsplattform

Teil der Reihe „Diskussionspapiere V4 – Konzept der
Energiesynchronisationsplattform“

Cluster Informations- und Kommunikationstechnik des Kopernikus-Projekts „SynErgie – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung“, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung

Stand Oktober 2021

DOI: <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642371>

Dieses Diskussionspapier wird unter den Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz „Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen, Version 4.0“ (CC BY-SA 4.0) veröffentlicht.¹



¹ Unter der Bedingung, dass Autor sowie die Lizenz als »Lizenz: CC BY-SA 4.0« einschließlich der Lizenz-URL genannt werden, darf dieses Material vervielfältigt, weitergereicht und auf beliebige Weise genutzt werden, auch kommerziell. Auch die Bearbeitung ist erlaubt unter der zusätzlichen Bedingung, dass das neu entstandene Werk als Bearbeitung gekennzeichnet wird und im Falle einer Veröffentlichung unter derselben Lizenz wie dieses Diskussionspapier freigegeben wird (vollständige Lizenzbedingungen: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/de/legalcode>)

Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV

Am Technologiezentrum 10

86159 Augsburg

www.igcv.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

www.ipa.fraunhofer.de

Technische Universität Darmstadt

Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)

Otto-Berndt-Straße 2

64287 Darmstadt

www.ptw.tu-darmstadt.de

**Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM), Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des
Fraunhofer FIT und SnT – Interdisciplinary Centre for Security, Reliability and Trust (Universität Luxemburg)
(FIM/FIT)**

Universitätsstr. 12

86159 Augsburg

www.fim-rc.de

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

AUTOR:INNEN

Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV

Prof. Dr.-Ing. Johannes Schilp

Lukas Bank, Jana Köberlein

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl, Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer

Can Kaymakci, Hartmut Eigenbrod

Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM), Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT und SnT – Interdisciplinary Centre for Security, Reliability and Trust (Universität Luxemburg) (FIM/FIT)

Prof. Dr. Gilbert Fridgen

Ramin Bahmani, Sergio Potenciano Menci, Dr. Michael Schöpf, Christine van Stiphoudt

Technische Universität Darmstadt

Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

Martin Lindner

VORWORT UND DANKSAGUNG

Diese Publikation ist Teil der Reihe „Diskussionspapiere V4 – Konzept der Energiesynchronisationsplattform“, welche den Arbeitsstand des Clusters III – Informations- und Kommunikationstechnik im Kopernikus-Projekt SynErgie im Oktober 2021 dokumentiert. In dieser vierten Auflage wurde das Diskussionspapier erstmals in fünf thematisch eigenständige Papiere aufgeteilt und um eine Executive Summary ergänzt, damit wir die Informationen zielgerichtet zur Verfügung stellen können. Die Diskussionspapiere basieren auf den vorherigen Auflagen (Reinhart et al. 2020; Reinhart et al. 2018) sowie insbesondere auch auf Bauernhansl et al. (2019). Die Diskussionspapiere sollen zum Diskurs in Forschung und Praxis anregen, um so die erarbeiteten Lösungen kontinuierlich zu verbessern und weiterzuentwickeln.

Folgende Diskussionspapiere sind erschienen und wurden von den genannten Ansprechpersonen koordiniert:

- Executive Summary: Konzept der Energiesynchronisationsplattform – Diskussionspapiere

DOI: <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642368>

Jana Köberlein, jana.koeberlein@iqcv.fraunhofer.de

- Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform

DOI: <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642369>

Sergio Potenciano Menci, sergio.potenciano-menci@uni.lu

- Das Energieflexibilitätsdatenmodell der Energiesynchronisationsplattform

DOI: <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642370>

Martin Lindner, m.lindner@ptw.tu-darmstadt.de

- Optimierung auf der Energiesynchronisationsplattform

DOI: <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642371>

Lukas Bank, lukas.bank@iqcv.fraunhofer.de

- IT-Sicherheit der Energiesynchronisationsplattform

DOI: <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642372>

Andreas Oeder, andreas.oeder@iis.fraunhofer.de

- Demonstratoren der Energiesynchronisationsplattform

DOI: <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642373>

Andreas Schlereth, andreas.schlereth@ipa.fraunhofer.de

Verantwortlich für die Inhalte der einzelnen Diskussionspapiere sind die jeweils genannten Autor:innen.

Wir bedanken uns herzlich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die finanzielle Unterstützung und beim Projektträger Jülich (PtJ) für die Betreuung des Kopernikus-Projektes SynErgie.

Des Weiteren bedanken wir uns bei allen Kolleginnen und Kollegen aus dem SynErgie-Projektconsortium, die mit Ideen und kritischen Anmerkungen zur Entstehung der in diesem Diskussionspapier dargestellten Konzepte beigetragen haben. Insbesondere bedanken wir uns auch bei denen, die an der aktuellen Auflage des Diskussionspapiers nicht mehr selbst beteiligt waren:

Dennis Bauer, Martin Brugger, Volker Bühner, Eduardo Colangelo, Leon Haupt, Fabian Hering, Robert Keller, Benjamin Meyer, Lena Pfeilsticker, Jaroslav Pullmann, Christian Schmidt, Philipp Seitz, Peter Simon und Thomas Weber

Weitere Informationen zu den Kopernikus-Projekten und SynErgie finden Sie auf folgenden Webseiten:



<https://kopernikus-projekte.de>



<https://synergie-projekt.de>

KURZZUSAMMENFASSUNG

Dieses Diskussionspapier soll die Bandbreite der im Rahmen des Projekts SynErgie entwickelten Optimierer vorstellen und näher auf die methodischen Aspekte eingehen. Dabei wird in diesem Diskussionspapier zwischen Optimierern auf der Unternehmens- und Marktplattform unterschieden. Auf der Unternehmensplattform wird das Ziel verfolgt, einen optimalen Betrieb der Anlagen zu gewährleisten, sodass neben der Energie weitere betriebsbedingte Kennzahlen in die Betrachtung einfließen. Dazu gehören verschiedene Optimierer aus der Produktionsplanung und -steuerung (PPS), die neben den Energiekosten zudem logistische Zielgrößen, wie die termingerechte Lieferung der Produkte, als Kennzahl verfolgen. Neben den Produktionssystemen werden auch die Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) auf der Unternehmensplattform optimiert. Zudem wird innerhalb des Diskussionspapiers auf den Unterschied energieorientierte und energieflexibler Optimierung eingegangen. Die energieorientierte Optimierung, welche das Ziel verfolgt Energiekosten zu minimieren, nutzt hierzu Informationen der Energiemärkte wie beispielsweise Strompreisprognosen, wird jedoch nicht dafür verwendet, Flexibilität auf dem Markt anbieten zu können. Bei der energieflexiblen Optimierung werden beispielsweise Flexibilitäten ermittelt oder zeitlich eingeplant, die dann an den Markt übermittelt werden können. Ebenfalls geht das Diskussionspapier auf die Optimierungsservices der Marktplattform ein, die eine optimale Vermarktungsmöglichkeit der übermittelten Energieflexibilitätsmaßnahmen ermittelt. Der Optimierer berechnet dazu für unterschiedliche Märkte den optimalen Zeitpunkt, um den Erlös der angebotenen Flexibilität zu maximieren bzw. die Kosten zu minimieren. Sollte sich ein Flexibilitätsanbieter für einen Service entscheiden, der die Vermarktung seiner Flexibilitätsmaßnahme übernimmt, werden Informationen zur Flexibilität zwischen Service und Unternehmen übermittelt, um die Maßnahme im Unternehmen umsetzen zu können.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	EINORDNUNG UND MOTIVATION.....	1
1.2	DAS PROJEKT SYNERGIE.....	3
1.3	ZIELE UND VISION DER ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM	4
1.4	EINFÜHRUNG IN DIE OPTIMIERUNG AUF DER ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM	5
2	OPTIMIERUNG AUF DER ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM	7
2.1	MARKTSEITIGE OPTIMIERUNG	7
2.2	OPTIMIERUNG AUF DER UNTERNEHMENSPLATTFORM.....	11
2.3	ANWENDUNGSFALL MAGNESIUMDRUCKGUSS.....	16
3	FAZIT UND AUSBLICK	22
	LITERATURVERZEICHNIS.....	23

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Struktur des Kopernikus-Projekts SynErgie.....	3
Abbildung 2: Optimierung im SynErgie Kontext	6
Abbildung 3: Übersicht der Eingangs- und Ausgangsdaten des Flexibilitätseinsatzplanungstools	8
Abbildung 4: Optimierungsprozess des Flexibilitätseinsatzplanungstools	10
Abbildung 5: Flexibilitätsmaßnahmen und deren zeitliche Einordnung, sowie Möglichkeiten des Flexibilitätshandels	12
Abbildung 6: Ablauf einer hierarchischen Optimierungsstruktur	13
Abbildung 7: Vergleich möglicher unterschiedlicher Optimierungsverfahren mit ihrem jeweiligen input nach (Kohne et al. 2020)	14
Abbildung 8: Beispielhafter Belade- und Entladevorgang	18
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Energieflüsse	18
Abbildung 10: Prozess zur Identifikation und Vermarktung von Restflexibilität	19
Abbildung 11: Modellierung des Energiebedarfs für die Produktion einzelner Produkte	20
Abbildung 12: Zeitlicher Verlauf der Energiebereitstellung	20
Abbildung 13: Belegung von Produktionsmaschinen (Hier mit Zeithorizont von 36 Stunden)	21
Abbildung 14: Entwicklung des Lagerbestands der Produzierten Produkte.....	21

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Beispiel für potenzielle Ausgaben des Flexibilitätseinsatzplanungstools	9
Tabelle 2: Auszug von Optimierungsservices für den energieflexiblen Produktionsbetrieb.....	13

1 EINLEITUNG

1.1 Einordnung und Motivation

Die Eindämmung des Klimawandels gilt als eine der größten globalen Herausforderungen im 21. Jahrhundert (United Nations 2015). Der Anstieg der Durchschnittstemperatur auf der Erdoberfläche, insbesondere verursacht durch die zunehmende Konzentration von Kohlenstoffdioxid und anderen Treibhausgasen in der Atmosphäre, hat weitreichende Auswirkungen auf Mensch und Umwelt in allen Regionen der Welt. Es ist wissenschaftlicher Konsens, dass aufgrund des durch menschliche Aktivität verursachten Klimawandels extreme Klimaereignisse wie Hitzewellen, starke Regenfälle und Dürren häufiger und extremer werden (IPCC 2021). Diese Zunahme der extremen Wetterereignisse ist bereits heute deutlich spürbar (Mann et al. 2017). Der zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC) geht davon aus, dass ohne schnelle und umfassende Verringerung der Treibhausgasemissionen die globale Erwärmung von 1,5°C und 2°C im Laufe des 21. Jahrhunderts überschritten werden wird. Mit einer weiteren globalen Erwärmung werden die Veränderungen, die schon heute spürbar sind, weiter zunehmen, wobei diese bereits bei einer Erwärmung um 2°C im Vergleich zu 1,5°C deutlich häufiger und/oder ausgeprägter sein werden (IPCC 2021).

Dies führt zu hoher gesellschaftlicher Aufmerksamkeit für Klimaschutz und übt Druck auf politische und wirtschaftliche Entscheidungsträger aus, den notwendigen Rahmen für die Eindämmung des Klimawandels zu schaffen sowie die Anstrengungen für den Klimaschutz zu intensivieren. Da die Nutzung fossiler Brennstoffe wie Braunkohle, Steinkohle und Erdöl zur Energieerzeugung signifikante Mengen an Treibhausgasen freisetzt und somit ein Hauptverursacher für die Veränderung des Klimas ist, zielen Maßnahmen insbesondere auf einen nachhaltigen Energiesektor ab. Die Energieerzeugung hat heute mit knapp 29% den größten Anteil der Treibhausgasemissionen in Deutschland (Uba 2021c). Mit dem Pariser Klimaabkommen im Jahr 2015 wurde erstmals ein globaler Rahmen geschaffen, um den Herausforderungen des Klimawandels zu begegnen (United Nations 2015). Der Deutsche Bundestag hat beschlossen, seine Ziele aus dem Klimaschutzplan 2050 mit einer Novelle des Klimaschutzgesetzes noch einmal zu verstärken und strebt an, in Deutschland bis 2045 Klimaneutralität zu erreichen. Auch die Zwischen- und Sektorenziele wurden im Rahmen dessen weiter angehoben (BMU 2021). Mit dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) 2021 plant die Bundesregierung, die Erzeugung und den Verbrauch von Strom in Deutschland nun bereits vor 2050 vollständig zu dekarbonisieren (BMW 2021). Im Jahr 2020 betrug der Anteil am Bruttostromverbrauch in Deutschland bereits 45,4%² und am Bruttoenergieverbrauch 19,6%² (Uba 2021a). Damit sind die Zielwerte für das Jahr 2020 zwar erreicht, dennoch liegt noch ein weiter Weg vor uns. Das Energiewirtschaftliche Institut an der Universität zu Köln (EWI) errechnete, dass das Zwischenziel eines Anteils erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch von 65% im Jahr 2030 nicht erreicht werden könne. Dies begründet sich insbesondere in der Annahme eines steigenden Stromverbrauchs, getrieben durch die Sektorkopplung, welcher der prognostizierten Stromerzeugung aus Erneuerbaren gegenübergestellt wurde (Gierink und Sprenger 2020).

Die notwendige Transformation des Energiesystems geht mit großen Herausforderungen einher. Der Anteil von Wind- und Sonnenenergie an der Bruttostrom- bzw. Bruttoenergieerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen betrug im Jahr 2020 bereits über 70%² respektive etwa 40%² (Uba 2021b). Aufgrund der Wetterabhängigkeit der Erzeugung von Wind- und Sonnenenergie unterliegt diese erheblichen Schwankungen. Im Gegensatz zu konventionellen Kraftwerken sind diese volatilen erneuerbaren Energiequellen nicht regelbar und stellen das Stromnetz vor die Herausforderung,

² Vorläufige Angabe

Stromangebot und -nachfrage in Einklang zu bringen. Um Netzstabilität zu gewährleisten, unternehmen die Netzbetreiber große Anstrengungen, indem sie Reserven vorhalten und diese bei einem geringen Stromdargebot durch Wind und Sonne vorübergehend aktivieren oder bei einer Überlast treibhausgasintensive Kraftwerke abschalten. Zudem werden zusätzlich immer noch beachtliche Mengen der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Rahmen von Einspeisemanagement-Maßnahmen abgeregelt (Bundesnetzagentur 2020).

In der Vergangenheit wurden Veränderungen in der Stromnachfrage durch die Steuerung der Stromerzeugung in konventionellen Kraftwerken ausgeglichen (Papaefthymiou et al. 2018). Aufgrund der Prognoseunsicherheit und der wenig beeinflussbaren Natur erneuerbarer Energien ist dieser Mechanismus auf der Stromerzeugungsseite keine ausreichende Option mehr und erhöht den Bedarf an Flexibilität. Diese Entwicklung wird von Papaefthymiou et al. (2018) als "Flexibilitätslücke" beschrieben. Im Allgemeinen stehen vier Optionen zur Verfügung, um die notwendige Flexibilität im System bereitzustellen (Lund et al. 2015; Müller und Möst 2018)

- Übertragung: Flexibilität durch den Ausbau des Stromnetzes
- Speicherung: Flexibilität durch Speicherung
- Sektorkopplung: Flexibilität durch Energieumwandlung zwischen Energiesektoren
- Nachfrage: Flexibilität durch Demand Response (DR)

Aufgrund der hohen Kosten und mangelnden sozialen Akzeptanz des Netzausbaus (Battaglini et al. 2012; Bertsch et al. 2016), der immer noch sehr hohen Kosten für die Stromspeicherung (Lund et al. 2016) und der langsamen Fortschritte bei der Sektorkopplung, wie Power-to-Gas, Elektromobilität, etc. (Papaefthymiou et al. 2018), ist das sogenannte DR zur Anpassung der Stromnachfrage eine wettbewerbsfähige Flexibilitätsoption. DR ist eine Kategorie von Demand Side Management. Über Anreizzahlungen oder variable Strompreise bewirken DR-Maßnahmen Veränderungen der Stromnachfrage (Albadi und El-Saadany 2008; Markle-Huss et al. 2016). Motiviert durch solche Preissignale entscheiden sich teilnehmende Stromverbraucher selbstständig dafür, ihre Stromnachfrage in Zeiträumen von wenigen Minuten bis zu einigen Stunden flexibel zu gestalten (Palensky und Dietrich 2011). Realisiert wird dies durch Maßnahmen der Lasterhöhung, des Lastverzichts und der Lastverschiebung (Jazayeri et al. 2005). Bei der Automatisierung von DR zum sogenannten Automated Demand Response spielt die Informations- und Kommunikationstechnik eine maßgebliche Rolle (Bauernhansl et al. 2019).

Die Industrie stellt weltweit den größten Stromverbraucher dar, wodurch sich für diesen Sektor ein großes (theoretisches) Potenzial für DR ergibt (European Environmental Agency 2020). Das DR-Potenzial kann durch die Industrie zu vergleichsweise niedrigen Grenzkosten bereitgestellt werden (Steurer 2017). Energieintensive Unternehmen nutzen deshalb bereits DR, wenn auch noch in geringem Umfang (Papaefthymiou et al. 2018; Sauer et al. 2019b). Eine flächendeckende Nutzung in der Industrie erfordert einen neuen Ansatz der Zusammenarbeit zwischen Industrie, Stromversorgern und Netzbetreibern, was vor dem Hintergrund zunehmender Unsicherheit und Volatilität in der Stromversorgung neue Mechanismen und Interaktionsmöglichkeiten für eine wettbewerbsfähige Strombeschaffung erfordert. Um der Industrie die aktive Anpassung des Stromverbrauchs durch vereinfachte Partizipation am Stromhandel zu ermöglichen, müssen die technischen und organisatorischen Voraussetzungen geschaffen und mittels eines geeigneten Plattformökosystems umgesetzt werden, an dem alle relevanten Stakeholder beteiligt sind.

Die beschriebene Komplexität der Energiewende und die damit verbundene Herausforderung zum Ausgleich von Stromangebot und -nachfrage spiegelt sich deshalb auch in der Forschungsthematik der industriellen DR wider (Seifermann et al. 2019). Eine integrierte Betrachtung technischer, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Aspekte ist daher unerlässlich. Im Einzelnen sind dies

- die Untersuchung der technischen Flexibilisierungsmöglichkeit von branchenspezifischen Schlüsselproduktionsprozessen der produzierenden Industrie,
- die Betrachtung der technischen Flexibilisierungsmöglichkeit der branchenübergreifenden Produktionsinfrastruktur,
- die Erforschung einer durchgängigen Verbindung zwischen Maschine und Strommarkt sowie deren Befähigung zur automatisierten Entscheidungsfindung über Informations- und Kommunikationstechnik,
- die Analyse und Neugestaltung der regulatorischen Rahmenbedingungen des Markt- und Stromsystems zur Schaffung von wirtschaftlichen Anreizen für industrielles Demand Response,
- die Bestimmung der Höhe des Flexibilitätspotenzials sowie
- die Untersuchung ökonomischer, ökologischer und gesellschaftlicher Auswirkungen.

1.2 Das Projekt SynErgie

Das Projekt SynErgie ist Teil der Kopernikus-Projekte, eine der größten deutschen Initiativen im Rahmen der Energiewende. In einem interdisziplinären Konsortium aus Wissenschaft, Industrie und Zivilgesellschaft werden Technologien und Lösungen erarbeitet, um den Energiebedarf der deutschen Industrie effektiv mit dem volatilen Energieangebot zu synchronisieren (Sauer et al. 2019a). Die vorab genannten technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Aspekte für DR betrachtet das Projekt SynErgie in einer analogen Struktur (siehe Abbildung 1), wobei die Informations- und Kommunikationstechnik eine Schlüsselrolle zur Verbindung der Produktion und Produktionsinfrastruktur mit dem Markt- und Stromsystem einnimmt.

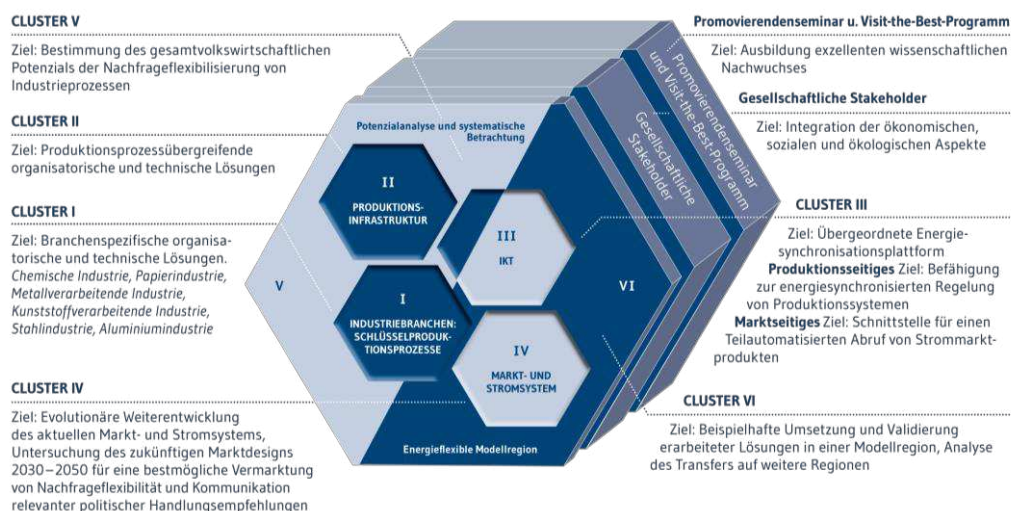


ABBILDUNG 1: STRUKTUR DES KOPERNIKUS-PROJEKTS SYNERGIE

Hierdurch können insbesondere im Bereich des industriellen DR Informationsflüsse auch über Unternehmensgrenzen hinweg definiert und aufgebaut werden. Die klassische Informations- und Kommunikationstechnik in Unternehmen wird also erweitert (Körner et al. 2019), um das Zusammenspiel diverser Optimierungsservices zu koordinieren

(Seitz et al. 2019). Darauf aufbauend wird die Automatisierung und Standardisierung (Schott et al. 2019) des gesamten Prozesses zur Energieflexibilitätsvermarktung möglich (Bauernhansl et al. 2019). Um der Bedeutung logistischer Kennzahlen für produzierende Unternehmen gerecht zu werden, ist es des Weiteren essenziell, Energieflexibilität in die Produktionsplanung und -steuerung und damit in die logistischen Zielgrößen zu integrieren (Pfeilsticker et al. 2019).

1.3 Ziele und Vision der Energiesynchronisationsplattform

Das Ziel der Energiesynchronisationsplattform (ESP) ist es, durch den Aufbau eines Plattformökosystems den gesamten Prozess des Energieflexibilitätshandels von der Maschine bis zum Energiemarkt zu automatisieren und zu standardisieren. Hierfür ist insbesondere auch die Integration von DR in die Produktionsplanung und -steuerung in produzierenden Unternehmen notwendig. Die Vision der ESP sieht deshalb vor, eine branchenübergreifende Plattform zum Energieflexibilitätshandel in Deutschland aufzubauen und damit »die« zentrale Energieflexibilitätsplattform³ zu werden. Die ESP sowie die modular darauf aufbauenden Services zur Flexibilisierung der energieintensiven Industrie und der Flexibilitätsvermarktung ermöglichen der Industrie eine aktive Teilnahme mit möglichst niedrigen Eintrittsbarrieren an den Energiemärkten – einerseits durch eine akkuratere und schnellere Bedarfsplanung (Konsumentenrolle), andererseits durch das Anbieten von Energieflexibilitätspotenzial (Anbieterrolle). Die ESP ermöglicht damit eine ganzheitliche Betrachtung des Stromsystems, um im Sinne von automatisiertem DR eine möglichst effektive und effiziente Synchronisation von Stromangebot und -nachfrage für die Industrie zu realisieren.

Bei der ESP selbst handelt es sich nicht um eine physische Plattform. Sie beschreibt vielmehr als übergeordnetes Konzept die Zusammenarbeit zwischen den Teilplattformen Unternehmensplattform (UP) und Marktplattform (MP), was Rahmenbedingungen, Schnittstellen, Datenmodelle, Stakeholder und Sicherheitsaspekte umfasst und den gesamten Prozess des automatisierten Energieflexibilitätshandels von der Maschine bis zum Energiemarkt abbildet. Abhängig von den Gegebenheiten können die Rollen der Unternehmen jederzeit flexibel angepasst werden (Bauernhansl et al. 2019; Schott et al. 2018; Bauer et al. 2017). Die beschriebenen Eigenschaften bieten einen deutlich höheren Funktionsumfang und ein höheres Informationsangebot als aktuell bestehende Plattformen (Rösch et al. 2019).

Für die ESP wurde ein durchgängiges Konzept, einschließlich des Daten- und Informationsflusses von der Maschine bis zum Energiemarkt, entwickelt (siehe Diskussionspapier „[Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform](#)“ (Fridgen et al. 2021)). Hierfür war insbesondere die Identifikation und Entwicklung von Schnittstellen sowie die Definition eines Datenmodells für Energieflexibilität (siehe Diskussionspapier „[Energieflexibilitätsdatenmodell der Energiesynchronisationsplattform](#)“ (Buhl et al. 2021)) erforderlich. Den Kern der ESP stellen Services dar, die Daten verarbeiten, aggregieren, miteinander austauschen und Energieflexibilität bewerten und bereitstellen. Insbesondere wurden für den optimalen Betrieb der Energieflexiblen Fabrik eine Reihe von Optimierungsservices entwickelt (siehe Diskussionspapier „[Optimierung auf der Energiesynchronisationsplattform](#)“ (Schilp et al. 2021)). Das Konzept der ESP sieht dabei Erweiterungsmöglichkeiten für verschiedene Energieträger vor, auch wenn der Fokus eindeutig auf elektrischer Energie liegt. Um den Mehrwert der automatisiert gehandelten Energieflexibilität für Industrieunternehmen sowie Teilnehmer der Energiemärkte aufzuzeigen, werden verschiedene Demonstratoren konzipiert, entwickelt und umgesetzt (siehe Diskussionspapier „[Demonstratoren der Energiesynchronisationsplattform](#)“ (Bauernhansl et al. 2021)). Sie werden im Forschungsumfeld sowie, gemeinsam mit produzierenden Unternehmen und

³ Zentrale Plattform ist an dieser Stelle im Sinne einer Meta-Plattform zu verstehen, welche bestehende Angebote integriert und nicht ablöst.

Netzbetreibern, im industriellen Umfeld und der Energieflexiblen Modellregion Augsburg aufgebaut. IT-Sicherheit muss bei allen Konzeptions- und Umsetzungsschritten eines Systems in adäquatem Maß bedacht werden sowie bei allen logischen und physischen Bestandteilen des Systems entsprechend implementiert und im operativen Betrieb aufrechterhalten werden. Zur Gewährleistung des Sicherheitsniveaus, d. h. insbesondere auch zur Minimierung des Risikos beim Betrieb der Plattformen und aus praktischer Perspektive zur Abwehr von potentiellen Angriffen auf und über die Plattformen, wurden deshalb verschiedene technische und organisatorische Sicherheitsmaßnahmen definiert (siehe Diskussionspapier „[IT-Sicherheit der Energiesynchronisationsplattform](#)“ (Oeder et al. 2021)).

Die technische Umsetzung der ESP bildet die Grundlage für eine echtzeitnahe Synchronisation flexibler Industrieprozesse mit dem volatilen Strom-/Energieangebot und damit volatilen Preisen. Abhängig vom konkreten Ziel der Umsetzung von Energieflexibilität können Unternehmen Einsparungen durch die Reduzierung der Strombeschaffungskosten und/oder der Netzentgelte sowie weiterer Umlagen erzielen oder Erlöse durch das Anbieten von Energieflexibilität für Dritte (bspw. als Systemdienstleistung) generieren. Von zentraler Bedeutung für die Akzeptanz und den Erfolg des erarbeiteten Konzepts sind auf der einen Seite die Wirtschaftlichkeit der Energieflexibilität für die Unternehmen sowie, auf der anderen Seite, die technischen Aspekte des Schutzes sensibler Unternehmensdaten, denen im Rahmen der Konzeption der ESP eine besondere Bedeutung zukommt. Die zentralen Befähiger für eine Akzeptanzerhöhung sind die Harmonisierung und Standardisierung eines erforderlichen Datenmodells und einer Schnittstelle zum sicheren Datenaustausch zwischen produzierenden Unternehmen und den Strommärkten.

1.4 Einführung in die Optimierung auf der Energiesynchronisationsplattform

Für den optimalen Betrieb der Energieflexiblen Fabrik wurden bereits eine Reihe von Services im Laufe der Projektlaufzeit entwickelt. Diese wurden in vergangenen Veröffentlichungen vorgestellt (Reinhart et al. 2020), das methodische Vorgehen der Services in Bezug auf die Optimierung wurde dabei kaum behandelt. Das vorliegende Diskussionspapier soll daher die Bandbreite der im Rahmen des Projekts SynErgie entwickelten Optimierer vorstellen und näher auf die methodischen Aspekte eingehen. Des Weiteren wird auf das Zusammenspiel mehrerer Optimierer innerhalb der Fabrik sowie das Zusammenspiel mit dem marktseitigen Optimierer eingegangen (siehe Abbildung 2). Auf der Unternehmensplattform wird das Ziel verfolgt, einen optimalen Betrieb der Anlagen zu gewährleisten, sodass neben der Energie weitere betriebsbedingte Kennzahlen in die Betrachtung einfließen. Dazu gehören die Optimierer aus der Produktionsplanung und -steuerung (PPS), die neben den Energiekosten zudem logistische Zielgrößen, wie die termingerechte Lieferung der Produkte, als Kennzahlen verfolgen (Süße et al. 2019; Schultz 2018; Keller et al. 2016). Neben den Produktionssystemen werden auch die Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) auf der Unternehmensplattform optimiert. Vergleichbar zu den Produktionssystemen, wird neben der Energiekostenbetrachtung, die Sicherstellung des Einsatzzwecks der TGA in der Optimierung berücksichtigt, wie beispielsweise die ausreichende Bereitstellung von Wärme oder anderen Energieformen (Weber et al. 2018). Diese Optimierungen basieren in der Regel auf Strompreisprognosen und haben das Ziel einer Minimierung der Stromkosten durch die Planung einer entsprechenden Betriebsweise. Auch das Identifizieren und die Nutzung kurzfristiger Maßnahmen, um auf kurzfristige Veränderungen auf den Märkten zu reagieren, ist Teil dieser Arbeiten (Seitz et al. 2019). Die beschriebenen Arbeiten nutzen dabei die Informationen der Energiemärkte, die Optimierung werden aber nicht dafür verwendet, Flexibilität auf den Märkten anzubieten. Der mit der Optimierung wesentliche Informationsfluss ist folglich unidirektional vom Markt zum Unternehmen. Daher wird in diesen Fällen von

einer energieorientierten Optimierung gesprochen, die das Ziel hat, die Energiekosten zu minimieren und dabei weitere Kennzahlen und Restriktionen der Produktion oder der TGA berücksichtigt.

Von einer energieflexiblen Optimierung wird gesprochen, wenn die Zielstellung der Optimierung zu einem Flexibilitätsangebot und damit zu einem bidirektionalen Informationsfluss führt. Ein Beispiel ist die Regelenergie, bei der eine mögliche Flexibilität für ein definiertes Zeitfenster zur Verfügung gestellt wird. Der Übertragungsnetzbetreiber kann bei Bedarf, zur Sicherung der Netzstabilität, auf diese angebotene Flexibilität zurückgreifen und deren Umsetzung initiieren. Für die Bereitstellung oder den Abruf der Flexibilität erhält das Unternehmen eine entsprechende Vergütung. Ein Optimierer plant den entsprechenden Zeitraum für eine Flexibilität in die Betriebsstrategie des Unternehmens ein (Bank et al. 2021). Die Flexibilität wird mittels Energieflexibilitätsdatenmodell (EFDM) an die Marktplattform übertragen (Schott et al. 2019). Das EFDM bietet den Rahmen, um Flexibilität und Flexibilitätsmaßnahmen anhand von Kennzahlen und technischen Parametern generisch zu beschreiben. Eine genaue Beschreibung des EFDM findet sich im Diskussionspapier „[Energieflexibilitätsdatenmodell der Energiesynchronisationsplattform](#)“ (Buhl et al. 2021). Die Kommunikation zwischen den Plattformen wird im Diskussionspapier „[Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform](#)“ (Fridgen et al. 2021) näher behandelt.

Auf der Marktplattform kann ein Optimierungsservice vermittelt werden, der eine optimale Vermarktungsmöglichkeit der übermittelten Energieflexibilitätsmaßnahmen identifiziert. Der Optimierer berechnet dazu für unterschiedliche Märkte den optimalen Zeitpunkt, um den Erlös der angebotenen Flexibilität zu maximieren bzw. die Kosten zu minimieren. Sollte sich ein Flexibilitätsanbieter für einen Service entscheiden, der die Vermarktung seinen Flexibilitätsmaßnahmen übernimmt, werden Informationen zur Flexibilität wiederum mittels EFDM vom Unternehmen zum Service übermittelt, um die Maßnahme für den Service zu beschreiben. Je nach Serviceanbieter werden unterschiedliche Informationen in unterschiedlichen Datenformaten an das Unternehmen zurückübermittelt. Die energieflexible Optimierung beruht daher auf einer bidirektionalen Kommunikation zwischen Unternehmens- und Marktplattform.

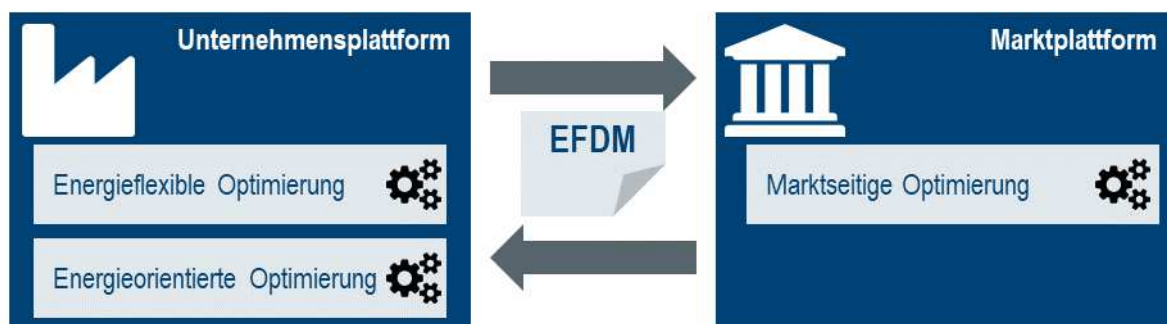


ABBILDUNG 2: OPTIMIERUNG IM SYNERGIE KONTEXT

2 OPTIMIERUNG AUF DER ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM

Das Diskussionspapier unterscheidet zwischen Optimierungen auf der Unternehmens- und der Marktplattform. Die Optimierung auf der Unternehmensplattform verfolgt einen optimalen Betrieb der Verbrauchsanlagen, sowohl aus der Perspektive der Produktion als auch der technischen Gebäudeausrüstung. Bei der Optimierung ist die Modellierung der Zielfunktion entscheidend. Damit verbunden ist die Frage, ob es sich um eine Minimierung oder Maximierung handelt und hinsichtlich welcher Variable optimiert wird. Auf der Unternehmensseite ist neben der Minimierung der Energiekosten eine Sicherstellung der Anlagenfunktion ein wesentliches Merkmal der Optimierungen. Auf der Marktplattform (MP) werden Energieflexibilitätsmaßnahmen hingegen abstrakt als Produkt beschrieben. Eine Optimierung findet mit dem Ziel einer gewinnbringenden Vermarktung statt. Hierbei ist es von den Zielmärkten abhängig, ob eher eine Minimierung der Kosten für den gesamten Strombezug (Use-Case Day-Ahead und Intraday Auktion) oder ob eine Maximierung der zusätzlichen Erlöse durch den Einsatz der Flexibilität in Betracht gezogen wird (Use-Case Systemdienstleistungsmärkte und z.T. auch Intraday Continuous Trading). Um diese beiden Perspektiven sinnvoll zu bewerten, ist es wichtig, den Referenzwert für die Strombezugskosten vor der Optimierung mit Flexibilitäten zu kennen.

2.1 Marktseitige Optimierung

In diesem Kapitel soll die Optimierung innerhalb der Services, die über die MP vermittelt werden, näher erläutert werden. Ein Service, der eine solche Optimierung durchführt, ist das Flexibilitätseinsatzplanungstool. Es hat zum Ziel, aus verschiedenen Flexibilitätsoptionen die Flexibilität auszuwählen, mit der die größten Erlöse erreicht werden können.

2.1.1 Einordnung des Flexibilitätseinsatzplanungstools innerhalb der Marktplattform

Die MP ist als Konvergenzpunkt für verschiedene Service-Anbieter gedacht, die der Industrie ihre Services zur Nutzung der industriellen Flexibilität anbieten. Daher ist die MP auf eine Multi-Service-Architektur ausgerichtet und stellt die Plattform für die verschiedenen Services bereit. Die Verantwortung für die Verwaltung der einzelnen Services übernimmt hingegen der Service-Anbieter selbst. Die MP übernimmt somit eine Vermittlerrolle und nicht das Hosting der Services selbst. Die auf der MP angebotenen Services können von der Bereitstellung einer Preisprognose auf Anfrage bis hin zu komplexen Services reichen, die sich auf die Vermarktung von Flexibilität auf dem Großhandelsmarkt (Spot - Intraday/Day-Ahead und Forwards), dem Regelenergiemarkt, oder über neue Marktkonzepte, wie den lokalen Flexibilitätsmarkt, konzentrieren. Die Entscheidung darüber, wie die einzelnen Services implementiert und wie sie auf der MP angeboten werden, liegt jedoch bei den Service-Anbietern. Obwohl die Services als eigenständige Dienste angeboten werden sollen, schließt die Modularität der MP die Abhängigkeit zwischen einzelnen Services nicht aus. Darüber hinaus bietet die MP die Möglichkeit, dass Services mit anderen Services interagieren. Auf diese Weise kann ein Service beispielsweise Informationen eines Optimierungsservices beziehen, der über die MP angeboten wird.

Ein aktuelles Beispiel für einen Optimierungsservice auf der MP befasst sich mit der folgenden Frage:

Wie können Unternehmen wissen, welcher Markt welche entsprechenden Erlöse für ihre identifizierte Flexibilität bietet? Diese Frage soll durch das Flexibilitätseinsatzplanungstool beantwortet werden, das über die MP vermittelt und über die UP oder ein Webinterface aufgerufen werden kann. Das Ziel dieses Service besteht darin, die potenziellen Erlöse auf den verschiedenen Märkten durch Optimierung zu bestimmen und auf dieser Basis den besten Markt auszuwählen, auf dem die Flexibilität potenziell den größten Erlös erzielen kann.

2.1.2 Aufgabe des Flexibilitätseinsatzplanungstools

Die marktseitige Optimierung bietet Unternehmen eine Grundlage für strategische Entscheidungen hinsichtlich der Investition in die Hebung von Flexibilitätspotenzialen. Die Eingangs- und Ausgangsgrößen des hierzu entwickelten Flexibilitätseinsatzplanungstools sind vereinfacht in Abbildung 3 dargestellt. Der Service selbst und die Suche nach dem optimalen Flexibilitätseinsatz ist eine sehr komplexe Aufgabe. Aus diesem Grund wird die Optimierung von Flexibilitätseinsätzen für die einzelnen Märkte vom Tool separat durchgeführt und letztlich mittels vollständiger Enumeration untereinander verglichen. Der Anwender des Tools hat vorab die Möglichkeit, die zu berücksichtigenden Märkte auszuwählen und einzugrenzen. Dadurch wird die Möglichkeit adressiert, dass insbesondere kleinere Flexibilitätensanbieter nur mit sehr unverhältnismäßig großem Aufwand an Märkten wie dem Regelenergiemarkt teilnehmen können. Wenn Unternehmen eine Teilnahme an diesen Märkten ausschließen, kann somit die Laufzeit des Flexibilitätseinsatzplanungstools verringert werden. Die Angaben über die zu berücksichtigenden Märkte werden dem Flexibilitätseinsatzplanungstool in Form von Metainformationen als zusätzliche Input-Parameter mitgegeben.

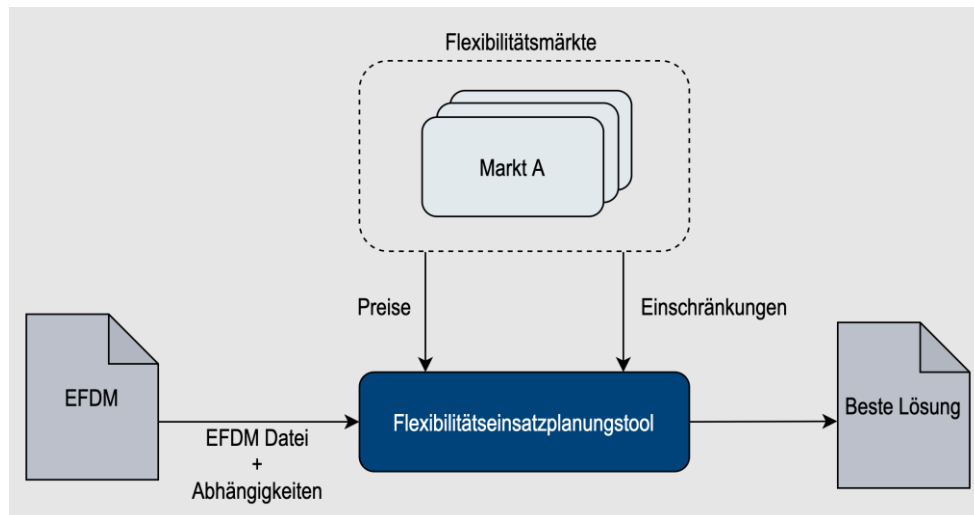


ABBILDUNG 3: ÜBERSICHT DER EINGANGS- UND AUSGANGSDATEN DES FLEXIBILITÄTSEINSATZPLANUNGSTOOLS

Eine Auflistung von relevanten Eingangs- und Ausgangsgrößen ist im Folgenden gegeben:

Input

- i. EFDM: Das Energieflexibilitätsdatenmodell (EFDM) kann entweder für eine Anlage alleine, oder für einen Verbund von mehreren Anlagen genutzt werden. Die im EFDM berücksichtigten Parameter können entweder über eine Nutzerschnittstelle eingegeben oder im definierten *.json*-Format übergeben werden. Das EFDM umfasst verschiedene Aspekte jeder Maschine für Flexibilitätsw Zwecke, wie z. B. die verfügbaren Zeitfenster für die Erhöhung/Reduzierung der Leistung, die Aktivierungskosten, die Aktivierungsdauer, die Menge der bereitgestellten Flexibilität, die Regenerationsdauer und die Häufigkeit für die Teilnahme am Flexibilitätsmarkt. Weiterführende Informationen zum EFDM sind dem Diskussionspapier „[Energieflexibilitätsdatenmodell der Energiesynchronisationsplattform](#)“ (Buhl et al. 2021) zu entnehmen.
- ii. Preise: Die Preise auf den Flexibilitätsmärkten liegen in sehr unterschiedlicher Form vor. Bei den Spotmärkten Intraday-Auction und Day-Ahead sind dies einfache Zeitreihen mit einer viertelstündlichen bzw. stündlichen Auflösung. Bei Regelenergiemärkten ist dies allerdings deutlich komplizierter, da hierbei unterschiedliche Auktionsrunden (Leistungspreis vs. Arbeitspreis) und zudem noch Abrufwahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden müssen. Dies wird in der aktuellen Variante des Flexibilitätseinsatzplanungstools noch für jeden der Teilmärkte separat betrachtet. Langfristig ist vorstellbar, ein übergreifendes Datenmodell für die Abbildung der verschiedenen Preise auf den Strommärkten zu entwickeln. Einschränkungen auf der Marktseite können sich zusätzlich ergeben, wenn nur ein Teil der bereitgestellten Flexibilität auf dem Markt benötigt wird.

- iii. Metainformationen zur Optimierung: Eine Anforderung an das Flexibilitätseinsatzplanungstool ist, eine anwendungsspezifische Anpassung der Optimierung zu ermöglichen. Neben den Daten zur Beschreibung von Flexibilität und Preisen müssen auch Informationen zur Berücksichtigung dedizierter Märkte durch den Nutzer definiert werden. Zudem gilt es festzulegen, ob eine zeitliche Obergrenze für die Durchführung der Optimierung besteht.
- iv. Optionale Informationen zur Optimierung: Je nachdem, welche Märkte und Anwendungszwecke für die Optimierung festgelegt werden (siehe iii), bedarf es weiterer Informationen. Wenn bspw. eine Lastspitze nicht überschritten werden soll, um keine zusätzlichen Netzentgelte entrichten zu müssen, bedarf es einer zusätzlichen Festlegung der Leistungsobergrenze und der Übergabe des Referenzlastgangs („Baseline“). Diese Informationen könnten in einer zukünftigen Version des Flexibilitätseinsatzplanungstools auch für jeden Nutzer individuell durch ein User-Management hinterlegt und genutzt werden.

Anhand dieser Eingaben kann das Flexibilitätseinsatzplanungstool die Optimierung durchführen und die beste Option zur Vermarktung der Flexibilität berechnen, um den größten Gewinn zu erzielen.

Output

Das Flexibilitätseinsatzplanungstool erstellt somit – abhängig von den für die Optimierung gewählten Märkten – eine Zeitreihe für den Einsatz der Flexibilität (Fahrplan) und berechnet die potenziellen Erlöse. Somit wird pro Markt jeweils eine vektorielle Größe und eine skalare Größe zurückgegeben. Weiterhin wird der Markt mit den höchsten Erlöspotenzialen bestimmt und dem Nutzer angezeigt. Hierfür ist außerdem eine grafische Ausgabe geplant, bei der ein Anwender direkt den neuen Fahrplan visualisiert bekommt. In der folgenden Tabelle wird eine beispielhafte Ausgabe dargestellt. Für alle dargestellten Flexibilitäten (M11, M12, M21) wurde eine Vermarktung der bereitgestellten Leistung am Day-Ahead-Markt als optimale Vermarktungsmöglichkeit berechnet. Die aufgelisteten Erlöse (in dem Fall das Einsparen von Kosten) beziehen sich dabei auf eine potenzielle Vermarktung am Day-Ahead-Markt am 18.1.2016.

TABELLE 1: BEISPIEL FÜR POTENZIELLE AUSGABEN DES FLEXIBILITÄTSEINSATZPLANUNGSTOOLS

Zeit (hh:mm)	09:00	10:00	11:00	12:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	Erlöse Day-Ahead Markt (€)
Bereitstellung von	0	0	0	0	0	0	0	30	50	30	5,09
Flexibilität M11 durch Lastreduktion (kW)											
Bereitstellung von	0	0	0	0	50	70	50	0	0	0	09,08
Flexibilität M12 durch Lastreduktion (kW)											
Bereitstellung von	20	30	40	20	0	20	30	40	20	0	11,44
Flexibilität M21 durch Lastreduktion (kW)											

2.1.3 Optimierungsprozess

Die mit dem Flexibilitätseinsatzplanungstool durchgeführte Optimierung wird für verschiedene Anwendungsfälle untersucht, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Da das EFDM eine möglichst umfassende und vollständige Abbildung von verschiedenen Flexibilitäten ermöglichen soll, sind Performanzverluste des Optimierungsmodells

unumgänglich. Dies betrifft insbesondere die Modellierung der Abhängigkeiten zwischen einzelnen Flexibilitäten. Das EFDM ermöglicht es zwar, auch komplexere Produktionsprozesse zu modellieren. Allerdings haben diese Abhängigkeiten einen großen Einfluss auf die Rechenzeit. Aus diesem Grund wurden drei verschiedene Anwendungsfälle mit aufsteigendem Grad an Komplexität gebildet:

- Option A – Basis: In diesem Anwendungsfall werden eine oder mehrere Flexibilität(en) in einem Industriebetrieb betrachtet unter der Annahme, dass keine der Flexibilitäten voneinander abhängig sind.
- Option B – einfache Abhängigkeiten (keine Kostenabhängigkeiten): In diesem Anwendungsfall werden mehrere voneinander abhängige Flexibilitäten in einem Industriebetrieb betrachtet. Die Aktivierung einer Flexibilität erfordert beispielsweise die Aktivierung einer anderen Flexibilität oder deren Verschiebung.
- Option C – Basis + Speicher: In diesem Anwendungsfall werden eine oder mehrere (voneinander unabhängige) Flexibilität(en) in einem Industriebetrieb betrachtet. Die Flexibilitäten werden durch die Nutzung von Speichern ermöglicht. Dadurch entstehen weitere Randbedingungen, die bei der Optimierung berücksichtigt werden müssen.

Eine Übersicht über die einzelnen Schritte des Optimierungsprozesses ist in Abbildung 4 gegeben. Nach der Erfassung der Eingangsdaten, werden die Daten für die Zielfunktion vorbereitet und die Optimierung wird gestartet. Die Zeitreihen, sowie die Erlöse werden berechnet und als Ausgabe bereitgestellt.

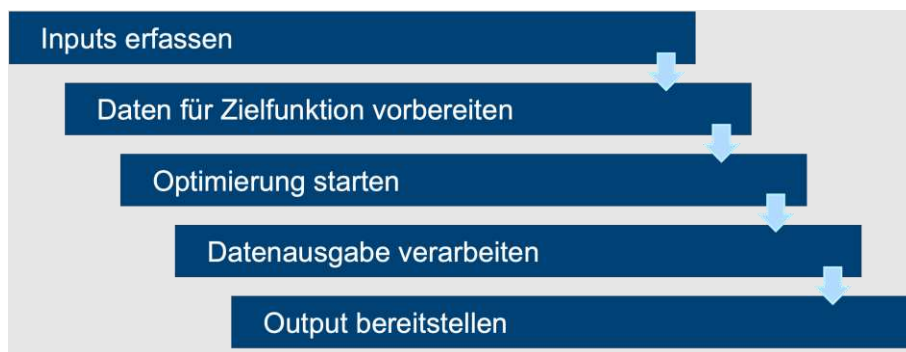


ABBILDUNG 4: OPTIMIERUNGSPROZESS DES FLEXIBILITÄTSEINSATZPLANUNGSTOOLS

Je nachdem für welchen Markt Flexibilitäten ausgewählt werden, erfolgt die Optimierung auf unterschiedliche Weise. Dabei wird zwischen Maximierung der Einnahmen und Minimierung der Kosten unterschieden. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann das Flexibilitätseinsatzplanungstool nicht alle Märkte berücksichtigen. Die folgende Ausführung bezieht sich auf die Stromspotmärkte. Die dort angewendete Zielfunktion ist beispielhaft für die Lastreduktion zur Maximierung der Erlöse⁴ in folgender Gleichung 1 dargestellt.

$$\max \sum_f \sum_m \sum_t y_{f,m,t} \cdot (C_{f,m} + \sum_{i=1}^{|e_{f,m}|} e_{f,m,i} \cdot p_{t+i-1}) \quad (1)$$

mit

- f Anzahl der Maschinen
- m Anzahl der Maßnahmen
- t Anzahl der Zeitfenster

⁴ Bei Lasterhöhung kann die Zielfunktion zur Berechnung der minimalen Kosten in ein Minimierungsproblem umgewandelt werden.

- $y_{f,m,t}$ Maßnahmenaktivierungsvariable
- $||e_{f,m}||$ Anzahl der Maßnahmenschritte m für Maschine f
- $c_{f,m}$ konstante Kosten für Aktivierung einer Maßnahme
- p_t Strompreis zum Zeitpunkt t
- $e_{f,m,t}$ Elektrische Leistung der Maßnahme m der Maschine f bei Schritt i

2.1.4 Zwischenfazit und weitere Aspekte

Weil es verschiedener Arten von Industrieanlagen gibt und weil sie sehr komplex sind, entstehen zahlreiche Herausforderungen für Optimierungs-Tools. Im Fall des Flexibilitätseinsatzplanungstools erschweren die Abhängigkeiten zwischen den Maschinen die Optimierungsmodellierung. Außerdem neigen Unternehmen dazu, so wenig Daten wie möglich preiszugeben, was eine weitere Herausforderung für das Flexibilitätseinsatzplanungstool darstellt. Je nach den vom Industriepartner bereitgestellten Informationen können verschiedene Ansätze für das Flexibilitätseinsatzplanungstool verfolgt werden. Im vorherigen Abschnitt wurde der Anwendungsfall diskutiert, in dem der Industriepartner nur das EFDM zur Verfügung stellt. Wenn der Industriepartner den Zugriff auf die elektrische Last der Anlage ermöglicht, können auch andere Modelle zur Optimierung der elektrischen Lastverschiebung für das Flexibilitätsmanagement eingesetzt werden. Ein weiteres zu berücksichtigendes Thema ist die erforderliche Rechenleistung, die bei Vorhandensein vieler Abhängigkeiten steigen könnte. Die Unsicherheit der Preisprognosen ist ein weiterer Punkt, der die Ergebnisse beeinflussen kann und berücksichtigt werden sollte.

2.2 Optimierung auf der Unternehmensplattform

In diesem Kapitel sollen die unterschiedlichen Aspekte der Optimierung auf der Seite des Unternehmens vorgestellt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Anforderungen sind die Optimierer in zwei verschiedene Kategorien eingeteilt – Produktionsprozesse und Produktionsinfrastruktur. Die Optimierer der Produktionsprozesse betrachten den gesamten Produktionsprozess auf unterschiedlichen Ebenen der Automatisierungspyramide (siehe Abbildung 5). Zum einen können Optimierer auf der Unternehmensebene (z. B. PPS-Optimierer) als auch Optimierer auf der Feldebene (z.B. maschinennahe Optimierer) nach Bedarf genutzt werden.

2.2.1 Optimierung von Produktionsprozessen

Aufgrund der komplexen Prozessabläufe der industriellen Fertigung ist eine mehrstufige Optimierung notwendig, um eine effektive und effiziente Nutzung der industriellen Energieflexibilität zu ermöglichen. Der Ablauf dieser mehrstufigen Optimierung ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Aufteilung in mehrere Ebenen (marktseitiger Optimierer, ERP-Optimierer, MES-Optimierer, maschinenseitiger Optimierer) ermöglicht eine spezifische Optimierung auf jeder Ebene der Automatisierungspyramide unter der Berücksichtigung von unterschiedlichen Einflussfaktoren, wie beispielsweise Planungshorizonte oder den Informationen der Flexibilitätsmärkte. So wird eine Optimierung auf der Ebene der Produktionsplanung und -steuerung aufgrund unterschiedlicher zeitlicher Einordnung auf andere Märkte abzielen als die Optimierung auf der Ebene der Fertigungsleit- oder Fertigungsebene.

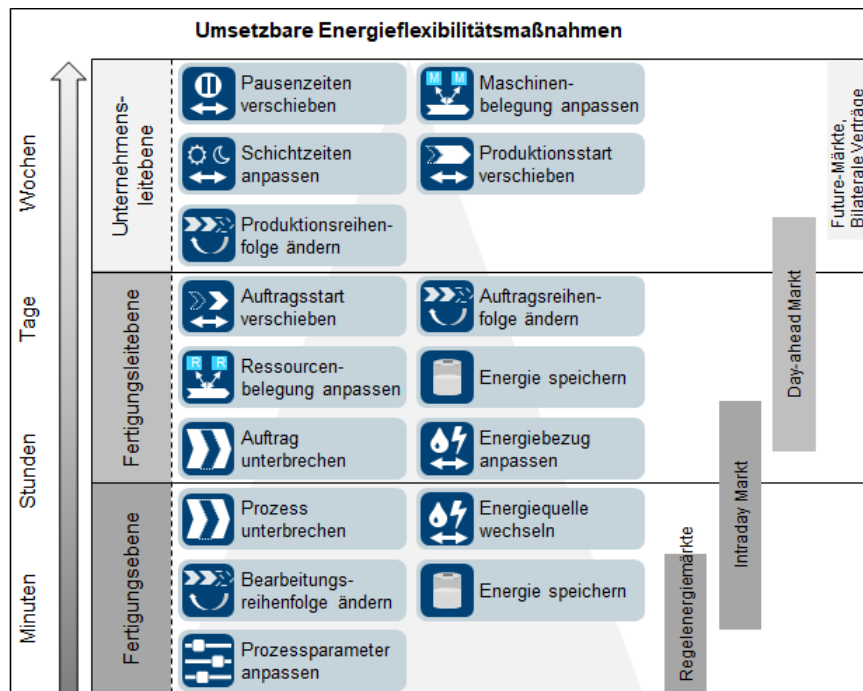


ABBILDUNG 5: FLEXIBILITÄTSMÄßNAHMEN UND DEREN ZEITLICHE EINORDNUNG, SOWIE MÖGLICHKEITEN DES FLEXIBILITÄTSHANDELS

Langfristige Planungen auf der Unternehmensleitebene entsprechen dem Zeithorizont des Terminmarktes. Die Optimierungshorizonte der Fertigungsleitebene und der Fertigungsebene bieten sich insbesondere für einen Handel am Day-Ahead-Markt an. Die Preise sind auf dem Day-Ahead-Markt bereits am Mittag des Vortages bekannt, woraus sich Möglichkeiten der flexiblen Anpassung des Produktionsprozesses als Reaktion auf volatile Preise ergeben. Die verbleibende Flexibilität kann, bei gegebener technischer Voraussetzung, auf Regelleistungsmärkten oder dem Intraday-Markt gehandelt werden (siehe Schritt 6 in Abbildung 6). Allerdings ist bei diesem dezentralen Ansatz die Integration einer Vielzahl von Optimierern eine wichtige Anforderung. So müssen Entscheidungen sowohl über klassische logistische als auch über energetische Ziele getroffen werden. Die möglichen Optimierungsschritte sind chronologisch geordnet (in Abbildung 6 durch die Schritte 1-7 gekennzeichnet). Optimierungsergebnisse auf höheren Ebenen der Automatisierungspyramide werden als vorgegebene Parameter an die unteren Ebenen weitergegeben. Dies ermöglicht eine sowohl energieorientierte als auch energieflexible Optimierung auf allen Ebenen der Automatisierungspyramide ohne die auf den vorhergehenden Ebenen definierten Randbedingungen zu verletzen.

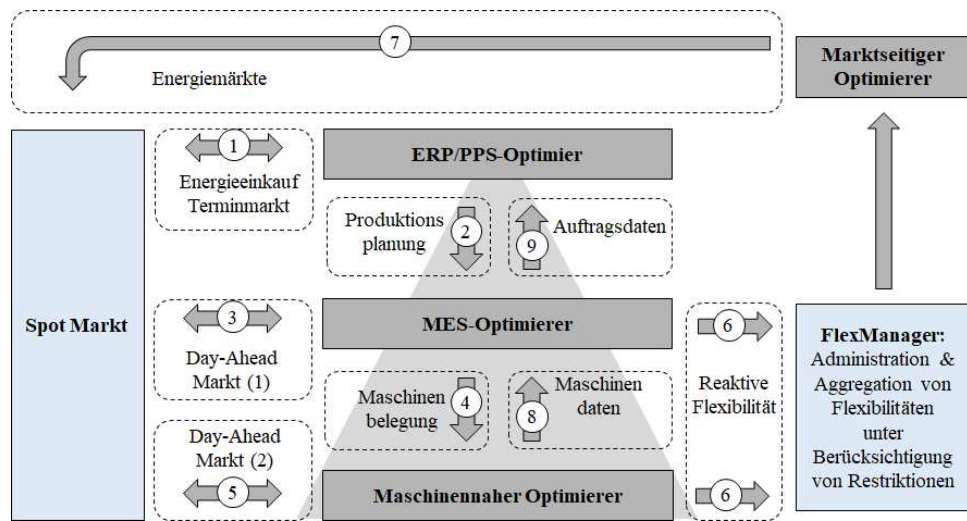


ABBILDUNG 6: ABLAUF EINER HIERARCHISCHEN OPTIMIERUNGSSTRUKTUR

Eine beispielhafte Umsetzung einer Optimierung auf der Fertigungsleitebene wird bei Bank et al. (2019) beschrieben. Es handelt sich dabei um eine Maschinenbelegungsplanung, bei der für einen Zeitraum von einer Woche anhand einer Preisprognose des Day-Ahead-Markts, das Produktionsprogramm einer Graphitierungsanlage geplant wird. Die Zielfunktion minimiert die Stromkosten des Produktionsprogramms dieser Woche, während die Nebenbedingungen die Einhaltung der logistischen Zielgrößen, wie die Termintreue, sicherstellen.

Innerhalb der Woche können zusätzliche reaktive Energieflexibilitätsmaßnahmen umgesetzt werden, die sich beispielsweise in der Unterbrechung eines Auftrags widerspiegeln. Die kurzfristigen Maßnahmen wurden durch den Regelenergiemarkt initiiert, zeigen aber beispielhaft die Funktionsweise eines zusätzlichen Handels an einem Energieflexibilitätsmarkt. Der Preis für die Maßnahme, die über das EFDM an einen Markt verschickt werden kann, kann beispielsweise in der Differenz von ursprünglichem Produktionsplan zu dem durch die Maßnahme beeinflussten Produktionsplan begründet werden. Der Preis der Flexibilität sollte dementsprechend die Abweichung vom ursprünglich optimalen Produktionsplan aufwiegen können. (Bank et al. 2021)

TABELLE 2: AUSZUG VON OPTIMIERUNGSSERVICES FÜR DEN ENERGIEFLEXIBLEN PRODUKTIONSBETRIEB

Service	Wirkebene	Referenz
Universeller Optimierungscontroller	Unternehmens- bis Fertigungsebene	Sauer et al. (2019b) Reinhart et al. (2020)
Evolutionäre Optimierung	Fertigungsleit- bis Fertigungsebene	Sauer et al. (2019b) Reinhart et al. (2020)
Gesamtkostenbasierte Produktionssteuerung	Fertigungsleitebene	Reinhart et al. (2020)
Energieorientierte Produktionsplanung und -steuerung (ePPS)	Unternehmens- bis Fertigungsleitebene	Sauer et al. (2019b) Reinhart et al. (2020)

2.2.2 Optimierung der technischen Gebäudeausrüstung

Für einen ganzheitlichen energieflexiblen Optimierungsansatz ist es erforderlich, neben der Optimierung von Produktionssystemen auch die Produktionsinfrastruktur zu berücksichtigen. Dies führt zum einen zu größeren Flexibilitätspotenzialen, zum anderen steigt durch die erweiterte Systemgrenze die Anzahl der Nebenbedingungen

einer zugehörigen Optimierung. Aufgrund systembedingter Abhängigkeiten und der Systemträgheit der Produktionsinfrastruktur zeigen Seitz et al. (2019), dass ein maschinennaher Optimierer die Flexibilitätspotenziale auf Anlagenebene nutzen kann, um einen auf den Day-Ahead-Markt angepassten Betrieb der Anlagen zu gewährleisten (vgl. Abbildung 7). Hierbei sind die übergeordneten Ergebnisse der Optimierung der Produktion (ME-System), welche zuvor erfolgt (vgl. Abbildung 6) und die daraus resultierenden Nebenbedingungen, wie beispielsweise Maschinenbelegungspläne und somit die korrespondierenden Energiebedarfe, in der maschinennahen Optimierung zu berücksichtigen. In Kohne et al. (2020) wird gezeigt, dass für eine Optimierung der Versorgungstechnik und technischen Gebäudeausrüstung verschiedene Verfahren eingesetzt werden können.

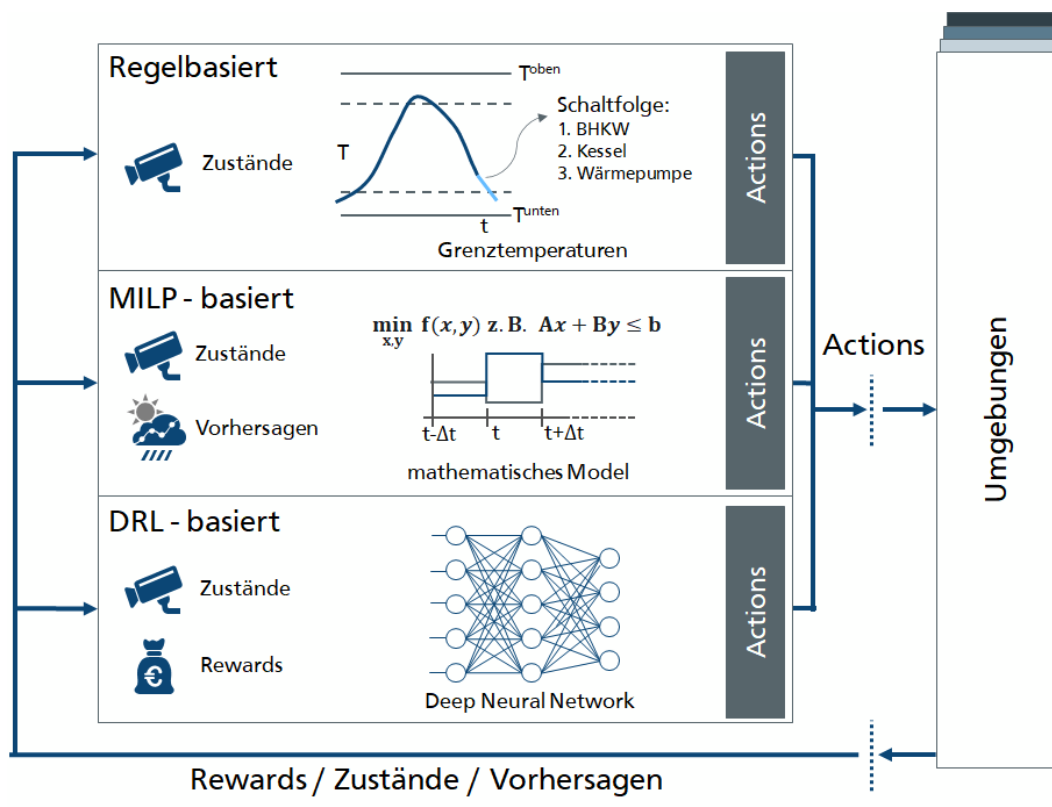


ABBILDUNG 7: VERGLEICH MÖGLICHER UNTERSCHIEDLICHER OPTIMIERUNGSVERFAHREN MIT IHREM JEWEILIGEN INPUT
 NACH (KOHNE ET AL. 2020)

Die verschiedenen Optimierungsverfahren regel-, MILP⁵- und DRL⁶-basierter Optimierer weisen jeweils verschiedene Eingangsgrößen bzw. Zielgrößen auf, wobei jedes Verfahren eine energieoptimale und -flexible intelligente Betriebsstrategie der Versorgungsanlagen der Produktionsinfrastruktur adressiert. Wie in Abbildung 7 gezeigt, sind entsprechende maschinennahe Optimierer häufig für einen Planungszeitraum von 15 Minuten bis einige Stunden ausgelegt (Abstracts from the 8th DACH+ Conference on Energy Informatics 2019). Im Folgenden sind verschiedene Regelungs- bzw. Optimierungsalgorithmen kurz erläutert:

Regelbasierte Steuerung der Anlagen

Zwei-Punkt-Regler sind derzeit einer der am häufigsten verwendeten Algorithmen für die Steuerung und Automatisierung von Versorgungssystemen (Pfeiffer et al. 2014). Konventionelle Regler aktivieren oder deaktivieren

⁵ Mixed Linear Programming

⁶ Deep Reinforcement Learning

die jeweiligen Energiewandler basierend auf definierten Grenztemperaturen. Die Ein- und Ausschaltregeln für einzelne Systeme können hierbei unterschiedlicher Komplexität und Logik folgen. So besteht bspw. die Möglichkeit, die Einschaltreihenfolge von Versorgungsanlagen auf Basis ihrer Kosteneffizienz zu definieren, um die Netztemperatur entsprechend zu regeln.

MILP-basierte Optimierung

Der Regelungsalgorithmus basierend auf Mixed-Integer-Linear-Programming (MILP) als Model-Predictive Control (MPC) -Ansatz kann wie in Kohne et al. (2020) verwendet werden, um eine energieoptimale Betriebsstrategie der Anlagen innerhalb der Produktionsinfrastruktur zu bestimmen. Dazu werden verschiedene Energiewandler und -speicher modelliert, sodass unterschiedliche Umgebungen effizient abbildbar sind. Die modellierten Energiewandler werden durch modulare lineare Gleichungen beschrieben, welche die Eingänge (bspw. Gas, Strom) und Ausgänge (Strom, Heizung, Kühlung) definieren, während Energiespeicher als Schichtspeicher abgebildet werden, welche die thermischen Netze zum Heizen und Kühlen der Produktionsprozesse definieren.

Wie bei allen MPC- und insbesondere MILP-Ansätzen, stellt das Modell ein vereinfachtes Abbild des realen Systems dar, mit der Möglichkeit, zukünftige Systemzustände vorherzusagen (Halvgaard 2014). Die Zielkostenfunktion enthält neben den Kosten für Gas und Strom auch Steuern auf bezogene Energie sowie Gebühren für Spitzenlasten. Zusätzlich werden die nicht-direkten Kosten für das Schalten hinzugerechnet.

Für das Schema der kontinuierlichen Regelung einer Umgebung muss das mathematische Modell zunächst parametrisiert werden (Nennleistung bzw. Kapazität der Komponenten, Import von externen Prognosewerten für Wetter, Last- und Energiepreisdaten). Auch aufgabenspezifische Einstellungen (z. B. Prognosehorizont, Zeitschrittgröße/Abtastzeit) und spezifische Einstellungen des Lösungsalgorithmus müssen gewählt werden und haben einen erheblichen Einfluss auf die Performance.

Durch die anschließende Lösung des mathematischen Optimierungsproblems werden für alle Komponenten optimale Steuersignale als Steuersignaltrajektorie innerhalb eines festgelegten Prognosehorizonts berechnet. Dann werden die ersten Steuersignale jeder Komponente als Aktionen für den spezifischen Zeitschritt an die Umgebung gegeben. Die Umgebung wirkt auf die Aktionen ein und gibt die neuen Zustände und Vorhersagen an die Agentenseite des Frameworks zurück (vgl. Abb.9). Die Grundidee besteht darin, die optimalen Variablen in einem zeitdiskreten, dynamischen Modell zu jedem Zeitschritt zu berechnen, abhängig vom erwarteten zukünftigen Verhalten des Systems unter Einbeziehung der Vorhersagen der Systemzustände (Pfeiffer et al. 2014).

Dieses Verfahren setzt sich in einer Schleife fort, in der das Modell nach jedem Zeitschritt unter Berücksichtigung des aktuellen Versorgungssystemzustands und externer Prognosewerte wiederholt neu parametrisiert wird. Da der Prognosehorizont gleichbleibt und mit jedem Zeitschritt in die Zukunft erweitert wird, wird dieses Verfahren auch als Receding Horizon Control (RHC) bezeichnet (Dong und Lam 2014).

DLR-basierte Optimierung: Deep-Reinforcement-Learning-Ansatz

Der Proximal-Policy-Optimization (PPO)-Algorithmus hat sich unter den Akteur-kritischen Deep Reinforcement Learning (DRL)-Algorithmen als besonders stabile und zuverlässige Methode erwiesen (Schulman et al. 2017). Daher kann PPO zur Betriebsstrategieoptimierung eingesetzt werden.

Der PPO-Algorithmus begrenzt aktiv die Änderung der Policy bei der Berechnung der Gradienten. Die Policy bildet Systemzustände auf Aktionen gemäß den aktuellen Parametern eines neuronalen Netzes (dem "Actor") ab, die zusammen mit den Parametern eines anderen neuronalen Netzes (dem "Critic") während des Trainingsprozesses aktualisiert werden. Ziel ist es, einen möglichst großen Verbesserungsschritt auf Basis der aktuell verfügbaren Daten zu erreichen, ohne die Stabilität des Trainingsprozesses durch zu große Updates zu gefährden. Eine Möglichkeit zeigt Panten (2019).

Das Trainingsverhalten wird grundlegend durch die vorgegebene Kostenfunktion beeinflusst, die in Abhängigkeit vom Systemzustand einen skalaren Belohnungswert an den DRL-Algorithmus übergibt. Kosten werden in diesem Zusammenhang als negative Belohnungen interpretiert. Die Kostenfunktion ist als Summe gewichteter Terme

$$R_t = (g^{\text{Grenzen}} \cdot R_t^{\text{Grenzen}}) + (g^{\text{Schalten}} \cdot R_t^{\text{Schalten}}) + (g^{\text{Kosten}} \cdot R_t^{\text{Kosten}}) + (g^{\text{andere}} \cdot R_t^{\text{andere}}) \quad (2)$$

konzipiert. Hier sind R_t^{Grenzen} die Belohnungen (Rewards) für die Auswertung und Begrenzung des Zustandsraums (z. B. Temperaturen, elektrische Spitzenlast), R_t^{Schalten} die Belohnungen für die Reduzierung der Häufigkeit des Einschaltens von Systemen, R_t^{Kosten} Belohnungen aufgrund realer Kosten (z. B. Energiekosten, Steuern) und R_t^{andere} zusätzliche Belohnungen zur Beeinflussung der gelernten Regelungsstrategie (z. B. Bestrafungsterm bei Simulationsabbruch). Die Hyperparameter g^{Grenzen} , g^{Schalten} , g^{Kosten} und g^{andere} werden verwendet, um die einzelnen Terme sinnvoll zu gewichten. Da die Normierung der Ein- und Ausgänge des neuronalen Netzes außerdem einen wesentlichen Einfluss auf die Lerngeschwindigkeit bzw. das Konvergenzverhalten hat (Goodfellow et al. (2016)), werden die dem DRL-Algorithmus gegebenen kontinuierlichen Zustandsvariablen und Belohnungswerte immer auf das Intervall $[0,1]$ normiert. Für das neuronale Netz wurde die Topologie des Multi Layer Perceptron (MLP) verwendet. Der PPO-Algorithmus wurde mit einem diskreten Aktionsraum verwendet, der die Auswahl von vordefinierten Sollwerten für die einzelnen Versorgungssysteme ermöglicht.

2.3 Anwendungsfall Magnesiumdruckguss

2.3.1 Identifikation und Charakterisierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen

Die Torun Bark Magnesium GmbH ist ein mittelständisches Unternehmen, welches auf die Herstellung von Magnesiumdruckgussteilen für die unterschiedlichsten Anwendungen spezialisiert ist. Das Unternehmen auf der schwäbischen Alb fertigt Produkte für Kunden unter anderem aus den Branchen Automobil, Elektronik, Elektrowerkzeuge und Luft- und Raumfahrt. Der Maschinenpark mit Warm- und Kaltkammermaschinen von 40 bis 1600 Tonnen Schließkraft erlaubt es, Bauteile zwischen 1 g und 5000 g zu fertigen. Das Druckgussverfahren ist ein Gießverfahren, bei dem die Schmelze unter hohem Druck und mit hoher Geschwindigkeit in eine metallische Dauerform eingebracht wird (Klocke 2015). 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 eine 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 Gießtechnik für Nichteisenmetalle. Die größte Bedeutung kommt hierbei Aluminium, Zink und Magnesium zu.

Im Rahmen des Projekts wurde zunächst eine Analyse durchgeführt, die die Energieflexibilitätsmaßnahmen im Unternehmen strukturiert erfasst hat.

Im Wesentlichen lassen sich die identifizierten Energieflexibilitätsmaßnahmen bei der Torun Bark Magnesium GmbH in drei Kategorien einteilen. Maßnahmen mit Energieträgerwechsel (ETW), Maßnahmen zur Speicherung von Energie und organisatorische Maßnahmen. Im Detail sind dies:

- Wechsel der Energiequelle: Zur Produktion kann die Energiequelle zwischen Strom und Gas umgestellt werden.
- Änderung der Produktionsreihenfolge: Die Reihenfolge der Aufträge wird nicht mehr streng nach Auftragseingang oder Liefertermin abgearbeitet, sondern es wird auch das aktuelle Energieangebot berücksichtigt: Bei einem Energieüberangebot werden die energieintensiven Produkte gefertigt, und umgekehrt.
- Änderung der Losgröße: Ein aktuell gefertigter Auftrag kann unterbrochen werden, um angepasst an das aktuelle Energieangebot ein anderes Produkt herzustellen. Abstrakter formuliert: dies resultiert in einer Änderung der Losgröße, d.h. ein Produktionsauftrag wird in mehrere kleine Produktionsaufträge aufgeteilt.
- Unterbrechung des Auftrags: Analog zu der Argumentation zuvor kann ein zu fertigender Auftrag unterbrochen und später fortgesetzt werden, wenn ein großes Energieangebot vorhanden ist.
- Anpassung von Prozessparametern: Die Temperatur der Magnesiumschmelzöfen kann in gewissem Umfang variieren, ohne dass sich Verluste an der Produktionsqualität ergeben. In diesem Sinne kann ein Schmelzofen als sogenannte virtuelle Batterie betrieben werden, um bei geringen Stromkosten Energie zu speichern und andersrum bei hohen Stromkosten Energie abzugeben.

Als besonders vielversprechend konnten Maßnahmen mit Energieträgerwechsel ausgemacht werden. Der Vorteil dieser Maßnahmen ist, dass diese keine Begrenzung der Einsatzdauer haben und zu relativ niedrigen Kosten durchgeführt werden können. Im betrachteten Use Case liegt der Fokus auf den Maßnahmen zur Speicherung von Energie innerhalb der Schmelzöfen, da diese durch die bestehenden Restriktionen für eine Betrachtung mit Hilfe von Optimierern interessanter ist. Durch den Einsatz von Energiespeichern können Erzeugung und Bedarf zeitlich entkoppelt werden. Mögliche Maßnahmen sind die thermische Speicherung an den Heiz-/Kühlgeräten (FM8) sowie die elektrische Energiespeicherung auf »Aggregatsebene«, »Anlagenebene« und »Werksebene« (FM5, FM6, FM7).

2.3.2 Modellierung und Optimierung der Energieflexibilität

In einem ersten Schritt konnte die Energieflexibilität mithilfe des Energieflexibilitätsdatenmodells generisch modelliert werden. Die sowohl physische als auch kommunikationstechnische Anbindung von Sensoren und Maschinen an die Unternehmensplattform konnte evaluiert und priorisiert werden. Dabei wird für die Anbindung und das Auslesen der Sensordaten der smarte Konnektor genutzt. Dieser deckt die Anlagenrepräsentation und die Darstellung des EFDMs ab (Schott et al. 2019).

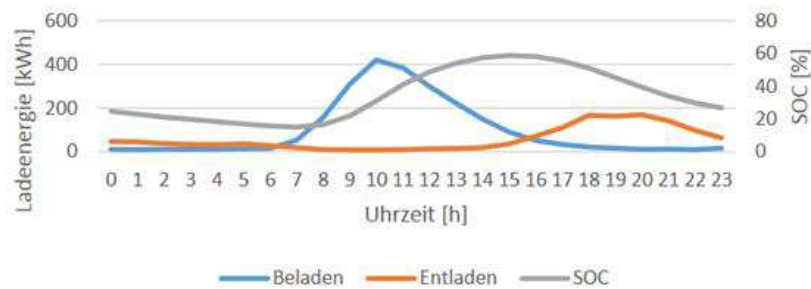


ABBILDUNG 8: BEISPIELHAFTER BELADE- UND ENTLADEVORGANG

Der Demonstrator der Torun Bark GmbH ermöglicht das Abbilden von unterschiedlichen Energieflexibilitätsmaßnahmen. Dabei sind die elektrischen Heizelemente der Öfen als Energieverbraucher und die Schmelze in den Öfen als Energiespeicher (siehe Abbildung 9) definiert.

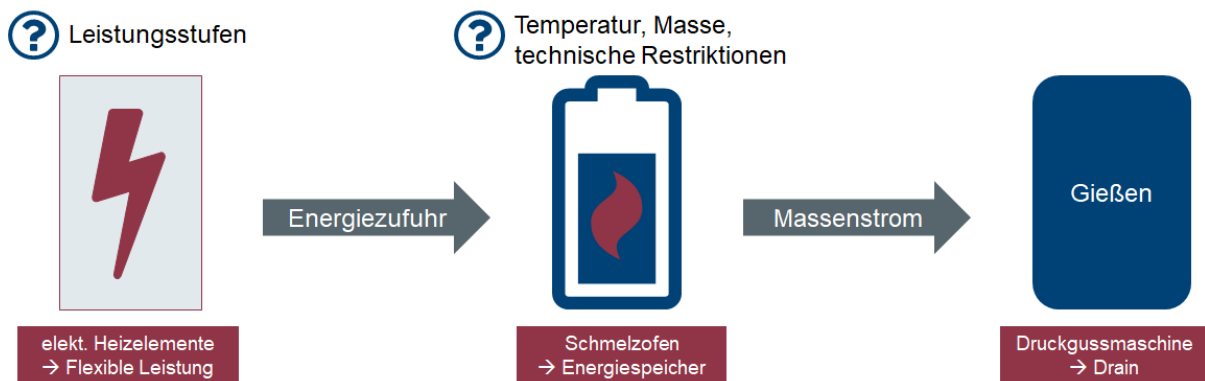


ABBILDUNG 9: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER ENERGIEFLÜSSE

Ziel der Optimierung ist eine flexibilisierbare Lastkurve für jeden Ofen, der das Anbieten von Energieflexibilitätsmaßnahmen ermöglicht. Dabei ist es erforderlich, die unterschiedlichen Öfen als Gesamtsystem zu betrachten und nicht einzeln zu optimieren ohne die Restriktionen der anderen Öfen miteinzubeziehen. Für eine flexibilisierbare Lastkurve der Öfen kommen vor allem zwei unterschiedliche Eingangsparameter des Prozesses in Betracht. Zum einen kann der Prozessparameter "Temperatur" des Ofens in einem Temperaturband geregelt werden. Hierzu wird durch die elektrischen Heizelemente dem Ofen Energie zugeführt. Die Prozessparameteränderung hinsichtlich der Temperatur ist auch während der Produktion möglich. Zusätzlich existieren Maschinenbelegungspläne, die für die Flexibilisierung der Öfen genutzt werden können. (Realität --> Dürfen natürlich keine Produktion verschieben, fiktiv möglich)

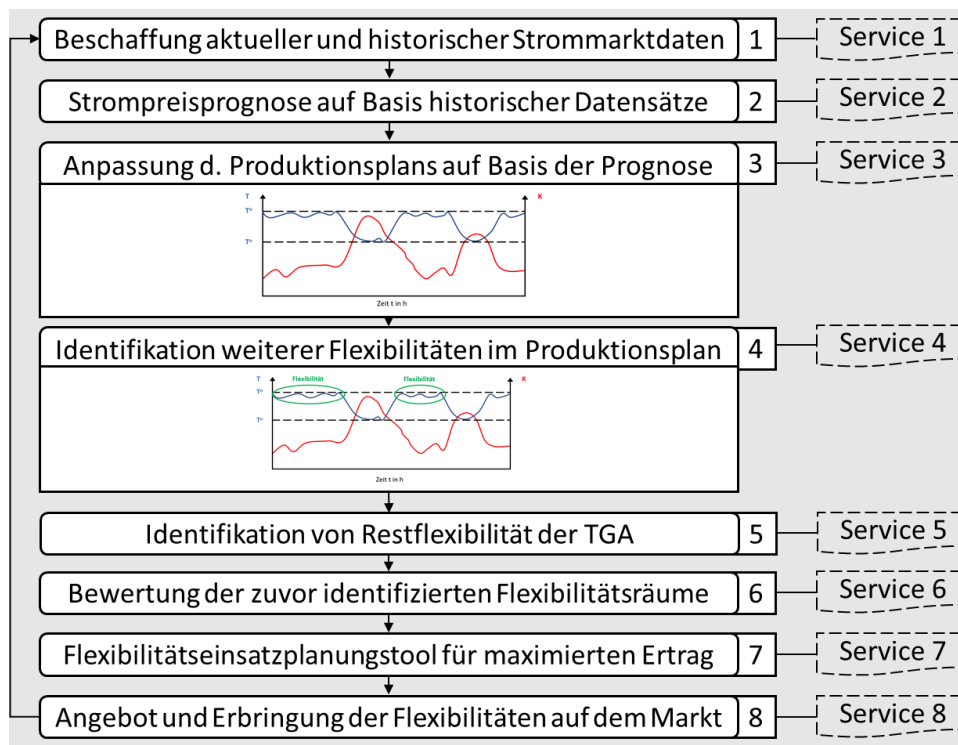


ABBILDUNG 10: PROZESS ZUR IDENTIFIKATION UND VERMARKTUNG VON RESTFLEXIBILITÄT

Beispielhafter Prozess (siehe Abbildung 10) der Optimierung und Bereitstellung der Flexibilität:

1. Informationsbeschaffung über Marktplattform (Marktplatzinformationsbeschaffungsservice)
2. Prädiktive Prognose zukünftiger Entwicklungen (Lastprognose/Produktionsplan)
3. Der Strombezug der Schmelzöfen kann zeitlich verschoben werden, solange die vordefinierten Prozessgrenzen nicht über- oder unterschritten werden. Demzufolge kann der Produktionsplan gemäß der vorgelagerten Strompreisprognose angepasst werden, um Stromkosten zu sparen
4. Anpassung der Ofenleistungskurve gemäß der Strompreisprognose lässt Raum für zusätzliche Flexibilitätspotenziale. Ihre Identifikation ermöglicht weitere Erträge bzw. Einsparungen. Der aktuelle flexibilisierbare Energiegehalt des Schmelzofens wird folgendermaßen bestimmt:

$$E_{\text{Speicher}} = m_{\text{Speicher}} \cdot c_{p_{\text{Speicher}}} \cdot (T_{\text{Speicher}_{\text{aktuell}}} - T_{\text{Speicher}_{\text{Min}}}) \quad (3)$$

5. Vermarktungsmöglichkeiten der Flexibilitäten
6. Anhand von Marktinformationen ermitteln, wo diese Flexibilitäten den größten Ertrag erzielen
7. Angebot und Erbringung der Energieflexibilitätsmaßnahmen auf dem Markt

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass durch eines der Verfahren aus Abschnitt 2.2 die freie Restflexibilität eingesetzt wird. So wäre es im Use Case möglich, den Betrieb der Druckluftversorgung zu optimieren, so dass durch diese Maßnahme kleine Abweichungen des Energiebedarfs für einen geringen Zeitraum ausgeglichen werden können. Hier am Use Case ist das Energieflexibilitätspotenzial relativ gering, dennoch, soll es repräsentativ angewendet werden um die einfache Umsetzung zu zeigen, die durch den geringen Einfluss auf den Produktionsprozess resultiert.

In der Produktion bei Torun Bark werden mehrere Teilprozessschritte durchgeführt. Durch eine Optimierung mehrerer verketteter Prozesse ist es möglich, komplexe Produktionsprozesse in einer Reihenfolge energieoptimiert zu planen. Da die Fertigung eines Endprodukts oftmals über mehrere Zwischenschritte führt, wird es Unternehmen dadurch ermöglicht, eine erhöhte Flexibilität für eine Vielzahl von Produktionsprozessen zu erreichen. Üblicherweise gibt es bei

verketteten Prozessen wiederkehrende Parameter, die bei der Produktionsplanung beachtet werden müssen. Solche Parameter wurden in der Umsetzung der Optimierung verketteter Prozesse berücksichtigt. Im Detail umfassen diese:

- Anzahl der zu fertigenden Produkte im vorliegenden Auftrag
- Rüstzeit zu Beginn der Produktion
- Mittlerer Zeitbedarf für ein Produkt
- Energiebedarf während der Rüstzeit
- Energiebedarf für ein Produkt
- Liefertermin

Beispielhafte zu berücksichtigende Parameter für verkettete Prozesse:

Prozess n								
Lfd. Nr.	Benennung	Stückzahl	Zeit			Energie in kWh		Liefertermin [h]
			Rüsten [h]	pro Stück [s]	Summe [h]	Rüsten	pro Stück	
1	Produkt Nr. 1 (n)	100	3	50	16	400	0,70	-
2	Produkt Nr. 2 (n)	50	3	22	16	400	0,60	-
3	Produkt Nr. 3 (n)	200	3	51	17	600	1,20	-

Prozess n+1								
Lfd. Nr.	Benennung	Stückzahl	Zeit			Energie in kWh		Liefertermin [h]
			Rüsten [h]	pro Stück [s]	Summe [h]	Rüsten	pro Stück	
1	Produkt Nr. 1 (n+1)	100	1	50	16	100	0,70	12
2	Produkt Nr. 2 (n+1)	50	2	22	16	200	0,60	6
3	Produkt Nr. 3 (n+1)	770	3	51	17	300	1,20	18

ABBILDUNG 11: MODELLIERUNG DES ENERGIEBEDARFS FÜR DIE PRODUKTION EINZELNER PRODUKTE

Die Grundlage für die Optimierung ist dabei die bereitgestellte Energie als Verlauf über die Zeit:

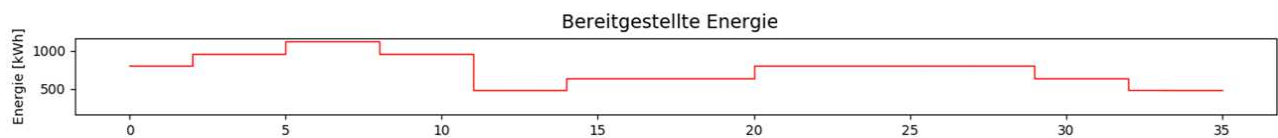


ABBILDUNG 12: ZEITLICHER VERLAUF DER ENERGIEBEREITSTELLUNG

Für die Optimierungsaufgabe kommt in diesem Anwendungsfall eine evolutionäre Optimierung zum Einsatz, als generisches Optimierungsverfahren auf Produktionsebene (siehe Abschnitt 2.2.1), das für verschiedene Produktionen parametrisiert werden kann. Der evolutionäre Optimierer verarbeitet relevante Einflussfaktoren auf Maschinenebene und schlägt geeignete Energieflexibilitätsmaßnahmen (EFM) vor. Dabei wird einerseits der Produktionsplan innerhalb eines definierten Zeithorizonts (z. B. 8h) betrachtet, andererseits wird eine Optimierung anhand von Maschinenparametern (z.B. Temperatur, Druck, Wärme) durchgeführt. Die Optimierung berücksichtigt dabei mehrere Randbedingungen, welche durch Maschinenkapazitäten und weitere Produktionsanforderungen definiert werden. Es ist notwendig, dass möglichst alle energiecharakteristischen Einflussfaktoren der evolutionären Optimierung übergeben werden, um Prozesscharakteristiken zu erfassen und somit die Güte der Optimierung zu maximieren.

Die Vorhersagen des evolutionären Optimierers stellen Näherungswerte zum realen Energieverbrauch dar. Die Vorhersagegüte hängt davon ab, wie umfassend und präzise die zugrundeliegende Modellierung der Produktionsprozesse ausfällt. In der Praxis können häufig nur eine geringe Anzahl an Einflussfaktoren erfasst werden, wodurch der Energieverbrauch des Prozesses nicht gänzlich abgebildet werden kann. Zudem können einzelne

3 FAZIT UND AUSBLICK

Das Diskussionspapier stellt die vielseitigen Arbeiten im Bereich der Optimierung innerhalb des Projekts SynErgie vor. Dabei wird Bezug auf die übergeordnete SynErgie-Referenzarchitektur genommen, in die sich die Optimierer einzubetten haben. Nicht zuletzt folgt das Konzept der Aufteilung in unternehmensseitige und marktseitige Optimierer dieser Referenzarchitektur. Das Zusammenspiel der einzelnen Optimierer wurde anhand des Anwendungsfalls beispielhaft gezeigt. Die Nutzung eines Optimierers auf jeder Ebene des Unternehmens – von Fertigungsebene bis Unternehmensleitebene – und auf Marktseite wird in der Praxis selten sein. Die Gestaltung, welche Optimierer in einem Unternehmen zum Einsatz kommen, sollte von Fall zu Fall entschieden werden und sich an den individuellen Rahmenbedingungen orientieren. Die individuelle Ausgestaltung von Optimierern innerhalb der Unternehmen wird zumeist durch die Anforderungen getrieben, die Komplexität gering zu halten, sodass in der Regel wenige Optimierer eingesetzt werden. Diese werden dann an den Entscheidungspunkten mit dem größten anzunehmenden Potenzial einer Energiekosteneinsparung installiert. Im wissenschaftlichen Diskurs stand die Frage im Vordergrund, wie mit einer Vielzahl von Optimierern in Unternehmen umgegangen werden kann, sodass auf Grund unterschiedlicher Systemgrenzen und Betrachtungszeiträumen widersprüchliche Aussagen entstehen. Ein Beispiel ist die Arbeit von Seitz et al. (2019), die eine Struktur erarbeitet, in der mehrere Optimierer zusammenarbeiten können. Ein Aspekt, der zunehmend in den Fokus rücken sollte, ist die Frage nach der bedarfsgerechten Auslegung, um eine möglichst vollständige Nutzung der Energieflexibilitätpotenziale in einem Unternehmen erreichen zu können, mit einer möglichst geringen Anzahl und Komplexität der Optimierungsschritte. Für die Unternehmensplattform lässt sich zudem die Weiterentwicklung der energieflexiblen Ansätze als weitergehendes Forschungsfeld aufzeigen. Die überwiegende Anzahl der Optimierer kann als energieorientiert bezeichnet werden (Bank et al. 2021). Eine vollständige Vermarktung und Realisierung von Flexibilitätsmärkten ist erst durch die Verwendung von energieflexiblen Optimierern möglich, die zur Beschreibung der Flexibilität das EFDM verwenden.

Auf Seiten der Marktplattform lässt sich die Zurückhaltung der Unternehmen bei der Herausgabe von Daten als Herausforderung nennen. Unternehmen neigen dazu, möglichst wenige Daten preiszugeben. Durch Lastgangdaten oder Informationen zu Kosten für die Bereitstellung von Flexibilitätsmaßnahmen könnte die Funktionalität von Optimierungsservices erweitert werden. Die entstehenden Kosten durch Änderungen im Produktionsfahrplan eines Unternehmens auf Grund von Flexibilitätsmaßnahmen sind allerdings schwer zu erheben. Darüber hinaus gelten solche Informationen als sensibel und sind besonders schützenswert. Hier ist weitere Überzeugungsarbeit zu leisten, damit ein gestärktes Vertrauen in die Sicherheit der Optimierungsservices die Zurückhaltung der Unternehmen überwinden kann.

LITERATURVERZEICHNIS

Abstracts from the 8th DACH+ Conference on Energy Informatics (2019). In: *Energy Inform 2* (S2).

Albadi, M. H.; El-Saadany, E. F. (2008): A summary of demand response in electricity markets. In: *Electric Power Systems Research* 78 (11), S. 1989–1996. DOI: 10.1016/j.epsr.2008.04.002.

Bank, L.; Rösch, M.; Unterberger, E.; Roth, S.; Rohrer, A.; Köberlein, J. et al. (2019): Comparison of Simulation-based and Optimization-based Energy Flexible Production Planning. In: *Procedia CIRP* 81, S. 294–299. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.051.

Bank, L.; Wenninger, S.; Köberlein, J.; Lindner, M.; Kaymakci, C.; Weigold, M. et al. (2021): Integrating Energy Flexibility in Production Planning and Control. An Energy Flexibility Data Model-Based Approach. In: *Journal of Production Systems and Logistics* (1). DOI: 10.15488/11249.

Battaglini, A.; Komendantova, N.; Brtnik, P.; Patt, A. (2012): Perception of barriers for expansion of electricity grids in the European Union. In: *Energy Policy* 47, S. 254–259. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.04.065.

Bauer, D.; Abele, E.; Ahrens, R.; Bauernhansl, T.; Fridgen, G.; Jarke, M. et al. (2017): Flexible IT-platform to Synchronize Energy Demands with Volatile Markets. In: *Procedia CIRP* 63, S. 318–323. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.088.

Bauernhansl, T.; Bauer, D.; Abele, E.; Ahrens, R.; Bank, L.; Brugger, M. et al. (2019): Industrie 4.0 als Befähiger für Energieflexibilität. In: A. Sauer, E. Abele und H. U. Buhl (Hg.): *Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt - Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung - SynErgie*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 245–312.

Bauernhansl, T.; Sauer, A.; Kaymakci, C.; Schlereth, A.; Schilp, J.; Kalchschmid, V. et al. (2021): Demonstratoren der Energiesynchronisationsplattform. Diskussionspapiere V4. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642373>.

Bertsch, V.; Hall, M.; Weinhardt, C.; Fichtner, W. (2016): Public acceptance and preferences related to renewable energy and grid expansion policy: Empirical insights for Germany. In: *Energy* 114, S. 465–477. DOI: 10.1016/j.energy.2016.08.022.

BMU (2021): Novelle des Klimaschutzgesetzes vom Bundestag beschlossen. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/pressemitteilung/novelle-des-klimaschutzgesetzes-vom-bundestag-beschlossen>, zuletzt geprüft am 13.10.2021.

BMWi (2021): Gesetz zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften. Gesetzentwurf der Bundesregierung. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Service/gesetz-zur-aenderung-des-eeg-und-weiterer-energierechtlicher-vorschriften.html>, zuletzt geprüft am 21.10.2021.

Buhl, H. U.; Duda, S.; Schott, P.; Weibelzahl, M.; Wenninger, S.; Fridgen, G. et al. (2021): Energieflexibilitätsdatenmodell der Energiesynchronisationsplattform. Diskussionspapiere V4. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642370>.

Bundesnetzagentur (2020): Quartalsbericht Netz- und Systemsicherheit - Gesamtes Jahr 2019. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2020/Quartalszahlen_Gesamtjahr_2019.pdf, zuletzt geprüft am 18.09.2020.

Dong, B.; Lam, K. P. (2014): A real-time model predictive control for building heating and cooling systems based on the occupancy behavior pattern detection and local weather forecasting. In: *Build. Simul.* 7 (1), S. 89–106. DOI: 10.1007/s12273-013-0142-7.

European Environmental Agency (2020): Final energy consumption by sector and fuel. Unter Mitarbeit von Stephanie Schilling. Hg. v. European Environmental Agency. Kopenhagen. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-9/assessment-4>, zuletzt aktualisiert am 17.01.2019, zuletzt geprüft am 10.07.2019.

Fridgen, G.; Potenciano Menci, S.; van Stiphoudt, C.; Schilp, J.; Köberlein, J.; Bauernhansl, T. et al. (2021): Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform. Diskussionspapiere V4. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642369>.

Gierkink, M.; Sprenger, T. (2020): Die Auswirkungen des Klimaschutzprogramms 2030 auf den Anteil erneuerbarer Energien an der Stromnachfrage. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI) gGmbH. Online verfügbar unter https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2021/07/200106_EWI-Analyse-Anteil-Erneuerbare-in-2030_final.pdf, zuletzt geprüft am 13.10.2021.

Goodfellow, I.; Bengio, Y.; Courville, A. (2016): Deep learning. Cambridge, Massachusetts, London, England: MIT Press. Online verfügbar unter <http://www.deeplearningbook.org/>.

Halvgaard, R. (2014): Model Predictive Control for Smart Energy Systems. Dissertation. Technical University of Denmark, Lyngby. Department of Applied Mathematics and Computer Science.

IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. In Press. Unter Mitarbeit von Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Cambridge University Press.

Jazayeri, P.; Schellenberg, A.; Rosehart, W. D.; Doudna, J.; Widergren, S.; Lawrence, D. et al. (2005): A Survey of Load Control Programs for Price and System Stability. In: *IEEE Trans. Power Syst.* 20 (3), S. 1504–1509. DOI: 10.1109/TPWRS.2005.852147.

Keller, F.; Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G. (2016): Enabling Energy-Flexibility of Manufacturing Systems through New Approaches within Production Planning and Control. In: *Procedia CIRP* 57, S. 752–757. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.130.

Klocke, F. (2015): *Fertigungsverfahren 5*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Kohne, T.; Ranzau, H.; Panten, N.; Weigold, M. (2020): Comparative study of algorithms for optimized control of industrial energy supply systems. In: *Energy Inform* 3 (S1). DOI: 10.1186/s42162-020-00115-7.

Körner, M.-F.; Bauer, D.; Keller, R.; Rösch, M.; Schlereth, A.; Simon, P. et al. (2019): Extending the Automation Pyramid for Industrial Demand Response. In: *Procedia CIRP* 81, S. 998–1003. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.241.

Lund, H.; Østergaard, P. A.; Connolly, D.; Ridjan, I.; Mathiesen, B. V.; Hvelplund, F. et al. (2016): Energy Storage and Smart Energy Systems. In: *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management* 11, S. 3–14. DOI: 10.5278/IJSEPM.2016.11.2.

Lund, P. D.; Lindgren, J.; Mikkola, J.; Salpakari, J. (2015): Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45, S. 785–807. DOI: 10.1016/j.rser.2015.01.057.

Mann, M. E.; Rahmstorf, S.; Kornhuber, K.; Steinman, B. A.; Miller, S. K.; Coumou, D. (2017): Influence of Anthropogenic Climate Change on Planetary Wave Resonance and Extreme Weather Events. In: *Scientific Reports* 7, 1–10. DOI: 10.1038/srep45242.

Markle-Huss, J.; Feuerriegel, S.; Neumann, D. (2016): Decision model for sustainable electricity procurement using nationwide demand response. In: Tung X. Bui und Ralph H. Sprague (Hg.): *Proceedings of the 49th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICCS)*. 5–8 January 2016, Kauai, Hawaii. Koloa, HI, 1/5/2016 - 1/8/2016. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1010–1019.

Müller, T.; Möst, D. (2018): Demand Response Potential: Available when Needed? In: *Energy Policy* 115, S. 181–198. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.12.025.

- Oeder, A.; Ronge, K.; Schimmelpfennig, J.; Winter, C.; Ahrens, R. (2021): IT-Sicherheit der Energiesynchronisationsplattform. Diskussionspapiere V4. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642372>.
- Palensky, P.; Dietrich, D. (2011): Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. In: *IEEE Trans. Ind. Inf.* 7 (3), S. 381–388. DOI: 10.1109/TII.2011.2158841.
- Panten, N. (2019): Deep Reinforcement Learning zur Betriebsoptimierung hybrider industrieller Energienetze. Darmstadt.
- Papaefthymiou, G.; Haesen, E.; Sach, T. (2018): Power System Flexibility Tracker: Indicators to track flexibility progress towards high-RES systems. In: *Renewable Energy* 127, S. 1026–1035. DOI: 10.1016/j.renene.2018.04.094.
- Pfeiffer, C. F.; Skeie, N.-O.; Perera, D. W. U. (2014): Control of temperature and energy consumption in buildings. A Review. In: *The International Journal of Energy and Environment* 4 (5), S. 471–484.
- Pfeilsticker, L.; Colangelo, E.; Sauer, A. (2019): Energy Flexibility – A new Target Dimension in Manufacturing System Design and Operation. In: *Procedia Manufacturing* 33, S. 51–58. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.04.008.
- Reinhart, G.; Bank, L.; Brugger, M.; Hieronymus, A.; Köberlein, J.; Roth, S. et al. (2020): Konzept der Energiesynchronisationsplattform. Diskussionspapier V3. Online verfügbar unter <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-602416.html>.
- Reinhart, G.; Bank, L.; Brugger, M.; Roth, S.; Simon, P.; Bauernhansl, T. et al. (2018): Konzeption Der Energiesynchronisationsplattform. Diskussionspapier V2.
- Rösch, M.; Bauer, D.; Haupt, L.; Keller, R.; Bauernhansl, T.; Fridgen, G. et al. (2019): Harnessing the Full Potential of Industrial Demand-Side Flexibility: An End-to-End Approach Connecting Machines with Markets through Service-Oriented IT Platforms. In: *Applied Sciences* 9 (18), S. 3796. DOI: 10.3390/app9183796.
- Sauer, A.; Abele, E.; Buhl, H. U. (2019a): Einleitung. In: A. Sauer, E. Abele und H. U. Buhl (Hg.): *Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt - Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung - SynErgie*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 4–8.
- Sauer, A.; Abele, E.; Buhl, H. U. (Hg.) (2019b): *Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt - Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung - SynErgie*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Schilp, J.; Bank, L.; Köberlein, J.; Bauernhansl, T.; Sauer, A.; Kaymakci, C. et al. (2021): Optimierung auf der Energiesynchronisationsplattform. Diskussionspapiere V4. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642371>.
- Schott, P.; Ahrens, R.; Bauer, D.; Hering, F.; Keller, R.; Pullmann, J. et al. (2018): Flexible IT platform for synchronizing energy demands with volatile markets. In: *it - Information Technology* 60 (3), S. 155–164. DOI: 10.1515/itit-2018-0001.
- Schott, P.; Sedlmeir, J.; Strobel, N.; Weber, T.; Fridgen, G.; Abele, E. (2019): A Generic Data Model for Describing Flexibility in Power Markets. In: *Energies* 12 (10), S. 1893. DOI: 10.3390/en12101893.
- Schulman, J.; Wolski, F.; Dhariwal, P.; Radford, A.; Klimov, O. (2017): Proximal Policy Optimization Algorithms. Online verfügbar unter <https://arxiv.org/pdf/1707.06347>.
- Schultz, C. (2018): System zur energieorientierten Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung. Dissertation. Technische Universität München, München.
- Seifermann, S.; Abele, E.; Sauer, A.; Bauer, D. (2019): Integrierte Betrachtung technischer, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Aspekte industriellen Demand-Side Managements. In: *Internationaler ETG-Kongress 2019: Das Gesamtsystem im Fokus der Energiewende. 08. und 09. Mai 2019, Esslingen am Neckar. - Frankfurt am Main*.

Seitz, P.; Abele, E.; Bank, L.; Bauernhansl, T.; Colangelo, E.; Fridgen, G. et al. (2019): IT-based Architecture for Power Market Oriented Optimization at Multiple Levels in Production Processes. In: *Procedia CIRP* 81, S. 618–623. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.165.

Steurer, M. (2017): Analyse von Demand Side Integration im Hinblick auf eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung. Univ. Stuttgart, Diss., 2017.

Süße, M.; Prell, B.; Stoldt, J.; Strehle, H.-M.; Richter, M.; Schlegel, A.; Putz, M. (2019): Load and energy management for factories through multi-stage production planning and optimization. In: *Procedia CIRP* 80, S. 257–262. DOI: 10.1016/j.procir.2019.01.076.

Uba (2021a): Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch und am Bruttoendenergieverbrauch. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/de_indikator_ener-04_erneuerbare-energien_2021-03-16.pdf, zuletzt geprüft am 13.10.2021.

Uba (2021b): Erneuerbare Energie in Zahlen. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>, zuletzt geprüft am 13.10.2021.

Uba (2021c): Treibhausgas-Emissionen in Deutschland seit 1990 nach Kategorien der UNFCCC-Berichterstattung. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/bilder/dateien/2021-03-15_thg_crf_plus_1a_details_ci_1990-2019_vjs2020.pdf, zuletzt geprüft am 13.10.2021.

United Nations (2015): Transforming our world: The 2030 Agenda for sustainable development. New York: United Nations. Online verfügbar unter <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>, zuletzt geprüft am 05.08.2019.

Weber, T.; Strobel, N.; Kohne, T.; Wolber, J.; Abele, E. (2018): Realistic modeling of a combined heat and power plant in the context of mixed integer linear programming. In: *Energy Inform* 1 (S1), S. 1098. DOI: 10.1186/s42162-018-0037-z.

