

Diskussionspapier

EXECUTIVE SUMMARY: KONZEPT DER ENERGIE- SYNCHRONISATIONS- PLATTFORM



Konzept der Energiesynchronisationsplattform

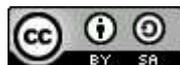
Diskussionspapiere V4 Executive Summary

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-642368>

Diese Veröffentlichung 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

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

Technische Universität Darmstadt

Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)

Otto-Berndt-Straße 2
64287 Darmstadt
www.ptw.tu-darmstadt.de

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS

Nordostpark 84
90411 Nürnberg
www.iis.fraunhofer.de

KOORDINATOR: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

Andreas Schlereth

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

Sergio Potenciano Menci

Technische Universität Darmstadt

Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

Martin Lindner

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS

Andreas Oeder

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>

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINFÜHRUNG.....	1
1.1	EINORDNUNG UND MOTIVATION.....	1
1.2	DAS PROJEKT SYNÉRGIE.....	3
1.3	ZIELE UND VISION DER ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM	4
2	DAS KONZEPT DER ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM	6
2.1	REFERENZARCHITEKTUR DER ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM.....	6
2.2	DAS ENERGIEFLEXIBILITÄTSDATENMODELL DER ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM.....	6
2.3	OPTIMIERUNG AUF DER ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM.....	7
2.4	IT-SICHERHEIT DER ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM.....	7
2.5	DEMONSTRATOREN DER ENERGIEFLEXIBILITÄTSPLATTFORM	8
3	FAZIT UND AUSBLICK.....	9
	LITERATURVERZEICHNIS.....	10

1 EINFÜHRUNG

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 (BMWi 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 (Gierkink 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.

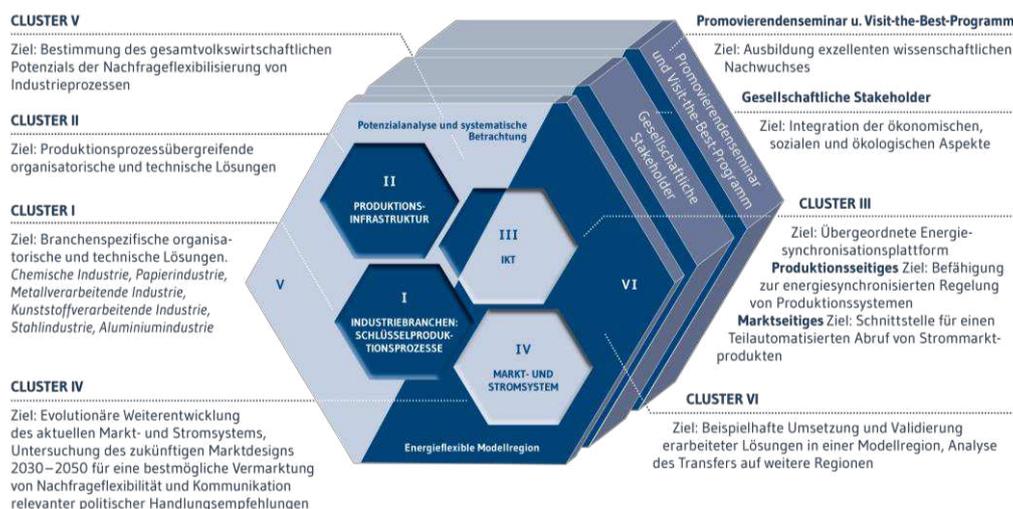


ABBILDUNG 1: STRUKTUR DES KOPERNIKUS-PROJEKTS SYNERGIE

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 Abschnitt 2.1). Hierfür war insbesondere die Identifikation und Entwicklung von Schnittstellen sowie die Definition eines Datenmodells für Energieflexibilität (siehe Abschnitt 2.2) 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 Abschnitt 2.3). 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. Sie werden im Forschungsumfeld sowie, gemeinsam mit produzierenden Unternehmen und Netzbetreibern, im industriellen Umfeld und der Energieflexiblen Modellregion Augsburg aufgebaut (siehe Abschnitt 2.5). 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

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

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 Abschnitt 2.4).

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.

2 DAS KONZEPT DER ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM

In der vierten Auflage ist das Diskussionspapier erstmals als Reihe „Diskussionspapiere V4 – Konzept der Energiesynchronisationsplattform“ mit fünf thematisch eigenständigen Papieren erschienen. Alle Diskussionspapiere starten mit einer einheitlichen Einleitung, um Motivation, Ausgangssituation und Zielsetzung des Projekts sowie der Energiesynchronisationsplattform darzulegen. Sie ermöglicht eine Einordnung der Papiere und gewährleistet deren Eigenständigkeit.

2.1 Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform

Die Energiesynchronisationsplattform bildet den gesamten Prozess des informationstechnisch automatisierten Energieflexibilitätshandels von der Maschine bis zum Energiemarkt ab. Die ESP ist somit das Gesamtkonzept, welches industrielle Nachfrageflexibilität ermöglicht. Seit der Vorstellung der Referenzarchitektur in Reinhart et al. (2020) wurde zum einen die Entwicklung einzelner Services eingestellt, zum anderen ist die MP nicht mehr wie bisher als Broker-Architektur konzipiert. Sie dient nun als erster Kontaktpunkt zwischen Industrieunternehmen und Serviceanbietern und nimmt eine Vermittlerrolle ein. Die UP erlangt dadurch eine wichtigere Rolle bezogen auf die Kommunikation innerhalb der ESP, da jede Kommunikation mit Services nun über die UP erfolgt. Darüber hinaus wird in diesem ausführlichen Diskussionspapier eine Sammlung der verschiedenen Services zur Verfügung gestellt, die im Rahmen von SynErgie für die MP und die UP entwickelt wurden. Jeder vorgestellte Service enthält eine kurze Beschreibung, die relevanten Inputs und Outputs sowie weitere relevante Anmerkungen. Des Weiteren wird ein Überblick über die primären Referenzprozesse gegeben, die für den Betrieb und die Vermarktung von Flexibilität betrachtet werden. Diese werden anhand dreier möglicher Anwendungsfälle dargestellt. So werden Logik und Interaktionen der verschiedenen Prozesse innerhalb der ESP aufgezeigt.

Das Diskussionspapier „Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform“ (Fridgen et al. 2021) kann hier abgerufen werden: <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642369>.

2.2 Das Energieflexibilitätsdatenmodell der Energiesynchronisationsplattform

Dieses Diskussionspapier zeigt das im Rahmen des SynErgie-Projektes entwickelte und innerhalb der ESP verwendete Datenmodell zur Beschreibung von Energieflexibilität. Die Verwendung eines standardisierten Datenmodells vereinfacht und ermöglicht eine (teil-)automatisierte Kommunikation zwischen den verschiedenen Parteien innerhalb des Energiesystems. Durch ein übergreifendes Modell, das alle relevanten Parteien innerhalb der ESP verstehen und selbst nutzen, werden mögliche Fehlerquellen in der Übersetzung verschiedener Modelle reduziert. Der Fokus des Energieflexibilitätsdatenmodells (EFDM) liegt dabei auf der Abbildung technisch und energetisch relevanter Informationen in einer Granularität, die eine Kommunikation von Flexibilität zwischen Industrieunternehmen und Energiemärkten ermöglicht. Die generische Beschreibung beschränkt sich daher auf ein Mindestmaß an Parametern und Kennzahlen, die alle technischen und energetisch relevanten Informationen enthalten, um Energieflexibilität für alle Anwendungsfälle der ESP zu beschreiben. Das EFDM ermöglicht so die standardisierte Kommunikation von Flexibilität in einem generischen Format unabhängig von der eigentlich physisch zugrundeliegenden Flexibilität und somit zwischen unternehmensseitigen Maschinen und Anlagen auf der einen Seite und dem Energiemarkt auf der anderen

Seite. Dieses Diskussionspapier thematisiert die Weiterentwicklung des EFDM und dessen Evaluation, Validierung und Erweiterung anhand von Prototypen.

Das Diskussionspapier „Das Energieflexibilitätsdatenmodell der Energiesynchronisationsplattform“ (Buhl et al. 2021) kann hier abgerufen werden: <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642370>.

2.3 Optimierung auf der Energiesynchronisationsplattform

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.

Das Diskussionspapier „Optimierung auf der Energiesynchronisationsplattform“ (Schilp et al. 2021) kann hier abgerufen werden: <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642371>.

2.4 IT-Sicherheit der Energiesynchronisationsplattform

Die ESP mit ihren Teilplattformen MP und UP nutzt IKT-Infrastruktur zum Austausch von Informationen. Dabei ist neben der Kommunikation in internen Firmennetzen auch die Nutzung öffentlicher Kommunikationsnetze ein wichtiger Bestandteil. Neben dem Schutz vertraulicher Produktionsdaten und von Firmen-Know-how spielt der Manipulationsschutz der Flexibilitätsangebote und der Umsetzungssignale, sowie deren Verfügbarkeit eine wichtige Rolle, da diese direkte Rückwirkung auf das Stromnetz haben können. 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 verschiedene technische und organisatorische Sicherheitsmaßnahmen definiert, welche in diesem Diskussionspapier thematisiert werden. Mittels Threat Modeling werden bei der Entwicklung der Komponenten und Services der ESP mögliche Bedrohungen sowie Schwachstellen oder das Fehlen geeigneter Schutzmaßnahmen ermittelt. Die Definition von Sicherheitslevels für die Services ermöglichen eine Abstufung der IT-Sicherheitsanforderungen und der zu ergreifenden IT-Sicherheitsmaßnahmen, die

sich nach dem jeweiligen Schutzbedarf der zu verarbeitenden Daten richten. Das Security-Life Cycle Management begleitet dabei die Plattformen in allen Entwicklungs- und Betriebsphasen. Durch ein zugriffsbasiertes Rollenmodell werden die Aufgaben und damit die Zugriffsrechte von Rollen bestimmt. Dabei stehen eine sinnvolle Aufgabentrennung, das Need-to-Know-Prinzip, sowie das Least-Privilege-Prinzip im Vordergrund. Mit einer sogenannten Public-Key-Infrastruktur werden Identitäten plattformübergreifend und, wenn erforderlich, auch innerhalb von Plattformen bescheinigt, so dass die an einer Kommunikation beteiligten Partner und Komponenten Gewissheit über die Identität der Quellen und Empfänger ihrer Informationen haben. Für die physische und logische Infrastruktur der ESP sind ebenfalls Maßnahmen vorgesehen, etwa in Bezug auf die Netzwerkinfrastruktur, die Identitäts- und Berechtigungsverwaltung und das Logging.

Das Diskussionspapier „IT-Sicherheit der Energiesynchronisationsplattform“ (Oeder et al. 2021) kann hier abgerufen werden: <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642372>.

2.5 Demonstratoren der Energieflexibilitätsplattform

Zur Validierung der entwickelten Konzepte und Lösungen für IT-Architektur, Services und Datenmodell sowie der technischen Machbarkeit des automatisierten und standardisierten Energieflexibilitätshandels, werden Unternehmensplattform und Marktplattform sowohl im Forschungsumfeld als auch im industriellen Umfeld erprobt. Darüber hinaus wird die Energiesynchronisationsplattform als Demonstrationsplattform mit innovativen regionalen Marktmechanismen in einem konzeptionellen Testbetrieb in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg unter Beteiligung der ansässigen Unternehmen und Netzbetreiber getestet. Dieses Diskussionspapier gibt einen Überblick und fasst die aktuellen Entwicklungen zusammen. Dazu werden die in der vorigen Auflage des Diskussionspapiers eingeführten Steckbriefe aufgegriffen und inhaltlich erweitert. Es wird dabei jeweils auf die beteiligten Partner, den Mehrwert und die Zielsetzung, die beteiligten Services und Komponenten, den generellen Aufbau, das Konzept und die Architektur sowie die Herausforderungen und Lessons Learned eingegangen.

Das Diskussionspapier „Demonstratoren der Energiesynchronisationsplattform“ (Bauernhansl et al. 2021) kann hier abgerufen werden: <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642373>.

3 FAZIT UND AUSBLICK

Die vorliegende Executive Summary gibt einen Überblick über die fünf erschienenen Diskussionspapiere zum aktuellen Arbeitsstand des Cluster Informations- und Kommunikationstechnik des Kopernikus-Projekts SynErgie. Die Diskussionspapiere sollen Sie, liebe Leserinnen und Leser aus Forschung und Praxis, zur Diskussion der bisherigen Ergebnisse anregen. Wir freuen uns über Ihre Rückmeldungen. Nutzen Sie hierfür gerne die im Vorwort angegebenen Kontakte. Auf Basis unserer gemeinsamen Diskussionen sollen die entwickelten Lösungen kontinuierlich verbessert und weiterentwickelt werden.

Die in den Diskussionspapieren vorgestellten Konzepte und Lösungen können somit nicht als endgültig angesehen werden. Insbesondere in Bezug auf die Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform werden sich neue Herausforderungen ergeben, welche Anpassungen der Architektur notwendig machen können, wenn es auf die Systemimplementierung zugeht.

Im weiteren Projektverlauf wird die Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform mit ihren Konzepten der Unternehmensplattform und Marktplattform weiter detailliert. Auch das Energieflexibilitätsdatenmodell als zentrale Grundlage der Interaktion verschiedener Komponenten und Services sowie das IT-Sicherheitskonzept der Plattformen werden fortlaufend aktualisiert und weiterentwickelt. Innerhalb des Projektes gibt es vielseitige Arbeiten im Bereich der Optimierung, welche im Rahmen des entsprechenden Diskussionspapiers in den übergeordneten Rahmen der Referenzarchitektur eingebettet wurden. Zur Validierung der entwickelten Konzepte und Lösungen und der technischen Machbarkeit des automatisierten und standardisierten Energieflexibilitätshandels wird die prototypische Umsetzung der Plattformen und zugehörigen Services anhand von Demonstratoren weiter vorangetrieben und bis Ende 2022 praktisch evaluiert.

LITERATURVERZEICHNIS

- 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.epr.2008.04.002.
- 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-plattform 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.
- 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

