

Diskussionspapier

ENERGIEFLEXIBILITÄTS- DATENMODELL DER ENERGIE- SYNCHRONISATIONS- PLATTFORM



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Das Energieflexibilitätsdatenmodell 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-642370>

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>)

Kernkompetenzentrum 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

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

AUTOR:INNEN

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

Prof. Dr. Hans Ulrich Buhl

Sebastian Duda, Dr. Paul Schott, Dr. Martin Weibelzahl, Simon Wenninger

Prof. Dr. Gilbert Fridgen

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-Projektkonsortium, 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

Das im Rahmen von SynErgie entwickelte Energieflexibilitätsdatenmodell dient zur generischen und standardisierten Beschreibung sowie Modellierung von Energieflexibilität. Das Datenmodell ermöglicht eine (teil-)automatisierte informationstechnische Verarbeitung unterschiedlichster Flexibilität. Ziel ist es, ein umfassendes Datenmodell zu entwickeln, um Flexibilität in einem Flexibilitätsraum und konkreten Flexibilitätsmaßnahmen abzubilden. Dabei wird kein vollständig realitätsgetreues Abbild einer Flexibilität angestrebt. Der Fokus liegt auf der Abbildung technisch und energetisch relevanter Informationen in einer Granularität, die eine Kommunikation von Flexibilität zwischen Industrieunternehmen und Energiemärkten ermöglicht.

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	NOTWENDIGKEIT EINES STANDARDISIERTEN DATENMODELLS	5
2	DAS ENERGIEFLEXIBILITÄTSDATENMODELL	7
2.1	ZIEL UND ZWECK DES EFDMS.....	7
2.2	KLASSEN DES EFDMS.....	8
2.2.1	<i>Flexible Last</i>	8
2.2.2	<i>Energiespeicher</i>	10
2.2.3	<i>Abhängigkeiten</i>	11
2.2.4	<i>Energieflexibilitätsmaßnahmen</i>	11
2.3	INFORMATIONSTECHNISCHE UMSETZUNG.....	13
3	EXEMPLARISCHE ANWENDUNG.....	14
4	DISKUSSION UND LIMITATIONEN	17
5	AUSBLICK.....	18
	LITERATURVERZEICHNIS.....	19

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Struktur des Kopernikus-Projekts SynErgie.....	4
Abbildung 2: Klassen des Energieflexibilitätsdatenmodells	8
Abbildung 3: Ausschnitt des JSON Schema zur Beschreibung des EFDM	13
Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Beispielsystems aus der ETA -Fabrik.....	14
Abbildung 5: EFDM des Beispielsystems im JSON Format	16

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Kennzahlen der Klasse „Flexible Last“	9
Tabelle 2: Kennzahlen der Klasse „Energiespeicher“	10
Tabelle 3: Kennzahlen der Klasse „Abhängigkeiten“	11
Tabelle 4: Kennzahlen der Klasse „Energieflexibilitätsmaßnahme“	12
Tabelle 5: Berechnete Kennzahlen für den Speicher des Beispielsystems - Teil 1	14
Tabelle 6: Berechnete Kennzahlen für den Speicher des Beispielsystems - Teil 2	15
Tabelle 7: Berechnete Kennzahlen für die Flexible Last „Kälteaggregat“ des Beispielsystems.....	15

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 (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

² Vorläufige Angabe

Kraftwerken sind diese volatilen erneuerbaren Energiequellen nicht regelbar und stellen das Stromnetz vor die Herausforderung, 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.

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).

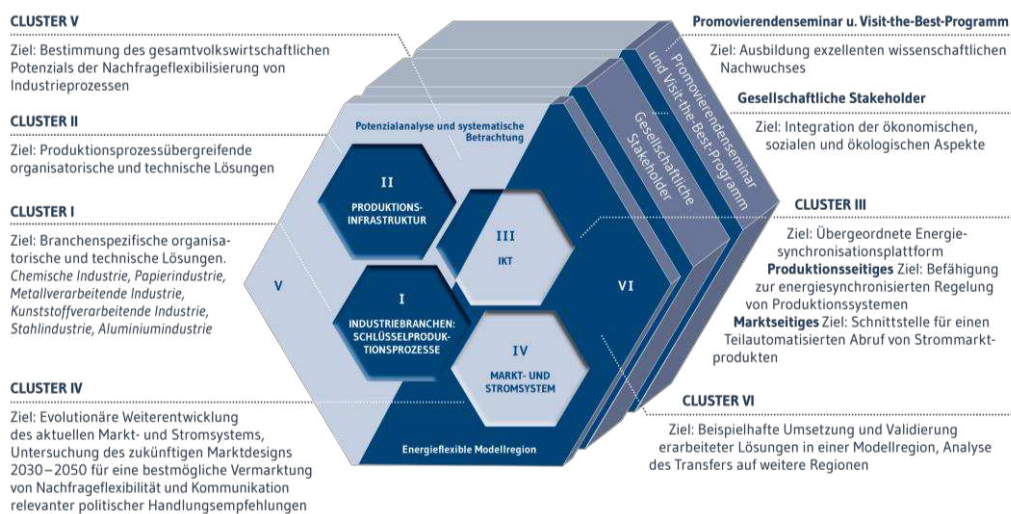


ABBILDUNG 1: STRUKTUR DES KOPERNIKUS-PROJEKTS SYNERGIE

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](#)

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

[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 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 Akzeptanzhöhung sind die Harmonisierung und Standardisierung eines erforderlichen Datenmodells und einer Schnittstelle zum sicheren Datenaustausch zwischen produzierenden Unternehmen und den Strommärkten.

1.4 Notwendigkeit eines standardisierten Datenmodells

Um die zuvor erwähnte Flexibilitätslücke u.a. durch DR zu schließen, spielt das Thema Digitalisierung eine wichtige Rolle (Bauer et al. 2020). Durch digitale Kommunikationstechnologien ist es möglich, lokale Engpässe im Stromnetz (Smart Grid) zu identifizieren und die daraus entstehenden Lücken durch entsprechende Maßnahmen zu schließen (Schott et al. 2019). Damit dies gelingt, ist eine einheitliche Beschreibung von Flexibilitäten von entscheidender Bedeutung, um die unterschiedlichen Arten von Flexibilität wirtschaftlich für eine sichere Stromversorgung einsetzen zu können. Die Verwendung eines standardisierten Datenmodells zur Beschreibung von Energieflexibilität vereinfacht und ermöglicht dabei eine 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. Durch die

Entwicklung und Standardisierung eines Datenmodells können durch die Ermöglichung eines standardisierten Datenaustausches zudem Lock-In Effekte für Flexibilitätsanbieter und Nutzer der ESP vermieden werden. Sollten sich Anforderungen von Unternehmen ändern oder andere Anreize den Wechsel eines Serviceanbieters erfordern, kann dies ohne hohe Kosten durch Schnittstellenanpassungen erfolgen. Durch ein standardisiertes Datenmodells kann der Informationsaustausch verbessert werden, der Zugang zu Services (Schott et al. 2019) und das Angebot an Flexibilitätsbereitstellungen erhöht und das Plattform-Ökosystem insgesamt vergrößert werden. Unter diesem Gesichtspunkt ist innerhalb der zweiten Förderphase das Energieflexibilitätsdatenmodell (EFDM) weiterentwickelt und die einzelnen Kennzahlen mit Hilfe von Prototypen evaluiert, validiert und erweitert worden.

2 DAS ENERGIEFLEXIBILITÄTSDATENMODELL

Die auf der Energiesynchronisationsplattform ausgetauschten Informationen zu Energieflexibilitäten geben dem entwickelten Energieflexibilitätsdatenmodell (EFDM) seinen Namen. Das EFDM ermöglicht die standardisierte Kommunikation von Flexibilität in einem generischen Format unabhängig der eigentlich physisch zugrundeliegenden Flexibilität und somit zwischen unternehmensseitigen Maschinen und Anlagen auf der einen Seite und dem Energiemarkt auf der anderen Seite (Bank et al. 2021). Die Validierung des Datenmodells erfolgte in Zusammenarbeit mit der energieintensiven Industrie des SynErgie-Konsortiums (Schott et al. 2019). Unterschiedliche Anforderungen von Stakeholdern und Unternehmen an Flexibilitäten wurden erhoben und sind in die Entwicklung des EFDMs eingeflossen. Auch eine Anwendbarkeit auf weitere Sektoren ist möglich (Schott et al. 2019).

2.1 Ziel und Zweck des EFDMs

Das Ziel des EFDMs ist die Modellierung und Beschreibung von Energieflexibilität unter technischen und energetischen Aspekten in einem generischen Format. Dadurch soll eine standardisierte Kommunikation von in Industrieunternehmen erfasster Energieflexibilität zur Vermarktung auf Energiemärkten ermöglicht werden. Der Begriff Energieflexibilität kann dabei definiert werden als die „Fähigkeit eines Produktionssystems, sich schnell und prozesseffizient an Änderungen des Energiemarkts anzupassen“ (VDI-Richtlinie 5207 Blatt 1). Eine energieflexible Fabrik ermöglicht eine potentielle wirtschaftliche Nutzung der energetischen Flexibilität (VDI-Richtlinie 5207 Blatt 1). Der zeitliche Einsatz einer Energieflexibilität wird in der Definition der Bundesnetzagentur spezifiziert, die Flexibilität als „die Veränderung von Einspeisung oder Entnahme in Reaktion auf ein externes Signal (Preissignal oder Aktivierung), mit dem Ziel eine Dienstleistung im Energiesystem zu erbringen“ (Bundesnetzagentur 2017), beschreibt.

Das EFDM bildet Energieflexibilität in einem Flexibilitätsraum und konkreten Flexibilitätsmaßnahmen ab. Die Erzeugung eines digitalen Zwillings als virtuelles und vollständig realitätsgetreues Abbild einer Energieflexibilität wird nicht angestrebt. 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. Dadurch soll zum einen die Komplexität und die Datenmenge der ausgetauschten Informationen beschränkt werden. Zum anderen soll der Austausch sensibler Produktions- und Prozessdaten vermieden werden.

Das EFDM ist eine zentrale Grundlage für alle darauf aufbauenden Services innerhalb und außerhalb der ESP. Ausgehend davon können Datenmodelle für spezielle Anwendungsfälle, beispielsweise zur Optimierung (siehe Diskussionspapier „[Optimierung auf der Energiesynchronisationsplattform](#)“ (Schilp et al. 2021)), abgeleitet werden, die nur einen Teil der Informationen des zentralen Datenmodells beinhalten. Um zusätzliche Informationen, wie z.B. Energiemärkte, auf denen eine Flexibilität vermarktet werden soll, hinzuzufügen, kann ein servicespezifischer Wrapper genutzt werden.

2.2 Klassen des EFDMs

Ein EFDM stellt den Rahmen zur generischen Beschreibung von Flexibilitätsräumen und Flexibilitätsmaßnahmen mithilfe von Kennzahlen und technischen Parametern dar. Ein Flexibilitätsraum beschreibt die Möglichkeiten eines energieflexiblen Systems, seine Leistung gegenüber dem Referenzbetrieb zu variieren. Dieses technische energieflexible System wird mit den Klassen „flexible Last“, „Abhängigkeit“ und „Energiespeicher“ modelliert. Über die Ausprägung der Kennzahlen der genannten Klassen werden die Freiheitsgrade der Energieflexibilität definiert und somit die zulässigen Möglichkeiten des technischen Systems, seine Leistung zu variieren, als Flexibilitätsraum beschrieben (Lindner et al. 2022).

Neben den drei genannten Klassen zur Beschreibung des Flexibilitätsraums eines Systems, beinhaltet das EFDM auch die Klasse „Energieflexibilitätsmaßnahme“, die eine konkrete Leistungsänderung des Systems innerhalb seines Flexibilitätsraums beschreibt. Eine flexible Last modelliert ein technisches System oder das Zusammenspiel verschiedener technischer Systeme, die das Potenzial haben, eine Leistungsänderung hervorzubringen. Ob es sich bei dem technischen System um einen Erzeuger oder Verbraucher von Leistung handelt, ist dabei irrelevant.

Eine Übersicht über die verwendeten EFDM Klassen Flexible Last, Abhängigkeiten, Energiespeicher und Energieflexibilitätsmaßnahmen gibt Abbildung 2, mit jeweils einer kurzen Beschreibung. Für weitere Beschreibungen, Herleitungen und Definitionen sei auf (Schott et al. 2019) verwiesen.

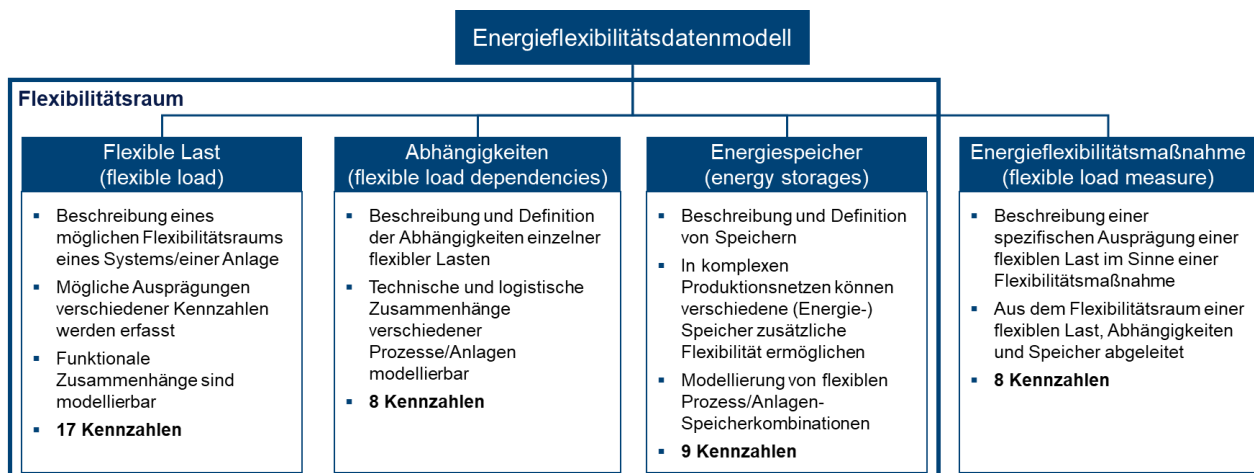


ABBILDUNG 2: KLASSEN DES ENERGIEFLEXIBILITÄTSDATENMODELLS

2.2.1 Flexible Last

Bei der Definition einer flexiblen Last werden lediglich Beschränkungen der Leistungsänderung bzw. der energetischen Freiheitsgrade an sich berücksichtigt. Abhängigkeiten zu anderen flexiblen Lasten oder zu Energiespeichern werden nicht in der Klasse „flexible Last“ modelliert. In Tabelle 1 sind die zur Beschreibung der Klasse „flexible Last“ relevanten Kennzahlen sowie ihrer Ausprägungen und Definitionen aufgeführt.

TABELLE 1: KENNZAHLEN DER KLASSE „FLEXIBLE LAST“

Kennzahl	Variable	Format	Einheit	Erläuterung
Energieflexibilitäts-ID	ID	String	–	Die ID der flexiblen Last zur Identifikation und Zuordnung innerhalb eines IT-Systems in einem Unternehmen und bei der Weiterverarbeitung durch Services auf der Marktplattform.
Reaktionsdauer	t_{tot}	$2^{\mathbb{R}^+}$	s	Die Zeit zwischen dem Abruf und dem Beginn einer Flexibilitätsmaßnahme. Diese Kennzahl ist für die korrekte und rechtzeitige Ausführung von Flexibilitätsabrufen von Bedeutung.
Gültigkeit	T_G	$2^{\mathcal{H}}$ × {'start', 'total', 'end'}	s	Die Teilmenge des Planungshorizonts, bei der die flexible Last verfügbar ist. Die drei Referenzen („start“, „total“ und „end“) definieren, welche Teile der Gesamtzeit der zugehörigen flexiblen Maßnahme in der Gültigkeit liegen müssen.
Leistungszustände	P	$2^{\mathbb{R}}$	kW	Die Leistungen, mit denen die flexible Last während jeder der (Anzahl der Veränderungen + 1) Halteperioden laufen kann. Ein positives Vorzeichen bedeutet, dass die flexible Last einen Anstieg des Stromverbrauchs verursacht, negative Leistungszustände stellen einen Rückgang des Verbrauchs dar.
Halteperiode	T_H	$2^{\mathbb{R}}$	s	Die Länge der Zeiträume, in denen die flexible Last in ihren Leistungszuständen läuft. Jede Halteperiode ist die Zeit mit konstantem Leistungszustand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Modulationen, einschließlich Aktivierung und Deaktivierung.
Abrufhäufigkeit	N_A	$2^{\mathbb{N}}$	-	Die zulässige Anzahl der Nutzungen der flexiblen Last im Planungshorizont.
Anzahl an Veränderungen (des Leistungszustands)	N_{Mod}	$2^{\mathbb{N}}$	-	Die Anzahl der zulässigen Leistungszustandsänderungen innerhalb einer Nutzung einer flexiblen Last, wobei die beiden Modulationen, die der anfänglichen Aktivierung und der endgültigen Deaktivierung entsprechen, nicht berücksichtigt werden.
Leistungsgradient Aktivierung	∇P_{Akt}	$ 2^{\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}} $	$\text{kW} \cdot \text{s}^{-1}$	Der Gradient, mit dem die Leistungskurve bei der anfänglichen Aktivierung ihre Leistung ändern kann.
Leistungsgradient Veränderungen (des Leistungszustands)	∇P_{Mod}	$ 2^{\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}} $	$\text{kW} \cdot \text{s}^{-1}$	Analog zum Aktivierungsgradienten für die Modulationsperioden.
Leistungsgradient Deaktivierung	∇P_{Dea}	$ 2^{\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}} $	$\text{kW} \cdot \text{s}^{-1}$	Analog zum Aktivierungsgradienten für die endgültige Deaktivierungsperiode.
Regenerationsdauer	t_{Reg}	$2^{\mathbb{R}^+}$	s	Die Zeit, für die nach Beendigung der Deaktivierung einer Maßnahme aus der flexiblen Last keine (andere) Maßnahme derselben flexiblen Leistung aktiviert werden darf.
Kosten	c	$2^{\mathbb{R}}$	€	Die mit der Nutzung der flexiblen Last verbundenen Kosten, Stromkosten ausgenommen. Die Kosten einer flexiblen Last werden dabei in den Ausprägungen „Arbeitskosten“, „Leistungskosten“ und „Kosten je Flexibilitätsmaßnahme“ angegeben.
Spannungsebene	V_L	$2^{\mathbb{R}}$	kV	Die Angabe der Spannungsebenen an der die Flexible Last ans Netz angeschlossen ist. Hierbei zählt die Spannungsebene am Netzverknüpfungspunkt und nicht eine davon abweichende Spannungsebene in einem etwaigen Unternehmensnetz.
Vermarktungsdeadline	t_D	\mathcal{H}	s	Die Vermarktungsdeadline gibt den spätmöglichen Zeitpunkt an, zu dem die Flexible Last vermarktet werden kann. Der Zeitpunkt liegt vor Beginn der Gültigkeit. Mit der Vermarktungsdeadline wird die flexible Last aus dem Markt genommen
Preis	p	$2^{\mathbb{R}}$	€	Die Variable gibt den Preis einer flexiblen Last in den Ausprägungen „Arbeitspreis“, „Leistungspreis“ und „Preis je Flexibilitätsmaßnahme“ an, welcher am Markt für die Flexibilität erzielt werden soll.
Messlokation	M_L	String	-	Geographische und in der stromnetztopologischen Verortung einer flexiblen Last durch eine eindeutige Zuordnung mittels der in der Energiewirtschaft / bei der Marktkommunikation bekannten Messlokation / auch als Zählpunktbezeichnung bekannten 33-stelligen alphanumerischer Codenummer.
Erstellende Instanz	E_{ID}	String	-	Gibt die Universally Unique Identifier (UUID) der erstellenden Instanz des EFDMS wieder, um Rückschlüsse über die Herkunft und eine Zuweisung zu ausführenden Stellen zu ermöglichen. Bei Kommunikation mit externen Services wird diese Kennzahl aus dem EFDMS entfernt.

2.2.2 Energiespeicher

Ein Energiespeicher ist ein technisches System oder das Zusammenspiel verschiedener technischer Systeme, die das Potenzial haben, Energie zu speichern. Grundsätzlich sind neben direkten Energiespeichern, wie zum Beispiel Wärmespeicher oder Batteriespeicher, auch inhärente Speicher wie Produktspeicher (z. B. Reifen für den Fall einer Reifenproduktion) möglich. Energiespeicher können ohne flexible Lasten (oder im weiteren Sinne auch flexible Stromerzeuger) nicht für Energieflexibilität genutzt werden, da ohne eine flexible Last keine Leistungsänderung möglich ist. Beispielsweise kann die Flexibilität eines Wärmespeichers nur genutzt werden, wenn entsprechende Anlagen zur Wärmeversorgung und/oder -abnahme als flexible Lasten mit dem Speicher verbunden sind. Tabelle 2 führt die zur Beschreibung der Klasse „Energiespeicher“ relevanten Kennzahlen sowie ihrer Ausprägungen und Definitionen auf.

TABELLE 2: KENNZAHLEN DER KLASSE „ENERGIESPEICHER“

Kennzahl	Variable	Format	Einheit	Erläuterung
Speicher-ID	ID	String	–	Die ID des Speichers, zur Identifikation und Zuordnung innerhalb eines IT-Systems in einem Unternehmen.
Nutzbare Speicherkapazität	C_{Speicher}	$2^{\mathbb{R}}$	kWh	Gewöhnlich gegeben durch ein Intervall, dessen untere Grenze des Speicherenergiegehalts nie unterschritten und dessen obere Grenze des Energiegehalts nie überschritten werden darf.
Anfangsenergiegehalt inkl. Zeitpunkt	E_{t_0}	$\mathbb{R} \times \mathcal{H}$	(kWh, s)	Energieinhalt des Speichers zum gegebenen Zeitpunkt.
Zielenergiegehalt inkl. Zeitpunkt	E_{Ziel}	$2^{\mathbb{R}} \times \mathcal{H}$	(kWh, s)	Der Energieinhalt, den der Speicher zum Zeitpunkt des Zeitstempels aufweisen muss (der im Planungshorizont enthalten sein muss).
Energieverluste	E_{Verlust}	[0,100]	$\% \cdot s^{-1}$	Anteil des Energieinhalts, der in jedem Zeitraum verloren geht, z.B. durch Austausch mit der Umwelt.
Versorgungssysteme	S_V	$(\text{string} \times 2^{\mathbb{R}})^n$	(–, –)	Eine Reihe von flexiblen Lasten/flexiblen Erzeugern, die den Speicher versorgen. Bei jedem Versorgungssystem gibt es einen zusätzlichen Parameter, die Umwandlungseffizienz. Beachten Sie, dass der Umwandlungswirkungsgrad von den Kennzahlen der zugehörigen flexiblen Lasten des Versorgungssystems Lieferanten abhängen kann.
Nichtbeeinflussbarer Energiebedarf	E_V	$Abb(\mathcal{H}; \mathbb{R})$	$(s \mapsto kW)$	Ein nichtbeeinflussbarer Energiebedarf, der während der Produktion bedient werden muss.
Kosten	c	$Abb(Abb(\mathcal{H}; \mathbb{R}); \mathbb{R})$	$((s \mapsto kW) \mapsto \text{€})$	Kosten im Zusammenhang mit der Nutzung des Speichers, die nur vom (zeitabhängigen) Energieinhalt des Speichers abhängen. Die Kosten werden dabei in den Ausprägungen „Arbeitskosten“, „Leistungskosten“ und „Kosten je Flexibilitätsmaßnahme“ angegeben.
Erstellende Instanz	E_{ID}	-String		Gibt die Universally Unique Identifier (UUID) der erstellenden Instanz des EFDMS wieder, um Rückschlüsse über die Herkunft und eine Zuweisung zu ausführenden Stellen zu ermöglichen. Bei Kommunikation mit externen Services wird diese Kennzahl aus dem EFDMS entfernt.

2.2.3 Abhängigkeiten

Über die Klasse Abhängigkeit lassen sich Einschränkungen und Abhängigkeiten für das Zusammenspiel mehrerer flexibler Lasten⁴ modellieren. Die Nutzung einer flexiblen Last kann die Nutzung einer anderen flexiblen Last beispielsweise bedingen oder ausschließen. Gerade in komplexen Produktionssystemen ist die Modellierung von Abhängigkeiten von Bedeutung, um die Flexibilität realitätsnah abbilden zu können und den Flexibilitätsraum auf die tatsächlich umsetzbaren Varianten zu begrenzen, ohne sich negativ auf Produktionsprozesse oder die Produktqualität auszuwirken. Die zur Modellierung relevanten Kennzahlen für die Klasse „Abhängigkeiten“ sind in Tabelle 3 dargestellt.

TABELLE 3: KENNZAHLEN DER KLASSE „ABHÄNGIGKEITEN“

Kennzahl	Variable	Format	Einheit	Erläuterung
Abhängigkeits-ID	ID	String	–	Die ID der Abhängigkeit, zur Identifikation und Zuordnung innerhalb eines IT-Systems in einem Unternehmen.
Trigger-Energieflexibilität	ID_{Tri}	String	–	Die ID der flexiblen Last, die die Abhängigkeit auslöst.
Ziel-Energieflexibilität	ID_{Tar}	String	–	Die ID der flexiblen Last, die von der auslösenden flexiblen Last betroffen ist.
Logische Verknüpfung	Typ_{Log}	{'implies', 'excludes'}	–	Gibt an, ob eine Verwendung der Trigger-Energieflexibilität erfordert, dass auch die Ziel-Energieflexibilität verwendet wird („implies“/„impliziert“) oder verhindert, dass die Ziel-Energieflexibilität verwendet werden kann („excludes“/„ausschließt“).
Zeitliche Verknüpfung	Typ_{Zeit}	{'start', 'total', 'end'} ²	–	Die Anteile („start/Start“, total/„Gesamt“, „end/Ende“) der auslösenden Trigger-Energieflexibilität (erste Komponente) und der Ziel-Energieflexibilität (zweite Komponente), die von der Abhängigkeit betroffen sind.
Anwendungsdauer	t_{app}	$2^{\mathbb{R}}$	s	Der Zeitraum, für den nach Verwendung der Trigger-Energieflexibilität die Ziel-Energieflexibilität mindestens einmal („implies/impliziert“) oder gar nicht („excludes/ausschließt“) aktiviert werden muss. Dabei ist die jeweilige zeitliche Verknüpfung zu berücksichtigen.
Anwendungsbedingungen	A_c	$(2^{\mathbb{R}} \times 2^{\mathbb{R}})^n$	–	Zusätzliche Bedingungen, die so erfüllt sein müssen, dass die Abhängigkeit als erfüllt gilt. Mit anderen Worten, eine Aktivierung der Trigger-Energieflexibilität impliziert eine zugehörige Aktivierung der Ziel-Energieflexibilität in einer Konfiguration (Maßnahme), so dass die Anwendungsbedingungen erfüllt sind.
Erstellende Instanz	E_{ID}	String	-	Gibt die UUID der erstellenden Instanz des EFDMS wieder, um Rückschlüsse über die Herkunft und eine Zuweisung zu ausführenden Stellen zu ermöglichen. Bei Kommunikation mit externen Services wird diese Kennzahl aus dem EFDMS entfernt.

2.2.4 Energieflexibilitätsmaßnahmen

Neben den drei Klassen „flexible Last“, „Energiespeicher“ und „Abhängigkeiten“ zur Beschreibung des Flexibilitätsraumes beschreibt eine Energieflexibilitätsmaßnahme (EFM) eine bewusste Aktion zur Durchführung

⁴ Dies können auch flexible Anbieter sein

eines definierten Zustandswechsels in einem Produktionssystem, und die damit verbundenen Wechselwirkungen im Produktionssystem (VDI-Richtlinie 5207 Blatt 1; Schott et al. 2019). Dies geht mit einer konkreten Leistungsänderung innerhalb des Flexibilitätsraums einher, weist selbst keine Freiheitsgrade mehr auf und ist zeitlich terminiert. Tabelle 4 zeigt die einzelnen Kennzahlen zur Beschreibung von EFMs.

In der Klasse Energieflexibilitätsmaßnahme werden für die einzelnen Kennzahlen konkrete Werte z.B. als Sollwert für die ausführende Instanz vorgegeben/definiert. Die maschinenseitige Regelung ist dafür zuständig die Flexibilität umzusetzen und Abweichungen/Toleranzen bestmöglich einzuhalten. Dies erfolgt bspw. bei SPS-gesteuerten Anlagen über entsprechende Regler (z.B. PID-Regler), welche Anwendungsfallspezifisch eingestellt sind.

TABELLE 4: KENNZAHLEN DER KLASSE „ENERGIEFLEXIBILITÄTSMAßNAHME“

Kennzahl	Variable	Format	Einheit	Erläuterung
Energieflexibilitäts-ID	ID	String	–	Die ID der Flexibilitätsmaßnahme.
Reaktionsdauer	t_{tot}	\mathbb{R}_0^+	s	Die Zeit zwischen dem Abruf und dem Beginn einer Flexibilitätsmaßnahme. Diese Kennzahl ist für die korrekte und rechtzeitige Ausführung von Flexibilitätsabrufen von Bedeutung.
Startzeitpunkt	t_0	\mathcal{H}	s	Der Zeitpunkt, zudem die Flexibilitätsmaßnahme gestartet/abgerufen wird.
Leistungszustände	P	\mathbb{R}^m	kW	Die Leistungen, mit denen die Energieflexibilitätsmaßnahme während jeder der (Anzahl der Veränderungen + 1) Halteperioden läuft. Ein positives Vorzeichen bedeutet, dass die flexible Last einen Anstieg des Stromverbrauchs verursacht, negative Leistungszustände stellen einen Rückgang des Verbrauchs dar.
Haltedauer	T_H	\mathbb{R}^m	s	Die Länge der Zeiträume, in denen die flexible Leistung in ihren Leistungszuständen läuft. Jede Halteperiode ist die Zeit mit konstantem Leistungszustand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Modulationen, einschließlich Aktivierung und Deaktivierung.
Leistungsgradienten	∇P	$\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}^{m+1}$	$kW \cdot s^{-1}$	Die Leistungsgradienten, die bei Änderungen von Leistungszuständen zu berücksichtigen sind. Wenn der Leistungszustand zunimmt, hat der Leistungsgradient ein positives Vorzeichen.
Kosten	c	\mathbb{R}	€	Die mit der Nutzung der Flexibilitätsmaßnahme verbundenen Kosten, Stromkosten ausgenommen.
Erstellende Instanz	E_{ID}	String	-	Gibt die UUID der erstellenden Instanz des EFDMs wieder, um Rückschlüsse über die Herkunft und eine Zuweisung zu ausführenden Stellen zu ermöglichen. Bei Kommunikation mit externen Services wird diese Kennzahl aus dem EFDM entfernt.

2.3 Informationstechnische Umsetzung

Um ein möglichst einfaches und einheitliches Datenformat, zum Austausch der im Datenmodell gespeicherten Informationen zwischen den Teilnehmern der ESP wie bspw. Anlagen, Smarter Konnektor (SK), Manufacturing Service Bus (MSB) (Schel et al. 2018), Energieflexibilitätsmanagementservice (EFMS), User (siehe Diskussionspapier „[Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform](#)“ (Fridgen et al. 2021)), zu gewährleisten, wurde im Rahmen des Projektes ein JSON Schema für die Umsetzung und Kommunikation entwickelt. Dieses lehnt sich an die Open-API-Schema Spezifikation des MSB an, welcher als zentrales Austauschelement zwischen den Services der UP dient. Des Weiteren ist JSON ein plattformunabhängiges einfach lesbares Textformat, das es ermöglicht die im EFDM gespeicherten Informationen von einem ESP Teilnehmer zu einem Weiteren zu übermitteln. Zusätzlich bietet sich das JSON Format als Informationsobjekt an, da der damit einhergehende Implementierungsaufwand (bspw. aufgrund leichter Dateitypkonvertierung) sehr gering ist (Krause 2020).

Um das Verständnis und die Lesbarkeit für den Anwender zu verbessern, ist das JSON Schema in die jeweiligen Klassen des Datenmodells sowie deren jeweiligen Eigenschaften und Kennzahlen aufgeteilt. Darüber ist für jede Kennzahl ein Datentyp, Format und ggf. Eigenschaften definiert und folgt so der Klassenstruktur des EFDMs. Einen Ausschnitt des Aufbaus des JSON Schema zeigt Abbildung 3.

```

"flexibleLoads": {
  "type": "array",
  "items": [
    {
      "type": "object",
      "properties": {
        "flexibleLoadId": {
          "type": "string",
          "format": "uuid"
        },
        "activationGradient": {
          "type": "string"
        },
        "workingCosts": {
          "type": "string"
        },
        "capacityCosts": {
          "type": "string"
        },
        "totalFlexibilityCosts": {
          "type": "string"
        },
        "deactivationGradient": {
          "type": "string"
        },
        "marketingDeadline": {
          "type": "string",
          "format": "date-time"
        }
      }
    }
  ]
},

"modulationGradients": {
  "type": "array",
  "items": [
    {
      "type": "object",
      "properties": {
        "min": {
          "type": "string"
        },
        "max": {
          "type": "string"
        }
      },
      "required": [
        "min",
        "max"
      ]
    }
  ]
},

```

ABBILDUNG 3: AUSSCHNITT DES JSON SCHEMA ZUR BESCHREIBUNG DES EFDM

3 EXEMPLARISCHE ANWENDUNG

Die Forschungs- und Lernfabrik ETA an der TU Darmstadt bildet innerhalb des SynErgie – Projektes einen Forschungsdemonstrator in Realmaßstab ab und ermöglicht so die Entwicklungsergebnisse an realen Produktionsanlagen zu erproben. Darauf basierend wurde in einem einfachen Versuchsaufbau das EFDM für ein beispielhaftes Produktionsinfrastruktursystem, wie in Abbildung 4 schematisch gezeigt, erstellt.

Bei dem betrachteten System handelt es sich um die Prozesskältebereitstellung für die Maschinenkühlung einer Werkzeugmaschine. Hierbei kommt als eine flexible Last ein luftgekühltes Kompressionskälteaggregat zum Einsatz, dessen Flexibilitätspotenzial durch die Kopplung eines Kältespeichers erhöht wird, was wiederum die Möglichkeit des energieflexiblen Betriebs der Werkzeugmaschine als Energieverbraucher ermöglicht.

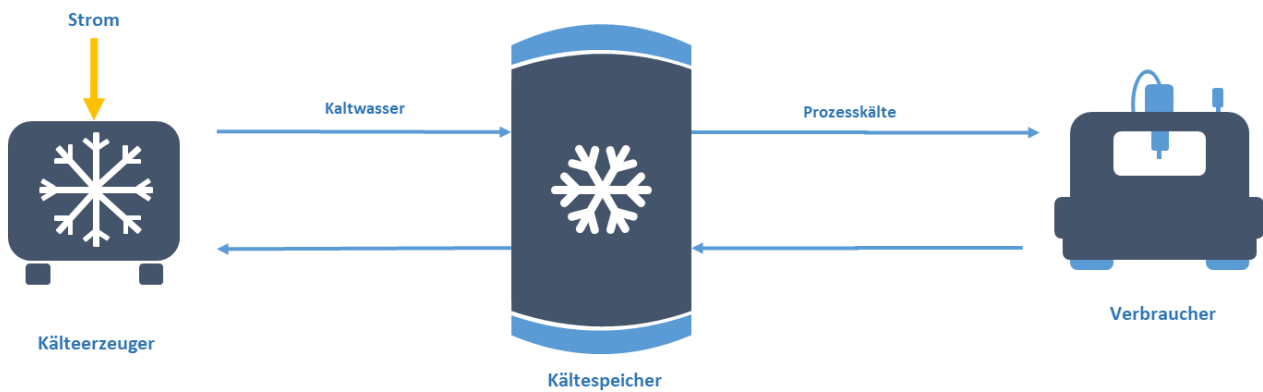


ABBILDUNG 4: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES BEISPIELSYSTEMS AUS DER ETA -FABRIK

Dabei liegt die Berechnung bzw. Erstellung des initialen EFDMs bei der für den Anlagenbetrieb zuständigen Person. Dies könnte bspw. der Energiemanager, Produktionsleiter oder auch Instandhaltungsleiter eines Unternehmens sein. Nachfolgende Tabellen zeigen die aus Herstellerangaben, Betriebszeiten, Betriebsparametern und weiteren Maschineneigenschaften bestimmten Kennzahlen für das Beispielsystem.

TABELLE 5: BERECHNETE KENNZAHLEN FÜR DEN SPEICHER DES BEISPIELSYSTEMS – TEIL 1

Kennzahl	Wert	Einheit
Speicher-ID	2009210003	–
Nutzbare Speicherkapazität	[0,4.648]	kWh
Anfangsenergiegehalt inkl. Zeitpunkt	(2,0, 2021 – 09 – 20T06:00:00)	(kWh, s)
Zielenergiegehalt inkl. Zeitpunkt	(0, 2021 – 09 – 20T11:00:00)	(kWh, s)
Energieverluste	1.228/3600	% · s ⁻¹

TABELLE 6: BERECHNETE KENNZAHLEN FÜR DEN SPEICHER DES BEISPIELSYSTEMS – TEIL 2

Kennzahl	Wert	Einheit
Versorgungssysteme	(2009210002, 2.6)	(-, -)
Nichtbeeinflussbarer Energiebedarf	(11:00:00, 0.477)	(s \mapsto kW)
Kosten	0	((s \mapsto kW) \mapsto €)
Erstellende Instanz	-	

TABELLE 7: BERECHNETE KENNZAHLEN FÜR DIE FLEXIBLE LAST „KÄLTEAGGREGAT“ DES BEISPIELSYSTEMS

Kennzahl	Variable	Einheit
Energieflexibilitäts-ID	2009210002	-
Reaktionsdauer	60	s
Gültigkeit	[2021-09-20T06:00:00, 2021-09-20T11:00:00]	s
Leistungszustände	[0.8; 6]	kW
Haltedauer	[30; inf]	s
Abrufhäufigkeit	-	-
Anzahl an Veränderungen (des Leistungszustands)	inf	-
Leistungsgradient Aktivierung	0.0024	kW \cdot s ⁻¹
Leistungsgradient Veränderungen (des Leistungszustands)	-	kW \cdot s ⁻¹
Leistungsgradient Deaktivierung	inf	kW \cdot s ⁻¹
Regenerationsdauer	0	s
Kosten	0	€
Spannungsebene	0.240	kV
Vermarktungsdeadline	2021-09-20T07:00:00	s
Preis	0.50	€
Messlokation	ETA – Fabrik	-
Erstellende Instanz	-	-

Um anschließend ein EFDM in definiertem JSON Format (vgl. Abbildung 5) zu erhalten, wurde der Service der Unternehmensplattform „EFDM – GUI“ verwendet. Dieser ermöglicht durch eine logische Abfrage der Kennzahlen jeder Klasse die Erstellung des systemzugehörigen EFDMs.

Dieses kann dann bspw. an den Smarten Konnektor überspielt werden und so die Anlagen an der Unternehmensplattform partizipieren lassen. Diese informationstechnische Umsetzung wird im [Diskussionspapier „Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform“](#) näher beschrieben (Fridgen et al. 2021).

```

{
  "flexibility": {
    "id": "200920210001",
    "flexibleLoads": [
      {
        "flexibleLoadId": "2009210002",
        "activationGradient": "0.0024",
        "costs": "0",
        "marketingDeadline": "2021-09-20T07:00:00",
        "deactivationGradient": "inf",
        "modulationGradients": [
          {
            "min": "0.0016",
            "max": "0.0016"
          }
        ],
        "modulationNumber": "inf",
        "powerStates": [
          {
            "holdingDuration": {
              "min": "30",
              "max": "inf"
            },
            "value": {
              "min": "0.8",
              "max": "6"
            }
          }
        ],
        "price": "0.50",
        "reactionDuration": "60",
        "regenerationDuration": "0",
        "usageNumber": [
          "1"
        ],
        "validity": [
          {
            "start": "2021-09-20T06:00:00",
            "end": "2021-09-20T11:00:00",
            "temporalType": ""
          }
        ],
        "position": "ETA",
        "voltageLevel": "0.240"
      }
    ],
    "storages": [
      {
        "storageId": "2009210003",
        "costs": "0",
        "drain": [
          "0.477"
        ],
        "energyLoss": "1.228/3600",
        "initialEnergyContent": {
          "time": "2021-09-20T06:00:00",
          "value": {
            "min": "2.000",
            "max": "2.034"
          }
        },
        "suppliers": [
          {
            "flexibleLoadId": "2009210002",
            "conversionEfficiency": "2.6"
          }
        ],
        "targetEnergyContent": {
          "time": "2021-09-20T11:00:00",
          "value": {
            "min": "0",
            "max": "0"
          }
        },
        "usableCapacity": {
          "min": "0",
          "max": "4.648"
        }
      }
    ]
  }
}

```

ABBILDUNG 5: EFDM DES BEISPIELSYSTEMS IM JSON FORMAT

4 DISKUSSION UND LIMITATIONEN

Das vorgestellte Datenmodell wurde in enger Zusammenarbeit mit Industriepartnern entwickelt und validiert. Dennoch gibt es Limitationen, die im Folgenden betrachtet werden, die sich auf die Modellierung des EFDMs selbst und die Verwendung des EFDMs in der ESP beziehen:

1) Das Ausfüllen der erforderlichen Parameter/Kennzahlen des EFDMs für Unternehmen erfordert eine gewisse Einarbeitung. Die Handhabung ist nicht direkt intuitiv. Daher ist es wichtig, dem Nutzer/der Nutzerin entsprechende Beispiele mit an die Hand zu geben, an denen eine grobe Orientierung erfolgen kann, um die eigenen Werte festzulegen. Da der Aufbau des EFDMs für jede Flexibilität identisch ist, wird das Ausfüllen weiterer EFDMs allerdings erleichtert. (Schott et al. 2019)

2) Die Ermittlung einiger Parameter in der Praxis erfordert teilweise Kompromisse. Da einige Parameter nur schwer zu erheben sind, ist ein anwendungsfallspezifischer Trade-Off zwischen der notwendigen Vollständigkeit bzw. Genauigkeit der Kennzahlenmodellierung/-ermittlung und dem dafür aufzubringenden Aufwand notwendig.

3) Die Modellierung von Flexibilitäten mit nicht-linearem Verhalten mittels EFDM wird nicht empfohlen. Dies ist zwar theoretisch möglich, allerdings steigt die Komplexität sowohl bei der Erstellung des EFDMs als auch bei der weiteren Nutzung des EFDMs durch Services immens an. An dieser Stelle gilt es das übergeordnete Ziel des EFDMs und der Marktplattform im Allgemeinen zu beachten, dass keine Modellierung eines digitalen Zwillinges notwendig macht. Stattdessen ist eine Abwägung zwischen notwendiger Genauigkeit/Vollständigkeit und dem Verlust an Flexibilitätspotenzial durchzuführen.

4) Das EFDM kann nicht zur direkten Steuerung von Anlagen genutzt werden. Die Umwandlung einer Flexibilitätsmaßnahme in ein für die Maschine verwertbares Signal erfolgt auf Seiten der Unternehmensplattform durch den smarten Konnektor. Der smarte Konnektor übersetzt dabei die im EFDM enthaltenen Kennzahlen in ein SPS- bzw. maschinenlesbares Format, welche letztendlich die Sollwerte der jeweiligen Maschinen / Anlagen beeinflussen bzw. überschreiben.

5) Es gilt für eine durchgängige Kommunikation von Flexibilitäten zwischen Anlagen in Industrieunternehmen und Energiemärkten zu berücksichtigen, dass das EFDM die Basis legt. Werden von den Serviceanbietern auf Seiten der Marktplattform (z.B. Aggregatoren) proprietäre Datenmodelle verwendet, ist allerdings der Einsatz einer zusätzlichen Komponente notwendig, die das EFDM in das jeweilige proprietäre Datenmodell umwandelt und umgekehrt. An dieser Stelle besteht weiterer Forschungsbedarf und es gilt zu untersuchen, inwiefern Transformationskomponenten für bestimmte Services standardisiert werden können.

Des Weiteren gilt es die Verwendung des EFDMs von verschiedenen Services im Rahmen der ESP zu testen und anhand dessen ggf. Anpassungen vorzunehmen.

5 AUSBLICK

Das Diskussionspapier zeigt das im Rahmen des SynErgie-Projektes entwickelte und innerhalb der ESP verwendete Datenmodell zur Beschreibung von Energieflexibilitäten. Durch den modularen Aufbau des EFDM können verschiedene Flexibilitäten mit unterschiedlicher Komplexität modelliert werden, die verschiedene Anwendungsfälle von Energieflexibilitäten abdecken. Flexibilitäten werden als Teilmengen von mindestens einer flexiblen Last definiert. Beschränkungen der flexiblen Last(en) werden durch die Klassen Abhängigkeit und Speicher festgelegt (Schott et al. 2019). Neben der theoretischen Beschreibung ist das EFDM ebenfalls in Form eines JSON Schemas formuliert, das die Grundlage für die Erstellung von EFDMs und die Validierung ihrer Struktur bildet. Dadurch kann die generische und standardisierte Modellierung von Energieflexibilitäten auch informationstechnisch vereinheitlicht werden. Das Datenformat JSON wurde auf Grund der einfachen Lesbarkeit für Menschen und auf Grund seiner plattformunabhängigen Nutzbarkeit ausgewählt. Ein beispielhaftes EFDM einer Anlage der ETA-Fabrik (vgl. Tabelle 5 und Tabelle 6) veranschaulicht die Ausgestaltung.

Für die initiale Erstellung von EFDMs werden vorgelagerte technische Analysen der Anlagen und Systeme (vgl. (VDI-Richtlinie 5207 Blatt 1) im Sinne eines Flexibilitätsaudits empfohlen. Services, wie die Bereitstellung von graphischen Benutzeroberflächen können an dieser Stelle die Handhabung erheblich erleichtern. An dieser Stelle ergibt sich aktuell Forschungsbedarf. Durch einen weitestgehend automatisierten Erstellungsprozess von EFDMs würde der Aufwand für Industrieunternehmen/den Nutzer erheblich vereinfacht werden und könnte somit mehr Anwendung finden.

Im Kontext der übergeordneten Referenzarchitektur ermöglicht das EFDM die standardisierte Kommunikation von Flexibilität zwischen verschiedenen Services (siehe Diskussionspapier [„Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform“](#) (Fridgen et al. 2021)). Werden bei der zukünftigen Erstellung von Services innerhalb der ESP von vornherein EFDMs berücksichtigt und anstelle von proprietären Datenmodellen verwendet, sinkt das Risiko von Nutzern durch Lock-In Effekte höhere Kosten beim Serviceanbieterwechsel zu erfahren. Neben Anpassungen von regulatorischen Rahmenbedingungen (SynErgie 2021) kann dies eine Stellschraube für ein höheres Volumen an Flexibilitätsbereitstellungen und somit für das Gleichgewicht im Stromnetz sein.

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.epsr.2008.04.002.

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.

Bauer, D.; Hieronymus, A.; Kaymakci, C.; Köberlein, J.; Schimmelpfennig, J.; Wenninger, S.; Zeiser, R. (2020): Wie IT die Energieflexibilitätsvermarktung von Industrieunternehmen ermöglicht und die Energiewende unterstützt. In: *HMD*. DOI: 10.1365/s40702-020-00679-8.

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 (2017): Flexibilität im Stromversorgungssystem. Bestandsaufnahme, Hemmnisse und Ansätze zur verbesserten Erschließung von Flexibilität. Bundesnetzagentur. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/NetzentwicklungUndSmartGrid/BNetA_Flexibilitaetspapier.pdf.

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.

Krause, B. (2020): Was ist JSON? Praxisnahes Basiswissen. In: *OPC-Router.de*, 18.08.2020. Online verfügbar unter <https://www.opc-router.de/was-ist-json/>, zuletzt geprüft am 06.10.2021.

Lindner, M.; Wenninger, S.; Fridgen, G.; Weigold, M. (2022): Aggregating Energy Flexibility for Demand-Side Management in Manufacturing Companies – A Two-Step Method. In: B.-A. Behrens, A. Brosius, W.-G. Drossel, W. Hintze, S. Ihlenfeldt und P. Nyhuis (Hg.): *Production at the Leading Edge of Technology*. Proceedings of the 11th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), Dresden, September 2021. Cham, 2022. 1st ed. 2022. Cham: Springer International Publishing; Imprint Springer (Springer eBook Collection), S. 631–638.

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.
- Schel, D.; Henkel, C.; Stock, D.; Meyer, O.; Rauhöft, G.; Einberger, P. et al. (2018): Manufacturing Service Bus: An Implementation. In: *Procedia CIRP* 67, 179-138. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.196.
- 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.
- SynErgie (2021): *Positionspapier zu regulatorischen Änderungen*. Online verfügbar unter <https://synergie-projekt.de/wp-content/uploads/2020/09/SynErgie-Positionspapier-Regulatorische-Rahmenbedingungen.pdf>.
- 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.

VDI-Richtlinie 5207 Blatt 1, 2020-07: VDI-Richtlinie 5207 Blatt 1, Energieflexible Fabrik - Grundlagen.

