

Diskussionspapier

REFERENZARCHITEKTUR DER ENERGIE- SYNCHRONISATIONS- PLATTFORM

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform

Teil der Reihe „Diskussionspapiere V4 – Konzept der Energiesynchronisationsplattform“¹

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-642369>

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>)

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

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

Am Technologiezentrum 10
86159 Augsburg
www.igcv.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de

Technische Universität Darmstadt

Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)

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

Software AG

Uhlandstraße 12
64297 Darmstadt
softwareag.com

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. Gilbert Fridgen

Sergio Potenciano Menci, Christine van Stiphoudt

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

Prof. Dr.-Ing. Johannes Schilp

Jana Köberlein

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

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

Arthur Grigorjan, Daniel Schel, Andreas Schlereth, Fabian Schulz

Technische Universität Darmstadt

Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

Martin Lindner

Software AG

Jens Schimmelpfennig, Christian Winter

VORWORT UND DANKSAGUNG

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

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

- Executive Summary: Konzept der Energiesynchronisationsplattform – Diskussionspapiere
DOI: <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642368>
Jana Köberlein, jana.koeberlein@iqcv.fraunhofer.de
- Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform
DOI: <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642369>
Sergio Potenciano Menci, sergio.potenciano-menci@uni.lu
- Das Energieflexibilitätsdatenmodell der Energiesynchronisationsplattform
DOI: <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642370>
Martin Lindner, m.lindner@ptw.tu-darmstadt.de
- Optimierung auf der Energiesynchronisationsplattform
DOI: <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642371>
Lukas Bank, lukas.bank@iqcv.fraunhofer.de
- IT-Sicherheit der Energiesynchronisationsplattform
DOI: <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642372>
Andreas Oeder, andreas.oeder@iis.fraunhofer.de
- Demonstratoren der Energiesynchronisationsplattform
DOI: <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642373>
Andreas Schlereth, andreas.schlereth@ipa.fraunhofer.de

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

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

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

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

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



<https://kopernikus-projekte.de>



<https://synergie-projekt.de>

KURZZUSAMMENFASSUNG

Die Energiesynchronisationsplattform (ESP) 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. Dieses Diskussionspapier über die Referenzarchitektur der ESP ist die Aktualisierung einer älteren Version, die in Reinhart et al. (2020) vorgestellt wurde. Seitdem wurde zum einen die Entwicklung einzelner Services eingestellt, zum anderen ist die Marktplattform (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 Unternehmensplattform (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 stellen wir in diesem ausführlichen Diskussionspapier eine Sammlung der verschiedenen Services zur Verfügung, 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.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	9
1.1	EINORDNUNG UND MOTIVATION	9
1.2	DAS PROJEKT SYNERGIE	11
1.3	ZIELE UND VISION DER ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM	12
1.4	REFERENZARCHITEKTUR DER ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM	13
2	ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM	15
2.1	MARKTPLATTFORM	17
2.2	SERVICES DER MARKTPLATTFORM	20
2.3	UNTERNEHMENSPLATTFORM	21
2.4	SERVICES DER UNTERNEHMENSPLATTFORM	27
3	PROZESSE / INFORMATIONSFÜSSE	32
3.1	REFERENZPROZESSE	33
3.1.1	<i>Wie erzeuge ich ein EFDM?</i>	<i>34</i>
3.1.2	<i>Nutzung des EFDM zur Optimierung/Aggregation von Energieflexibilität</i>	<i>35</i>
3.1.3	<i>Vermarktung einer Energieflexibilität</i>	<i>36</i>
3.1.4	<i>Ausführung einer Energieflexibilitätsmaßnahme</i>	<i>36</i>
3.2	BEISPIELHAFTE ANWENDUNGSFÄLLE	38
3.2.1	<i>Anwendungsfall 1: Flexibilität eines Ofens wird über Aggregator vermarktet</i>	<i>38</i>
3.2.2	<i>Anwendungsfall 2: Flexibilitäten mehrerer Öfen werden über Aggregator vermarktet</i>	<i>39</i>
3.2.3	<i>Anwendungsfall 3: Flexibilitäten mehrerer Öfen werden über lokalen Flexibilitätsmarkt vermarktet</i>	<i>40</i>
4	FAZIT UND AUSBLICK	42
	LITERTATURVERZEICHNIS	43

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Struktur des Kopernikus-Projekts SynErgie.....	11
Abbildung 2: Übergeordnetes Zusammenspiel von Marktplattform, Unternehmensplattform und Serviceanbietern.....	15
Abbildung 3: Aufbau der Marktplattform	19
Abbildung 4: Aufbau der Unternehmensplattform.....	22
Abbildung 5: Mögliche Betriebskonzepte der Unternehmensplattform	22
Abbildung 6: Architektur der Unternehmensplattform.....	24
Abbildung 7: Architekturüberblick nach TOGAF mit hinterlegten ESP-spezifischen Modellen	32
Abbildung 8: ESP-Prozesslandkarte	33
Abbildung 9: Aktuelle Teilschritte zur Erstellung eines EFDM zum flexiblen Anlagenbetrieb	34
Abbildung 10: Beispiel für die Definition einer Schreib-Operation in der Konfigurationsdatei eines Smarten Konnektors	36
Abbildung 11: Flexibilität eines Ofens wird über einen Aggregator vermarktet (Sequenzdiagramm).....	39
Abbildung 12: Flexibilitäten mehrerer Öfen werden über einen Aggregator vermarktet (Sequenzdiagramm).....	40
Abbildung 13: Flexibilitäten mehrerer Öfen werden über einen lokalen Flexibilitätsmarkt vermarktet (Sequenzdiagramm).....	41

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Services der Marktplattform.....	20
Tabelle 2: Referenzservices der Unternehmensplattform Teil 1	27
Tabelle 3: Referenzservices der Unternehmensplattform Teil 2	28
Tabelle 4: Referenzservices der Unternehmensplattform Teil 3	29
Tabelle 5: Referenzservices der Unternehmensplattform Teil 4	30
Tabelle 6: Referenzservices der Unternehmensplattform Teil 5	31

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

² Vorläufige Angabe

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

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

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

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

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

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

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

1.2 Das Projekt SynErgie

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

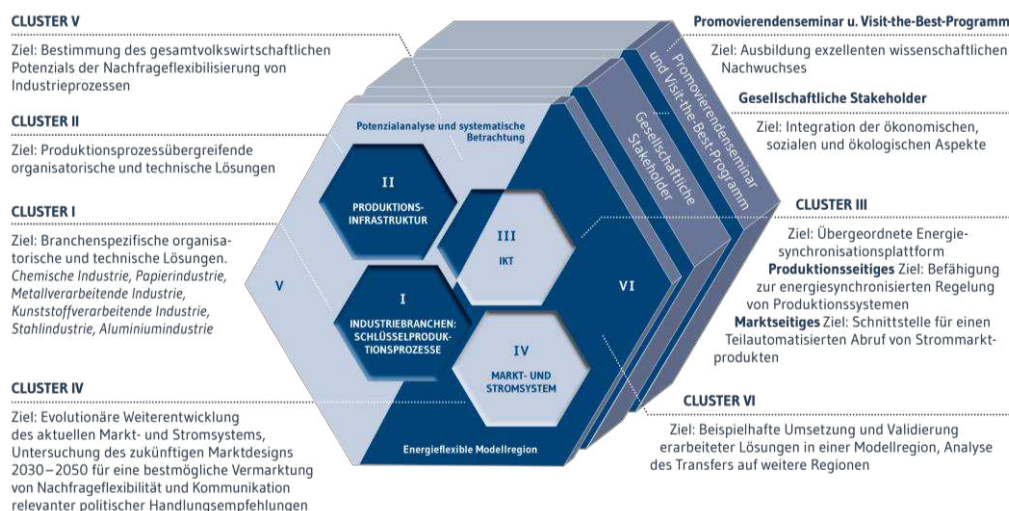


ABBILDUNG 1: STRUKTUR DES KOPERNIKUS-PROJEKTS SYNERGIE

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

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

1.3 Ziele und Vision der Energiesynchronisationsplattform

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

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

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

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

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

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

1.4 Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform

Dieses Diskussionspapier über die Referenzarchitektur ist die Aktualisierung einer älteren Version, die in Reinhart et al. (2020) vorgestellt wurde. Zum einen wurde die Entwicklung einzelner Services nicht weiterverfolgt. Zum anderen ist die MP nicht mehr 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. Die Struktur dieses Diskussionspapiers gliedert sich in folgende 4 Hauptabschnitte:

Das erste Kapitel lieferte die Motivation und den Kontext sowohl für das Forschungsfeld als auch das SynErgie-Projekt. Das folgende Kapitel 2 widmet sich der Ausgestaltung und Aktualisierung der ESP-Architektur als Verbindungskonzept, das die Kommunikation industrieller Flexibilität ermöglicht. Die beiden Hauptbestandteile der ESP-Architektur, die MP und die UP, werden jeweils in Abschnitt 2.1 und Abschnitt 2.3 näher erläutert. Darüber hinaus stellen wir in Abschnitt 2.2 und Abschnitt 2.4. dieses ausführlichen Diskussionspapiers eine Sammlung der verschiedenen Services zur Verfügung, 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.

Im Anschluss an die Beschreibungen zielt dieses Diskussionspapier in Kapitel 3 darauf ab, einen Überblick über die primären Referenzprozesse zu geben, die für den Betrieb und die Vermarktung von Flexibilitäten betrachtet werden. Daher gliedert sich Kapitel 3 in Abschnitt 3.1 den primären Referenzprozess und Abschnitt 3.2 die Darstellung von drei möglichen Anwendungsfällen, die aufeinander aufbauen. Jeder Anwendungsfall wird beschrieben und enthält einen Prozessablauf, der in Sequenzdiagrammen dargestellt ist. Diese bieten eine abstrakte Standarddarstellung, um die Logik und die Interaktionen der verschiedenen Prozesse innerhalb der ESP zu verstehen.

Kapitel 4 enthält schließlich eine Schlussfolgerung und einen Ausblick auf die zukünftige Arbeit im Rahmen des SynErgie-Projekts zur kontinuierlichen Weiterentwicklung der ESP.

2 ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM

Die ESP beschreibt das übergeordnete Konzept eines digitalen Ökosystems, welches den gesamten Prozess des informationstechnisch automatisierten Energieflexibilitätshandels von der Maschine bis zum Energiemarkt abbildet. Sie beschreibt das Zusammenwirken mehrerer Unternehmensplattformen (UP) mit einer zentralen Marktplattform (MP) und umfasst Rahmenbedingungen, Schnittstellen, Datenmodelle, Stakeholder und Sicherheitsaspekte. Das Zusammenspiel der Komponenten ist Abbildung 2 zu entnehmen. Um spezifisches Domänenwissen und Technologien und Methoden sicher zu kapseln, ohne den Betrieb und die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems zu beeinträchtigen, ist die Aufteilung der ESP in die zwei logischen Plattfortmtypen UP und MP notwendig (Bauer et al. 2017; Schott et al. 2018). Betreiber der UPs sind die Unternehmen selbst oder Dienstleister, wobei auch hybride Formen möglich sind. In Anlehnung an die Arten des Cloud Computing ist ein privates, hybrides oder öffentliches Betreibermodell vorgesehen. Für die MP wird eine kooperative Organisationsform des Betreibers angestrebt, um die Unabhängigkeit von allen Stakeholdern der ESP sicherzustellen und Interessenkonflikte zu vermeiden. Hierbei ist auch ein staatlicher Betrieb der MP, beispielsweise durch die Bundesnetzagentur, denkbar.

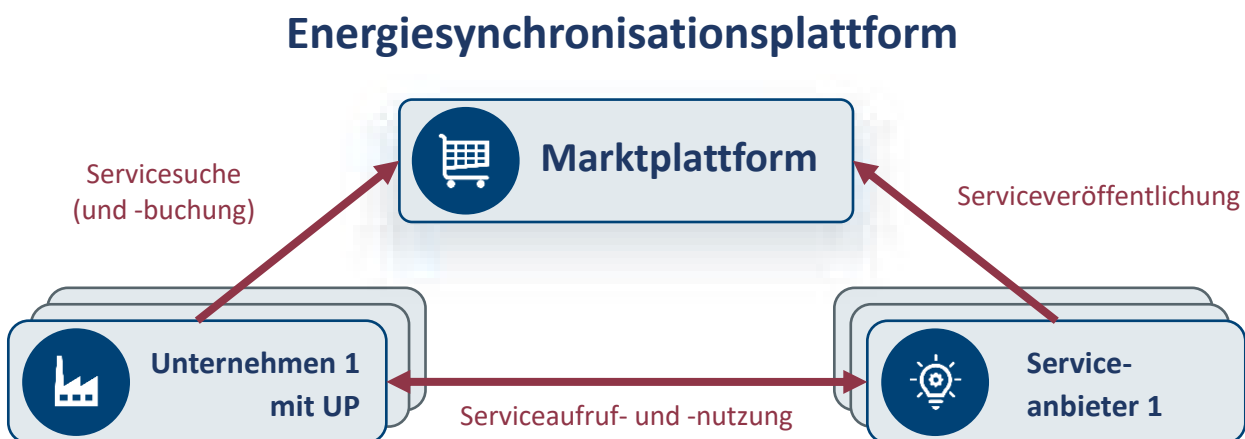


ABBILDUNG 2: ÜBERGEORDNETES ZUSAMMENSPIEL VON MARKTPLATTFORM, UNTERNEHMENSPLATTFORM UND SERVICEANBIETERN

Die ESP unterstützt eine Vielzahl an Stakeholdern aus verschiedenen Domänen bei der Interaktion während des automatisierten Handels von Energieflexibilität. Die Akteure der UP und MP lassen sich dabei den Kategorien Endkunde bzw. Plattfortmteilnehmer, Plattfortmbetreiber und Serviceanbieter zuordnen.

Die UP stellt das modulare, serviceorientierte, sichere und nach außen gekapselte informations- und kommunikationstechnische System innerhalb eines Unternehmens dar, durch welches Unternehmen zum automatisierten Energieflexibilitätshandel befähigt werden (Schel et al. 2018). Sie bietet in einer service-orientierten IT-Infrastruktur die notwendigen Funktionalitäten für die informationstechnische Anbindung und die Ansteuerung von energieflexiblen Produktionsprozessen und -infrastruktur und somit für die Bereitstellung von Energieflexibilität. In der UP finden Aufnahme, Aggregation, Analyse und Optimierung von Prozess- und Produktionsdaten statt sowie die energiesynchrone Steuerung und Regelung der Systeme, Anlagen und Komponenten (Schel et al. 2018). Über eine standardisierte Schnittstelle erhalten Unternehmen Zugriff zu auf der MP verfügbaren Angeboten.

Die MP ist eine multilaterale Plattform für den Energieflexibilitätshandel. Über sie können flexibilitätsorientierte Services angeboten beziehungsweise gefunden und gebucht werden. Sie ermöglicht den Industrieunternehmen so den Zugriff auf eine Vielzahl existierender und zukünftiger Services sowie weitere Plattformen, welche sie in verschiedenen Aspekten der Flexibilitätsbereitstellung, der Flexibilitätsbewertung und des Flexibilitätshandels unterstützen. Die Interaktion über die MP beschränkt sich jedoch nicht nur auf die Verbindung zwischen Industrieunternehmen und Serviceanbietern, sondern ermöglicht zusätzlich die Vernetzung zwischen den Services untereinander im Sinne eines Service-Ökosystems.

Was die Dienstleistungen betrifft, so können diese direkt an der UP oder integriert an der MP angeboten werden. Diese Services werden später noch näher in Abschnitt 2.2 und 2.4 erläutert.

Die ESP verfolgt das Ziel, die Nutzung industrieller Nachfrageflexibilität als Option zur Bereitstellung der im Energiesystem notwendigen Flexibilität zu automatisieren und standardisieren. Für Unternehmen als Plattformnutzer eröffnen sich durch den Einsatz von Energieflexibilität (unterstützt durch die ESP) neue Geschäftsmodelle. Unternehmen können durch die Umsetzung von Energieflexibilität sowohl Einsparungen durch die Reduzierung der Strombeschaffungskosten und/oder der Netzentgelte sowie weiterer Umlagen erzielen als auch Erlöse generieren (Haupt et al. 2020; VDI-Richtlinie 5207 Blatt 1).

Das Ökosystem der ESP bietet hierbei den folgenden Nutzen (Rösch et al. 2019; Bauer et al. 2020):

- **Optimierung des wirtschaftlichen Einsatzes von Flexibilität:** Services auf UP und MP ermöglichen es Unternehmen den wirtschaftlichen Einsatz ihrer vorhandenen Flexibilität zu optimieren. Hierzu ist eine Optimierung auf verschiedenen Ebenen in Abhängigkeit des Planungshorizonts, der zeitlichen Auflösung und der maximal zulässigen Laufzeit notwendig. Je nach Anforderung und Rahmenbedingung von Produktion und Produktionsinfrastruktur können Unternehmen einzelne Ebenen der Optimierung modular und flexibel implementieren (Seitz et al. 2019; Rösch et al. 2019).
- **Niedrige Eintrittsbarrieren:** Durch die Standardisierung von Informationsflüssen und Schnittstellen schafft die ESP weitgehende Transparenz für die Vermarktung von Energieflexibilität. Sie ermöglicht so sowohl Flexibilitätsanbietern einen einfachen Zugang zu neuen Services und Vermarktungsmöglichkeiten als auch Serviceanbietern einen einfachen und transparenten Zugang zu Kunden.
- **Vermeidung von Vendor Lock-In:** Unternehmen selbst oder unabhängige Softwareanbieter können zudem unabhängig vom Plattformbetreiber neue innovative Services entwickeln und diese über die ESP anderen Teilnehmern zur Verfügung stellen. Die ESP verhindert durch die standardisierte Kommunikation langfristige Vendor-Lock-In-Effekte⁴, wodurch hohe Kosten beim Anbieterwechsel vermieden werden. Die Reduktion von Hemmnissen für die Teilnahme an Flexibilitätsmärkten und den Wechsel von Serviceanbietern ermöglicht den flexiblen Zugang zu einer Vielzahl an Services verschiedener Anbieter und fördert somit den Wettbewerb.

⁴ Wenn ein Kunde von den Dienstleistungen oder Produkten eines Anbieters abhängig ist.

- **Interoperabilität:** Unternehmensseitig ermöglicht die Architektur der ESP die Integration bestehender IT-Systeme und proprietärer Services, welche verschiedene von Energieflexibilität unabhängige Funktionen der Unternehmensplanung und -steuerung erfüllen. Diese können gegebenenfalls durch die Erweiterung ihrer Funktionalitäten um die Zielgröße Energie(-flexibilität), die Erweiterung einzelner Komponenten und die Nutzung von offenen Protokollen und Schnittstellen für den automatisierten Flexibilitätshandel im Sinne einer Anbindung an die MP befähigt werden.
- **Prozessoptimierung:** Darüber hinaus kann die Auseinandersetzung mit Energieflexibilität die abteilungsübergreifende Zusammenarbeit und somit die Organisationsstruktur im Unternehmen stärken. Prozesse der Flexibilitätsvermarktung betreffen eine Reihe von Stakeholdern, von der technischen Instandhaltung bis zur Produktionsplanung, und fördern so den unternehmensinternen Austausch, wodurch sich Potenziale für Prozessoptimierungen ergeben können.
- **Ökologische Nachhaltigkeit:** Zuletzt gewinnt auch die ökologische Nachhaltigkeit für produzierende Unternehmen zunehmend an Bedeutung. Durch den Einsatz von Energieflexibilität und die damit einhergehende Verschiebung des Energieverbrauchs in Zeiten mit erhöhtem Aufkommen erneuerbarer Energien, wird deren Integration begünstigt und somit die Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung gesenkt.

2.1 Marktplattform

Die MP ist eine der beiden Hauptkomponenten innerhalb der ESP. Es handelt sich dabei um eine multilaterale Plattform, da sie mehrere unabhängige Parteien miteinander verbindet (Rösch et al. 2019), die auf der MP flexibilitätsorientierte Services anbieten und die diese Services nutzen. Diese Services können von jeder interessierten Partei angeboten werden. Die Dienste können beispielsweise Prognosesysteme, Aggregatoren oder lokale Flexibilitätsmärkte sein. Einzelheiten zu diesen Diensten werden in Abschnitt 2.2 erläutert. Die MP im SynErgie-Projekt konzentriert sich auf Industrieunternehmen als Quellen von Flexibilitäten und als Hauptnutzer der Services, die an die MP angebunden sind.

Die MP verfolgt zwei Hauptziele. Das erste Ziel ist die Herstellung eines einfachen, aber effektiven ersten Kontaktes zwischen Industrieunternehmen und Serviceanbietern. Eine solch einfache Idee ist aufgrund der Komplexität der Energiewirtschaft notwendig. Die Bereitstellung einer klaren ersten Anlaufstelle ermöglicht es den Nutzern, die möglichen Dienste zu identifizieren, die für ihre Unternehmen von Interesse sein könnten, und gibt Aufschluss über die wichtigsten Anforderungen, die für die Nutzung eines solchen Dienstes erforderlich wären. Das zweite Ziel der MP besteht darin, die Kommunikation und Interaktion zwischen den Diensten und den in die ESP integrierten Industrieunternehmen zu ermöglichen. Daher fungiert die MP als Vermittler zwischen Industrieunternehmen und Serviceanbietern. Die Interaktion beschränkt sich jedoch nicht nur auf die Verbindung zwischen Industrieunternehmen und Serviceanbietern, sondern ermöglicht zusätzlich die Vernetzung zwischen den Services untereinander. Diese Verbindungen zwischen einzelnen Services bedeuten, dass Services andere Services innerhalb der MP nutzen können,

wodurch ein Service-Ökosystem entsteht. Mit diesen Zielen wird eine interoperable⁵, multilaterale Plattform angestrebt, die auf Energieflexibilität ausgerichtet ist.

Ausgehend von den zuvor genannten Zielen ist es notwendig, spezifische Aspekte zu nennen, die die MP nicht abdeckt. Die MP legt nicht fest, welche Services sich mit der MP verbinden. Der Serviceanbieter entscheidet über die Registrierung seines Services auf der MP und ist für den Betrieb des Services verantwortlich. Das heißt, die MP hostet die Services nicht selbst, sondern bietet die Vermittlung an. Daher ist es erforderlich, dass Serviceanbieter Zugang zu einer Hosting-Infrastruktur für ihre Services haben. Wenn ein Unternehmen einen Service nutzen möchte, übernimmt die MP nur die Aufgabe der initialen Kontaktherstellung zwischen interessiertem Unternehmen und Service und die weitere Kommunikation findet direkt zwischen Unternehmen und Service statt. Die Hauptargumente für diese Architektur verglichen mit einer zentralisierten Kommunikation über die MP sind die Vermeidung eines Kommunikationsflaschenhalses und eines Single Point of Failure auf Seiten der MP sowie die Vermeidung der Einstufung der MP als kritische Infrastruktur. Dadurch würde die Komplexität der MP erhöht und das Ziel einer offenen Plattform zum Anbieten von Services beeinträchtigt.

Mit der gewählten Architektur ermöglicht die MP jedem Serviceanbieter seinen Service mit der MP zu verknüpfen und so die Anzahl und Vielfalt der an der MP angebotenen Services zu erhöhen. Die MP ist nicht auf eine Art von Services beschränkt, sondern ist offen für viele verschiedene Arten von Services. Die MP legt auch nicht die Schnittstellen der Services fest, sondern dies erfolgt durch die Services selbst. Die Zuordnung der Dienste in verschiedene Kategorien kann jedoch bei der Standardisierung der Schnittstellen helfen. Jeder Service stellt eine Beschreibung seiner Schnittstellen inklusive Spezifikation der auszutauschenden Datenobjekte bereit. Aus ESP-Sicht ist das bevorzugte Datenmodell für den Informationsaustausch, wo möglich, das in SynErgie entwickelte Energieflexibilitätsdatenmodell (EFDM). Das EFDM ist geeignet für alle Services, die Informationen zu Energieflexibilitäten austauschen, nicht jedoch für Services mit gänzlich anderen Informationen wie etwa eine Solarstromertragsprognose. Services sind prinzipiell frei in der Definition ihrer Datenformate, aber das EFDM bietet den Vorteil einer hindernisfreien, standardisierten Kommunikation in der ESP und mit den angeschlossenen Services. Daher wird den Services die Nutzung des EFDM empfohlen.

Im Rahmen des Konzepts der MP gibt es vier Hauptakteure, die zu berücksichtigen sind,

- **Marktplattform** (Betreiber): konzentriert sich auf den Betrieb und die Überwachung der MP.
- **Serviceanbieter**: stellen ihre Services auf der MP bereit und können andere Services in Anspruch nehmen.
- **Industrieunternehmen**: verfügen über die tatsächlichen Flexibilitätseinheiten und sind die Hauptnutzer von Flexibilitätservices.
- **Andere Servicenutzer**: andere Unternehmen, die mit einem Service interagieren könnten, wie z. B. ein Netzbetreiber.

Die Verbindung zwischen den verschiedenen Beteiligten (MP, Serviceanbieter und Unternehmen) wird in einer einfachen Weise dargestellt. Der erste Schritt für Serviceanbieter ist das Anbieten ihrer Services auf der MP. Sobald die Services auf der MP veröffentlicht sind, können Unternehmen nach den am besten für sie geeigneten Services suchen. Die Suche erfolgt dabei entweder manuell über die Webseite der MP (Portal) oder mittels Suchfunktionen, die über eine API von der UP auf die MP und dort hinterlegte Service-Beschreibungen zugreifen. Wenn das Unternehmen

⁵ Verschiedene Dienste und Akteure können miteinander verbunden werden.

einen interessanten Service auf der MP findet, kann es den Service über die MP beschaffen. Daraufhin wird eine Verbindung zwischen dem Service und der UP für die Erbringung des Services hergestellt. Es gibt also drei Kommunikationsbeziehungen:

- **Verbindung** zwischen **Serviceanbieter** und **MP** zur Serviceveröffentlichung und zur Vermittlung bei der Buchung
- **Verbindung** zwischen **Unternehmen** (bzw. UP) und **MP** zur Servicesuche und zur Vermittlung bei der Buchung
- **Verbindung** zwischen **UP** und **Service** für die Servicenutzung.

Die in den ersten beiden Punkten angesprochene Vermittlung bei der Buchung eines Service ist eine optionale Dienstleistung der MP. Voraussetzung ist, dass der Serviceanbieter seine Serviceschnittstellen mit einem geeigneten API Gateway verwaltet. In diesem Fall lässt es sich einrichten, dass Unternehmen den Service direkt auf der MP buchen, und die MP automatisiert die Registrierung der Kunden bei dem Service, die Buchung von Servicepaketen und die Bereitstellung von geschützten Zugängen zum Service übernimmt. Andernfalls können Unternehmen den Service lediglich auf der MP finden und kennenlernen und müssen sich für die Buchung direkt an den Serviceanbieter wenden.

Marktplattform

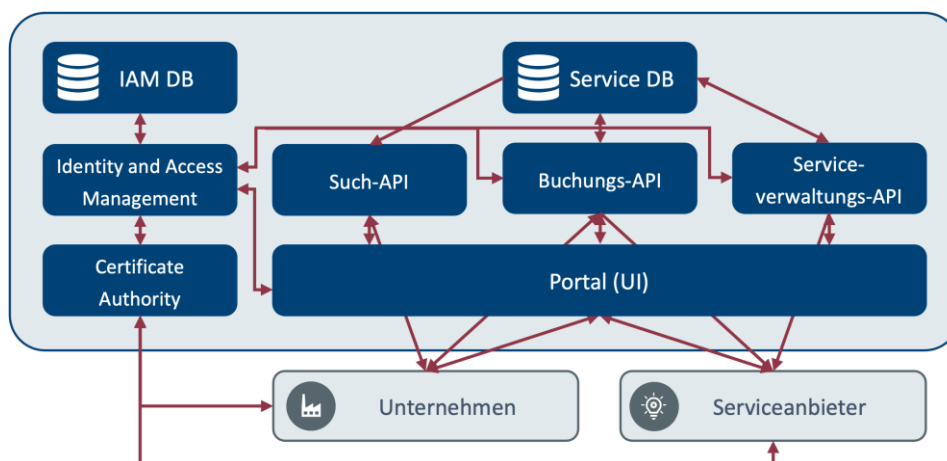


ABBILDUNG 3: AUFBAU DER MARKTPLATTFORM

Nicht dargestellt in Abbildung 3 ist die Verbindung zwischen anderen Servicenutzern wie Netzbetreibern und dem Service. Diese Verbindung funktioniert jedoch prinzipiell wie die Verbindung zwischen Unternehmen und Service. Der wesentliche Unterschied ist, dass die anderen Nutzer in der Regel keine UP haben, sondern bei sich eine Integration der Kommunikation mit dem Service in andere interne Systeme vornehmen.

Abbildung 3 zeigt den Aufbau der MP in einer abstrakten Form und die Interaktion von Unternehmen und Serviceanbietern mit den spezifischen Komponenten der MP. Hieran wird ersichtlich, dass es neben den Schnittstellen für die Kernfunktionalitäten auch Komponenten zur Absicherung der Plattform und des ESP-Ökosystems gibt. Die Identitäts- und Zugriffsverwaltung sorgt dafür, dass die meisten Aktionen auf der MP nur von autorisierten Entitäten durchgeführt werden können. Lediglich die Suche nach Services ist ohne Identifizierung und Autorisierung möglich, d.h. öffentlich zugänglich. Die Certificate Authority in der MP ist die Grundlage für die SynErgie-PKI (Public Key

Infrastructure). Damit können plattform-, unternehmens- und serviceübergreifend Identitäten bestätigt werden und Vertrauens- und Sicherheitsfunktionalitäten umgesetzt werden. Ausführliche Erläuterungen hierzu finden sich im Diskussionspapier IT-Sicherheit.

2.2 Services der Marktplattform

In Anlehnung an das Representational-State-Transfer-Paradigma (REST) (Rautenstrauch und Schulze 2003) und die resultierende Trennung von prozeduralen und ressourcenorientierten Schnittstellen wird auf der MP zwischen der Vermittlung von Services und Daten unterschieden. Services ermöglichen es den Nutzern, ggf. mit anderen Teilnehmern der ESP zu interagieren. Sie decken einen breiten Funktionsumfang ab, von der Datenverarbeitung bis hin zum Handel mit Flexibilität und Energieprodukten. Verglichen mit dem uniformen Austausch von Daten können die proprietären Schnittstellen je nach Anbieter stark variieren. Es werden jedoch standardisierte Ansätze für die Kommunikation als REST-API untersucht und später integriert. Der Aufruf der Schnittstellen kann zu Nebeneffekten führen und Veränderungen in der realen Welt nach sich ziehen. Eine semantische Annotation erleichtert ihre Auffindbarkeit und fördert den freien Wettbewerb zwischen Anbietern von vergleichbaren Services. Der Austausch von Daten lässt sich dank der kleinen Menge an benötigten Operationen über eine standardisierte, einheitliche Schnittstelle erfassen. Im Gegensatz zum Aufruf von Services hat der reine Datenaustausch im Allgemeinen keine unmittelbare Auswirkung auf die reale Welt und lässt sich daher unbegrenzt wiederholen. Beispielsweise können Zeitreihen von Wettervorhersagen oder Börsenpreise, aber auch verfügbare Flexibilitätsmengen in einem bestimmten Netzgebiet angefragt werden.

Unternehmen können für die Bewertung, Nutzung und Vermarktung von Flexibilität eine Vielzahl von integrierten Services der MP nutzen. Diese Services werden nachfolgend in Tabelle 1 vorgestellt. Detaillierte Steckbriefe zu den einzelnen Services werden zukünftig analog zu den Services der UP auf der [SynErgie-Webseite](#) zu finden sein.

TABELLE 1: SERVICES DER MARKTPLATTFORM

Service	Beschreibung	Input/Output	Service-Abhängigkeiten
<i>Flexibilitäts-einsatz-planungstool</i>	<i>Das übergeordnete Ziel dieses Service besteht in der marktübergreifenden Optimierung von Flexibilität auf Basis des Energieflexibilitätsdatenmodells (EFDM). Ein EFDM-Objekt beschreibt dabei die möglichen Flexibilitäten eines Unternehmens. Eine Optimierung ist dabei sowohl für minimale Eigenkosten als auch maximale Erträge möglich.</i>	Input: EFDM-Objekt (Flexible Last, Abhängigkeiten, Energiespeicher), Preisprognosen für Energie- und Flexibilitätsmärkte Output: EFDM-Objekt (Flexibilitätsmaßnahmen: „Fahrplan“ für Maschinen, die aktiviert werden sollen), Einsparpotenziale	<i>Strompreisprognosen können von anderen Services bezogen werden</i>
<i>Aggregator-flexibilitäts-handel</i>	<i>Vermarktung von Flexibilität über einen Aggregator (Ermöglichung des Zugangs zu Energiemärkten für Unternehmen, die bisher keinen Zugang besitzen)</i>	Input: EFDM (per Transformationskomponente) Output: Konkrete Flexibilitätsmaßnahme im EFDM-Format (per Transformationskomponente)	<i>auf der UP wird die Vermarktungskomponente und eine Transformationskomponente benötigt</i>

<i>Prognosedienste für Märkte und Netze</i>	<i>Bereitstellung von in die Zukunft gerichteten Zeitreihen bestehend aus prognostizierten Strompreisen verschiedener nationaler und lokaler Märkte.</i>	Input: geforderter zeitlicher Horizont der Prognose (Zeitstempel Beginn und Ende), Name des Produktes, Beispiel ⁶ Output: Angeforderte Zeitreihen bestehend aus Preisvorhersagen (Zeitpunkt, Preis)	<i>Service wird auf der UP über MIBS (Marktinformationsbeschaffungsservice) aufgerufen/ angefragt</i>
<i>Lokaler Flexibilitäts-handel</i>	<i>Vermarktung von Flexibilität auf lokaler Ebene (im Verteilnetzgebiet des Unternehmens). Der Dienst ist auf die Bereitstellung von Flexibilität für den lokalen Verteilnetzbetreiber ausgerichtet, um das Engpassmanagement zu unterstützen.</i>	Input: Flexibilitätsangebote, Buchungen und Aktivierungen Output: Handelsverträge, Abrufsignale und Abrechnungsinformationen	<i>auf der UP wird die Vermarktungskomponente und eine Transformationskomponente benötigt</i>

2.3 Unternehmensplattform

Die UP als ein Teil der ESP stellt das modulare, serviceorientierte, sichere und nach außen gekapselte informations- und kommunikationstechnische System innerhalb eines Unternehmens dar (Schel et al. 2018). In der UP finden einerseits Aufnahme, Aggregation, Analyse und Optimierung von Prozess- und Produktionsdaten statt sowie andererseits die energiesynchrone Steuerung und Regelung der Systeme, Anlagen und Komponenten. Die UP ermöglicht damit einen energieflexiblen Ablauf der Produktion (Schel et al. 2018). Hierzu werden die EFDM im Unternehmen über einen Service (Merger von Energieflexibilität) aggregiert, über die Schnittstelle zur MP an den Energiemärkten platziert und für verschiedene Services bereitgestellt. Abbildung 4 zeigt den generellen Aufbau der UP samt Schnittstellen zur MP und Außenwelt. Systeme und Anlagen können über die Konnektoren bzw. spezifischen Services eingebunden werden. Eine detaillierte Auflistung der Services findet sich am Ende dieses Abschnitts.

⁶ Beispiel: 01.10.21 00:00; 02.10.21 18:00; EPEX_INTRA_CONT15

Unternehmensplattform

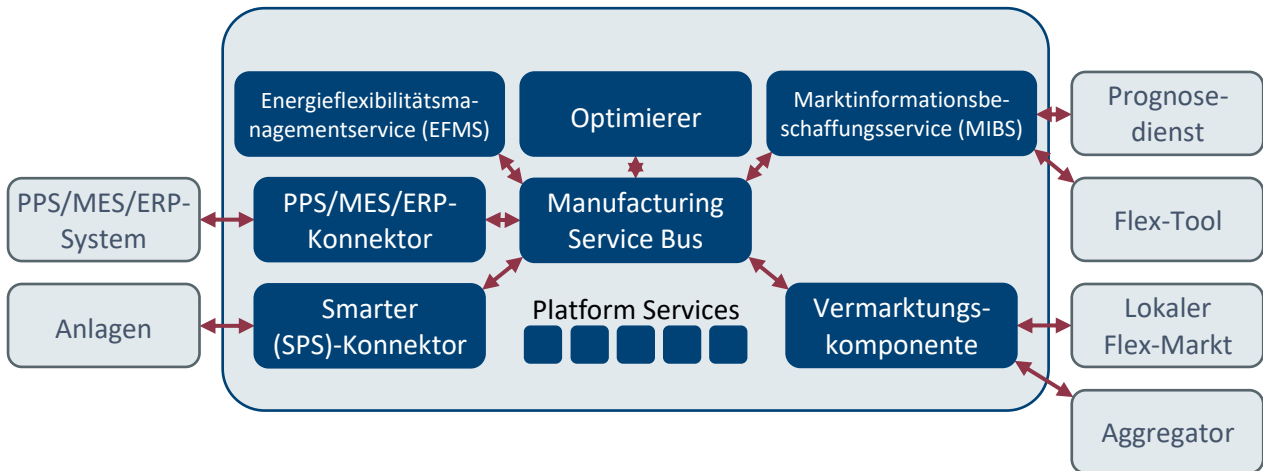


ABBILDUNG 4: AUFBAU DER UNTERNEHMENSPLATTFORM

In Anlehnung an Mell und Grance (2017) sind drei verschiedene Betriebskonzepte für die UP vorgesehen. Diese sind in Abbildung 5 dargestellt. Die private Plattform (als Private Cloud) als On-Premise-Lösung sieht vor, dass die UP im Unternehmen betrieben wird und hier alle energetisch relevanten Maschinen, Anlagen und IT-Systeme angebunden werden. Für Unternehmensgruppen oder -verbünde ist es möglich, für einzelne Business Units oder Standorte eine eigene UP zu betreiben, der eine unternehmensweite Plattform (Private Plattform) oder die Plattform eines Dienstleisters übergeordnet ist (als Hybrid Cloud). Im dritten möglichen Fall wird die UP durch einen Dienstleister öffentlich betrieben (als Public Cloud). Zu dieser Plattform können sich mehrere Unternehmen verbinden, wobei die Daten für jedes Unternehmen sicher gekapselt werden. Je nach Anforderungen, Größe und vorhandener technischer Ausstattung kann jedes Unternehmen individuell das passende Betriebskonzept auswählen. Beispielsweise ist es für kleinere Unternehmen sinnvoll, eine öffentliche Plattform zu wählen, um deren vorhandene IT-Infrastruktur und Rechenzentren zu nutzen.

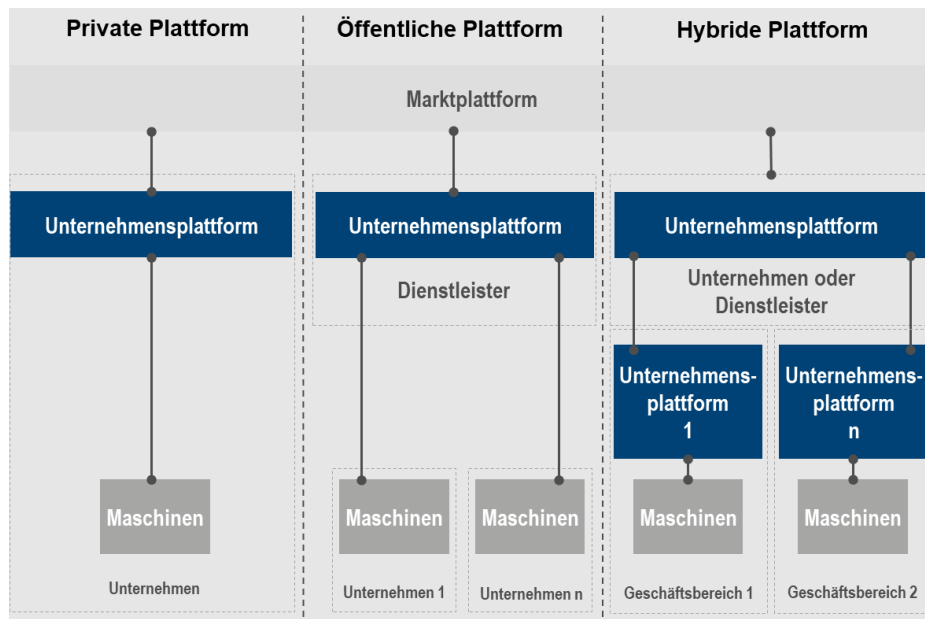


ABBILDUNG 5: MÖGLICHE BETRIEBSKONZEPTE DER UNTERNEHMENSPLATTFORM

Zusammenfassend sollen folgende zentrale Anforderungen durch die UP erfüllt werden:

- Die UP dient als Entwicklungs-, Vertriebs- und Betriebsplattform für Services mit Fokus auf energetischer Optimierung unter Flexibilitätsaspekten sowie Energiemanagement-as-a-Service (EMaaS).
- Die Skalierung über unterschiedliche Betriebskonzepte soll die unterschiedlichen Bedürfnisse der Unternehmen bedienen.
- Die Integration von Energie-, Prozess- und Betriebsdaten von Anlagen und Maschinen soll durch die Anbindung der Anlagen mittels Smarter Konnektoren vereinfacht werden.
- Services unterschiedlicher Anbieter sollen über eine Integrations- bzw. Abstraktionsschicht orchestriert und mit Anlagen und Maschinen integriert werden.
- Die Anbindung an die MP soll notwendig sein, um einen reibungslosen bidirektionalen Datenaustausch zwischen der UP und die von der MP vermittelten Services zu gewährleisten, um damit einen automatisierten Energieflexibilitätshandel zu ermöglichen.

Die UP spricht eine Vielzahl von Stakeholdern an und unterstützt sie unternehmensseitig bei der Erfassung sowie Optimierung der Flexibilität. Die Rollen im Kontext der UP sind wie folgt definiert:

- **Endkunde (End User):** Diese beziehen Services/Apps unterschiedlicher Hersteller über die ESP Plattform mit dem Ziel, eine passende Unterstützung ihrer Geschäftsprozesse abzubilden. Im vorliegenden Kontext sind dies produzierende Unternehmen, die ihrerseits Energieflexibilität bereitstellen können. Die energieflexible Produktion erfordert innerhalb des Unternehmens Akteure auf strategischer bis hin zur operativen Ebene, wobei insbesondere folgende direkte Stakeholder der UP zu berücksichtigen sind (VDI-Richtlinie 5207 Blatt 1): das Energiemanagement, durch welches Energieflexibilitätpotenziale identifiziert, koordiniert und verwaltet werden. Die Produktionsplanung und -steuerung für die Planung und Umsetzung der Energieflexibilität im operativen Betrieb und die Produktion, da eine Umsetzung von Energieflexibilität, vor allem in nicht automatisierten Produktionsbereichen, zusätzlich durch Tätigkeiten von Produktionsmitarbeitern (Produktionsleiter, Meister oder Facharbeiter), ausgeführt wird.
- **Plattformbetreiber (Platform Operator):** Dieser stellt den Betrieb der Plattform zur Bereitstellung von Services sicher sowie die Grundfunktionalitäten zur Serviceautomatisierung und -orchestrierung. Außerdem wahrt er die Integrität der Plattform (Governance) und gewährleistet die Funktionstüchtigkeit sowie Sicherheit der Dienste. Darüber hinaus dient er als erster Ansprechpartner gegenüber den Endkunden (First Level Support). Diese Rolle kann von den IT-Abteilung produzierender Unternehmen oder IT-Dienstleistern eingenommen werden. Während erstere die UP zur Eigennutzung betreibt (Private Plattform; siehe Abbildung 5), beschreibt letzteres ein Unternehmen, welches die UP nicht zur Eigennutzung, sondern für andere Unternehmen betreibt (Öffentliche Plattform).
- **Serviceanbieter in UP (Independent Service Vendor (ISV)):** Diese entwickeln Service- und Datenleistungen bzw. Software und stellen diese bereit, um den Funktionsumfang der UP zu erweitern. Diese Leistungen können auf Basis eigener und/oder vorhandener Services anderer ISV beruhen. Als Serviceanbieter können verschiedene Stakeholder auftreten: IT-Abteilungen produzierender Unternehmen, Softwareanbieter, Dienstleister (Berater, Integrator) und Hardwarehersteller/ -ausstatter (Anlagen, Sensoren, Aktoren).

Die UP besteht aus der zugrundeliegenden Infrastruktur und Basiskomponenten (Stock et al. 2014; Schel et al. 2018). Wie in Abbildung 6 dargestellt, bauen darauf die Services auf. Da sich die Architektur der UP nicht verändert hat, sei für eine ausführlichere Beschreibung an dieser Stelle auf das [Diskussionspapier V3](#) verwiesen (Reinhart et al. 2020).

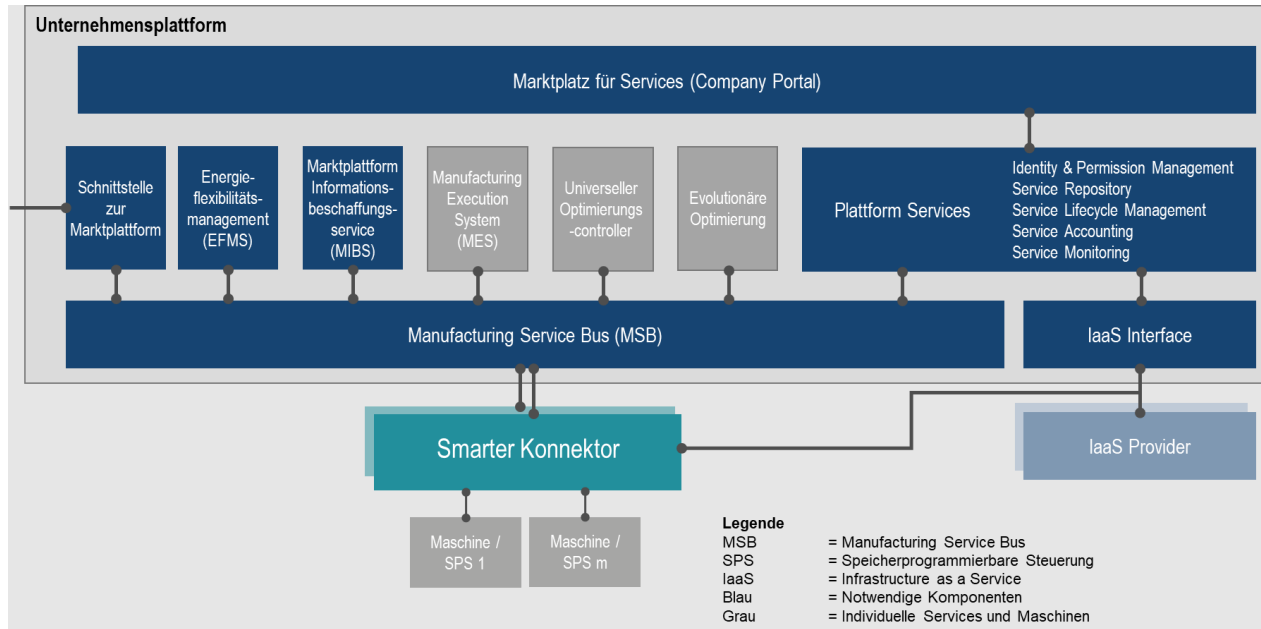


ABBILDUNG 6: ARCHITEKTUR DER UNTERNEHMENSPLATTFORM

Der Marktplatz für Services bietet den Einstieg in die Nutzung der Produktions-IT. Ähnlich zum bekannten Konzept des App Stores auf Smartphones ist hier eine Übersicht aller im Unternehmen verfügbaren Services zu sehen. Aus dem Marktplatz können die für die jeweilige Aufgabenstellung passenden Services ausgewählt werden, welche alle notwendigen Funktionalitäten abdecken (Schel et al. 2018).

Die Servicebereitstellungsumgebung der UP dient als Entwicklungs-, Vertriebs- und Betriebsplattform für Services mit Fokus auf energetischer Optimierung unter Flexibilitätsaspekten sowie Energiemanagement-as-a-Service (EMaaS). Im Rahmen des SynErgie-Projekts wird diese in Form einer Testumgebung durch das Fraunhofer IPA bereitgestellt. Bei der Umgebung zur Servicebereitstellung handelt es sich um einen abgegrenzten Netzwerkbereich, in dem Services für das Unternehmen bereitgestellt werden können. Diese Services werden über ein Company Portal in Form eines Self-Service ausgewählt und automatisiert instanziiert.

Der Manufacturing Service Bus (MSB) stellt die Middleware zur Service Orchestrierung, sowie den IIoT Hub zur Anbindung von physikalischen Objekten als IoT, der UP dar. Hiermit können Smarte Objekte und Applikationen nach drei Prinzipen bzw. der Kombination dieser intergiert werden:

- Publish-subscribe-based, z.B. für den kontinuierlichen Datenaustausch oder Monitoring
- Flow-based, z.B. ermöglicht die Interkonnektivität von unterschiedlichen und voneinander abhängigen Services für das Endresultat
- Event-driven, z.B. für die Ausführung spezifischer Vorgänge und Funktionalitäten

Für die Integration auch auf Informationsebene besteht die Möglichkeit, dass zwei verbundene Services im MSB dasselbe Datenmodell nutzen oder das mit Hilfe eines Daten-Mappings zwischen unterschiedlichen Datenmodellen übersetzt wird.

Die Schnittstelle **Infrastructure as a Service** (IaaS Interface) stellt das Bindeglied zwischen der UP und der Hardware dar, auf welcher die UP bereitgestellt wird (IaaS Provider). Je nach Betriebskonzept aus Abbildung 5 kann die Hardware hier entweder in Form eines unternehmenseigenen Rechenzentrums genutzt oder als Cloud-Angebot, beispielsweise bei Microsoft Azure oder Amazon Web Services, angemietet werden.

Der **Smarte Konnektor** (SK) ist eine Softwareschnittstelle, die es ermöglicht, Steuerungsdaten mit IT-Systemen und Cloud-Komponenten zu verbinden und damit Steuerungs- und Energiedaten aus unterschiedlichen Quellen zu integrieren. Hierzu werden Kommunikationsprotokolle, SPS und Netzwerkprotokolle möglichst echtzeitnah übersetzt. Während auf der SPS bereits heute in Millisekunden (Zykluszeit), und damit echtzeitnah, abgebildet werden kann, stellt insbesondere die Kommunikation mit Cloud-Applikationen noch eine Herausforderung dar. Mittelfristige technische Lösungsansätze hierfür bietet beispielsweise das Time-Sensitive Networking, das garantierte Antwortzeiten ermöglicht und auch mit weiteren Standards wie OPC UA kombiniert werden kann (TTTECH 2020).

Bei der Konfiguration eines SK werden in der Anlagenrepräsentation die Eigenschaften der angebotenen Anlagen sowie deren modellierten Flexibilitäten hinterlegt. Anlagendaten, die der SK ausliest, werden daher nicht direkt an die UP übertragen, sondern für das Ausfüllen der Felder des Energieflexibilitätsdatenmodells (EFDM) (siehe auch Diskussionspapier „[Energieflexibilitätsdatenmodell der Energiesynchronisationsplattform](#)“ (Buhl et al. 2021)) innerhalb des SK verwendet. Die Struktur der EFDMs wird bei der Einrichtung vom SK konfiguriert. Hierbei können für jede Kennzahl im EFDM eigene Formeln deklariert werden, welche wiederum optionale Abhängigkeiten zu Anlagendaten besitzen können. Der SK kommuniziert lediglich EFDMs an die UP welche vollständig ausfüllbar waren – sprich alle benötigten Anlagendaten konnten ausgelesen werden. Durch die Vorverarbeitung der ausgelesenen Anlagendaten innerhalb des SK kann eine Anonymisierung von Anlagendaten erfolgen. Die an die UP kommunizierten EFDMs dienen als Vermarktungsgrundlage. Im Abschnitt 3.1.1 sind weitere Details zur Erzeugung von EFDMs sowie zur Konfiguration von SKs zu finden.

Wird eine vom SK angebotene Flexibilität auf dem Markt erworben, wird ein Umsetzungssignal vom Markt, über die UP, bis hin zu dem SK durchgereicht, der das ursprüngliche EFDM erzeugt hat. Dieses Signal umfasst Informationen darüber, welche Flexibilität in welcher Ausführung zu welcher Uhrzeit auszuführen ist. In der Konfiguration des SK ist für jede anbietbare Flexibilität eine Reihe von Operationen hinterlegt, die beschreiben, welche Anlagendaten wie anzupassen sind, um die entsprechende Flexibilität auf der Anlagenseite umzusetzen. Diese Anweisungsbeschreibungen sind nur für den jeweiligen SK zugänglich und können von außerhalb nicht ausgelesen werden. Weitere Details sind in Abschnitt 3.1.4 zu finden.

Services und Apps sind die grundlegenden Bausteine von Cloud-Applikationen, die als Teil von definierten Integration Flows über den MSB mit anderen Services und Apps interagieren können.

Der **Energieflexibilitätsmanagementservice** (EFMS) dient als Broker für Energieflexibilitätsdatenmodelle (EFDM). EFDM gelangen von den EFDM-Quellen (Smarter Konnektor oder sonstige Services die verfügbare Energieflexibilität in Form des EFDM melden) über den EFMS bei den daran interessierten Services (Vermarktungs-Service,

Optimierungs-Service etc.). Der EFMS persistiert den zuletzt gemeldeten Zustand der EFDM und gilt damit als Single-Point-Of-Truth der EFDM. Der EFMS bietet einen Benachrichtigungsmechanismus für neue/veränderte EFDM (EFDM-Update-Broadcast) und einen Mechanismus, der es Services ermöglicht, EFDM abzufragen (EFDM-Request). Beim Erhalt einer Flexibilitätsumsetzungsanweisung (Flexibilitätsmaßnahme/Flexible-Load-Measure) leitet der EFMS diese an die Quelle des referenzierten EFDM weiter, wo dann die notwendigen weiteren Schritte eingeleitet werden, um die Flexibilität wie gefordert umzusetzen. Diese EFDM-Quelle kann dann auch die Umsetzung weiterer Flexibilitäten über den EFMS einleiten.

Der **Marktinformationsbeschaffungsservice** (MIBS) ermöglicht die Beschaffung von Informationen aus Services der MP zur Nutzung auf der UP. Diverse Dienste, die sich auf der UP befinden, benötigen Informationen von MP-seitigen Services. Ein Beispiel hierfür sind Optimierungsdienste, die Informationen zur Strompreisentwicklung o.Ä. benötigen. In Szenarien, in denen die Kommunikation innerhalb der UP nur über den MSB gestattet ist und nur wohl definierte Schnittstellen nach außen kommunizieren dürfen, fungiert der MIBS als solch eine Schnittstelle, welche externe Schnittstellen über den MSB anbindbar macht.

Die **Schnittstelle zur MP** ist ein weiterer grundlegender Service der UP. Der Zweck der Schnittstelle ist die Vermarktung von Energieflexibilität aus dem Unternehmen über Services der MP, nachdem innerhalb des Unternehmens eine manuelle oder automatische Entscheidung getroffen wurde. Dabei läuft die Schnittstelle ohne Benutzeroberfläche im Hintergrund und wird aus Sicherheitsgründen nur durch den zuvor beschriebenen EFMS aufgerufen. Andere Services auf der UP kommunizieren dann über den EFMS mit der Schnittstelle zur MP. Der EFMS nutzt hierbei die Schnittstelle zur Kommunikation von EFDMs (Schel et al. 2018).

2.4 Services der Unternehmensplattform

Neben den bereits beschriebenen Plattform Services, die zum grundlegenden Betrieb der UP notwendig sind, werden die Funktionalitäten zum automatisierten Energieflexibilitätshandel über verschiedene Services abgebildet, die je nach Unternehmen und Anwendungsfall individuell ausgestaltet sein können. Grundsätzlich adressieren die Services eine oder mehrere Ebenen der traditionellen Automatisierungspyramide (DIN EN 62264:2011) und damit auch deren umsetzbare EFM. Diese Services werden nachfolgend in tabellarischer Form vorgestellt (siehe Tabelle 2 bis Tabelle 6). Detaillierte Steckbriefe zu den einzelnen Services sind auf der [SynErgie Webseite](#) zu finden.

TABELLE 2: REFERENZSERVICES DER UNTERNEHMENSPLATTFORM TEIL 1

Service	Beschreibung	Input/Output	Service- Abhängigkeiten
<i>Automatisierte Detektion des Energieflexibilitätspotenzials für Produktionsanlagen</i>	<i>Das übergeordnete Ziel des Service ist es, zu ermöglichen, dass eine automatisierte Detektion der relevanten Komponenten in Maschinen und Anlagen anhand der Leistungsprofilen erfolgt.</i>	Input: CSV- Dateien Output: Leistungsdifferenz (kW) des Verbrauchers, Verrichtete Arbeit (kWh), Schalt bzw. Verbrauchsverhalten (min) Klassifizierung der Verbraucher	<i>Smarter Konnektor</i>
<i>Produktionsmanagement-Konnektor</i>	<i>Dieser Service ermöglicht die Anbindung von SAP-ERP Systemen an die UP.</i>	Input: Anfragen an das ERP-System Output: Angeforderte SAP-Datensätze	<i>generisch</i>
<i>Intelligentes Lastmanagement</i>	<i>Ziel dieses Service ist es ein neuartiges intelligentes System zum Managen und Schalten von industriellen Lasten zu schaffen.</i>	Input: Energietarif, Produktionsplan, Leistungs- und Energiedaten, Produktionsdaten von Maschinen- u. Anlagen, Prognose des Energiepreises von MP Output: Schaltbare Produktionslasten, Fahrplan, EFDM	<i>ePPS, EFMS</i>
<i>Energieorientierte Produktionsplanung und Steuerung (ePPS)</i>	<i>Mit dem ePPS-Service wird im Hinblick auf den Energieflexibilitätshandel das Ziel verfolgt, einen Service zu entwickeln, der den Planungsprozess von Produktionsaufträgen bei dem Anbieten und Umsetzen von EFM in produzierenden Unternehmen unterstützen soll.</i>	Input: Energietarif, Produktionsdaten, Prognose des Energiepreises von MP Output: Logistische Kenngrößen, Energieoptimierte Planungsalternativen und Bewertung, Bewertung der EFM	<i>generisch</i>

TABELLE 3: REFERENZSERVICES DER UNTERNEHMENSPLATTFORM TEIL 2

Service	Beschreibung	Input/Output	Service-Abhängigkeiten
<i>Gesamtkostenbasierte Produktionssteuerung</i>	<i>Das übergeordnete Ziel der Gesamtkostenbasierten Produktionssteuerung ist die Berechnung und monetäre Bewertung von Änderungen des Produktionsprogramms, die aufgrund der Vermarktung von Energieflexibilität vorgenommen werden.</i>	Input: <i>Produktionsstammdaten, Kostenfaktoren, Preisprognosen der Märkte</i> Output: <i>Kostensoptimale Belegungsplanung mit Darstellung der jeweiligen Kostenfaktoren</i>	<i>Prognosedienste für Märkte und Netze</i>
<i>Bewertung von Produktionsrisiken</i>	<i>Das Ziel dieses Service ist die Unterstützung bei der strukturierten und teilautomatisierten Identifikation, Kategorisierung und Bewertung von Produktionsrisiken. Der Service betrachtet Eintrittswahrscheinlichkeiten unerwarteter Ereignisse und deren Auswirken auf Produktions- und Energiekennzahlen.</i>	Input: <i>Produktionsplan, Energiebeschaffungspläne, Zeitpläne für die Stromerzeugung vor Ort, Identifizierte Produktionsrisiken, Maßnahmen zur Risikokompensation und Interdependenzen zwischen Risiken und Maßnahmen, Energieflexibilität</i> Output: <i>Risikobewertung, Visualisierte Risikopfade für Plan-Produktionsprozesse mit Eintrittswahrscheinlichkeit u. Auswirkungen auf Energiekosten und Produktionskennzahlen, Risikobedingter Produktionsplan</i>	<i>Gesamtkostenbasierte Produktionssteuerung, EFMS, Smarter Konnektor</i>
<i>Universeller Optimierungscontroller</i>	<i>Der Universelle Optimierungscontroller koordiniert eingesetzte Optimierungsservices, sofern sich die Ergebnisse der einzelnen Optimierungen beeinflussen und die Optimierungen nicht unabhängig voneinander sind.</i>	Input: <i>EFDM von Energieflexibilität mit aktuellen Prozessdaten, PPS- oder MES-Daten, Energiemarktdaten, insbesondere Preisprognosen</i> Output: <i>Koordinierte, gebündelte Ergebnisse aus den Einzeloptimierungen als EFDM, Energieoptimierte Auftragslisten, Prognostizierte Energiekurven</i>	<i>Optimierungsservices, Smarter Konnektor, Prognosedienste für Märkte und Netze, EFMS</i>

TABELLE 4: REFERENZSERVICES DER UNTERNEHMENSPLATTFORM TEIL 3

Service	Beschreibung	Input/Output	Service-Abhängigkeiten
<i>Evolutionäre Optimierung</i>	<i>Im Rahmen der Evolutionären Optimierung wird eine Vielzahl von Produktionsvarianten generiert, die sich in konkreten Produktionsparametern unterscheiden. Basierend auf evolutionären Prinzipien werden gute Produktionsvarianten verbessert.</i>	Input: <i>Analytische und statistische Zusammenhänge zwischen Produktionsparametern, Aktuelle Maschinendaten, Preisprognosen der Märkte</i> Output: <i>Optimierte Produktionsparameter, Prognostizierte Energiekurven</i>	<i>Smarter Konnektor, Prognosedienste für Märkte und Netze</i>
<i>Visuelle Flexibilitätserfassung in Form des Datenmodells</i>	<i>Ziel dieses Service ist es, mit möglichst geringer Anzahl an Abfragen den Informationsgehalt des Flexibilitätspotenzials von einem Fabrikbetreiber zu maximieren, um dieses möglichst realitätsgetreu abschätzen zu können. Dazu wird auch eine Ausfüllhilfe für die Kennzahlen des definierten EFDM in Form einer Web-Applikation erstellt.</i>	Input: <i>EFDM-Kennzahlen</i> Output: <i>Nutzbares EFDM</i>	<i>Smarter Konnektor</i>
<i>Energieflexibilitätsmanagementservice (EFMS)</i>	<i>Der Energieflexibilitätsmanagementservice (EFMS) ist ein grundlegender Service der UP und hat die Aufgabe, die im Unternehmen vorhandenen Energieflexibilitätsdatenmodelle (EFDM) von den Quellen an die interessierten Services zu leiten und die Zustände der EFDM zu speichern. Hierzu reichen alle Services die EFDM generieren (Smarter Konnektor, Optimierungsservices etc.) die EFDM an den EFMS weiter. Der EFMS verwaltet diese und fungiert als Broker, der den Erzeuger einer Energieflexibilität speichert und bei einem Signal zur Umsetzung von Flexibilität (Flexibility Load Measure) die Quelle des EFDM zur Realisierung der Energieflexibilität auffordert.</i>	Input: <i>EFDM von Energieflexibilität, Energieflexibilitätsmaßnahme</i> Output: <i>EFDM von Energieflexibilität, Delegierte Realisierung einer Energieflexibilität</i>	<i>generisch</i>

TABELLE 5: REFERENZSERVICES DER UNTERNEHMENSPLATTFORM TEIL 4

Service	Beschreibung	Input/Output	Service-Abhängigkeiten
<i>Marktinformationsbeschaffungsservice (MIBS)</i>	<i>Der MIBS ermöglicht das Konsumieren von marktplattformseitigen Services (Preisprognosen etc.) auf Seiten der UP.</i>	Input: <i>Konfigurationsdateien der marktplattformseitigen Services, Anfrage des konsumierenden Service</i> Output: <i>Antwort des zu konsumierenden marktplattformseitigen Services</i>	<i>generisch</i>
<i>Merger von Energieflexibilität⁷</i>	<i>Durch den beschriebenen Service werden einzelne Flexibilitäten kombiniert (aggregiert) und kombinierte Flexibilitäten wieder in ihre ursprünglichen Flexibilitäten aufgeteilt (disaggregiert). Dies gilt sowohl für Flexibilitätsräume als auch -maßnahmen.</i>	Input: <i>Liste von EFDMs, EFDMs, EFM</i> Output: <i>Disaggregierte (dekombiniert) EFDMs, Aggregierte (dekombinierte) EFDMs/EFMs</i>	<i>Smarter Konnektor, EFMS, Visuelle Flexibilitätserfassung in Form des Datenmodells</i>
<i>Pooling-Optimierung</i>	<i>Die Pooling-Optimierung stellt einen Algorithmus zur systematischen Optimierung von mehreren Anlagen mit separaten EFDMs der Produktionsinfrastruktur mit deutlichem Maschinenbezug dar.</i>	Input: <i>Betriebszustände der Maschinen, Maschinen oder Marktprognosen, Parameter</i> Output: <i>Stellsignale, Informationsanfrage, Optimierungsergebnisse (GUI)</i>	<i>Smarter Konnektor, Prognosedienste für Märkte und Netze/MIBS</i>
<i>Nutzenergiebedarfsprognose</i>	<i>Der Service der Nutzenergiebedarfsprognose zielt auf das Bereitstellen von Bedarfsprognosen für Prozesskälte oder – Wärme ab.</i>	Input: <i>Betriebszustände der Maschinen, Service Anfrage, Wetterdaten, Produktionsplan</i> Output: <i>Service-Anfragen, Bedarfsprognose</i>	<i>Smarter Konnektor, Pooling-Optimierung, ePPS,</i>

⁷ Beinhaltet ebenfalls die Disaggregation von Energieflexibilität (Demerger)

TABELLE 6: REFERENZSERVICES DER UNTERNEHMENSPLATTFORM TEIL 5

Service	Beschreibung	Input/Output	Service-Abhängigkeiten
<i>Batterieeinsatzoptimierung</i>	<i>Der Service Batterieeinsatzoptimierung ermöglicht die Realisierung der Energieflexibilität in der Produktion durch die Verwendung von Lithium-Ionen-Batterien der elektrisch betriebenen fahrerlosen Transportfahrzeuge (FTF) als Speicher..</i>	<p>Input: <i>FTF-Daten, Ladestationsdaten, MES-Daten, Service-Anfrage</i></p> <p>Output: <i>Lade- und Entlade-Scheduling für die FTF-Batterien, Energieflexibilität als EFDM</i></p>	<i>EFMS</i>
<i>Vermarktungsservice (Vermarktungskomponente)</i>	<i>Die Vermarktung der identifizierten EFDM erfolgt über einen Vermarktungsservice. Dieser kann mit verschiedenen Marktplätzen interagieren und übernimmt dazu die Übersetzung von EFDM in das Zieldatenmodell. Beispiele für Marktplätze sind der lokale Flexibilitätsmarkt der Energieflexiblen Modellregion Augsburg oder die Vermarktung über Aggregatoren. Der Service kann entweder per UI genutzt oder für eine automatisierte Marktinteraktion konfiguriert werden.</i>	<p>Input: <i>Konfiguration (bspw. Marktzugangsdaten), EFDM, Vermarktungssignale (Kauf, Abruf)</i></p> <p>Output: <i>Registrierte Märkte, Flexibilitätsinsetrate, Vermarktungsinformationen</i></p>	<i>EFMS, Markt-APIs</i>

3 PROZESSE / INFORMATIONENFLÜSSE

Die Prozesse der ESP wurden mittels TOGAF – ein Vorgehensmodell zur Entwicklung von Unternehmensarchitekturen, erhoben und modelliert. Ausgehend von den Zielen der ESP wurden Rahmenbedingungen, Geschäftsprozesse, Anwendungsprozesse und Informationsflüsse insb. in der Geschäftsarchitektur und der Informationssystemarchitektur abgebildet. Eine Übersicht ist in Abbildung 7 dargestellt.

< > TOGAF Architecture Content Framework

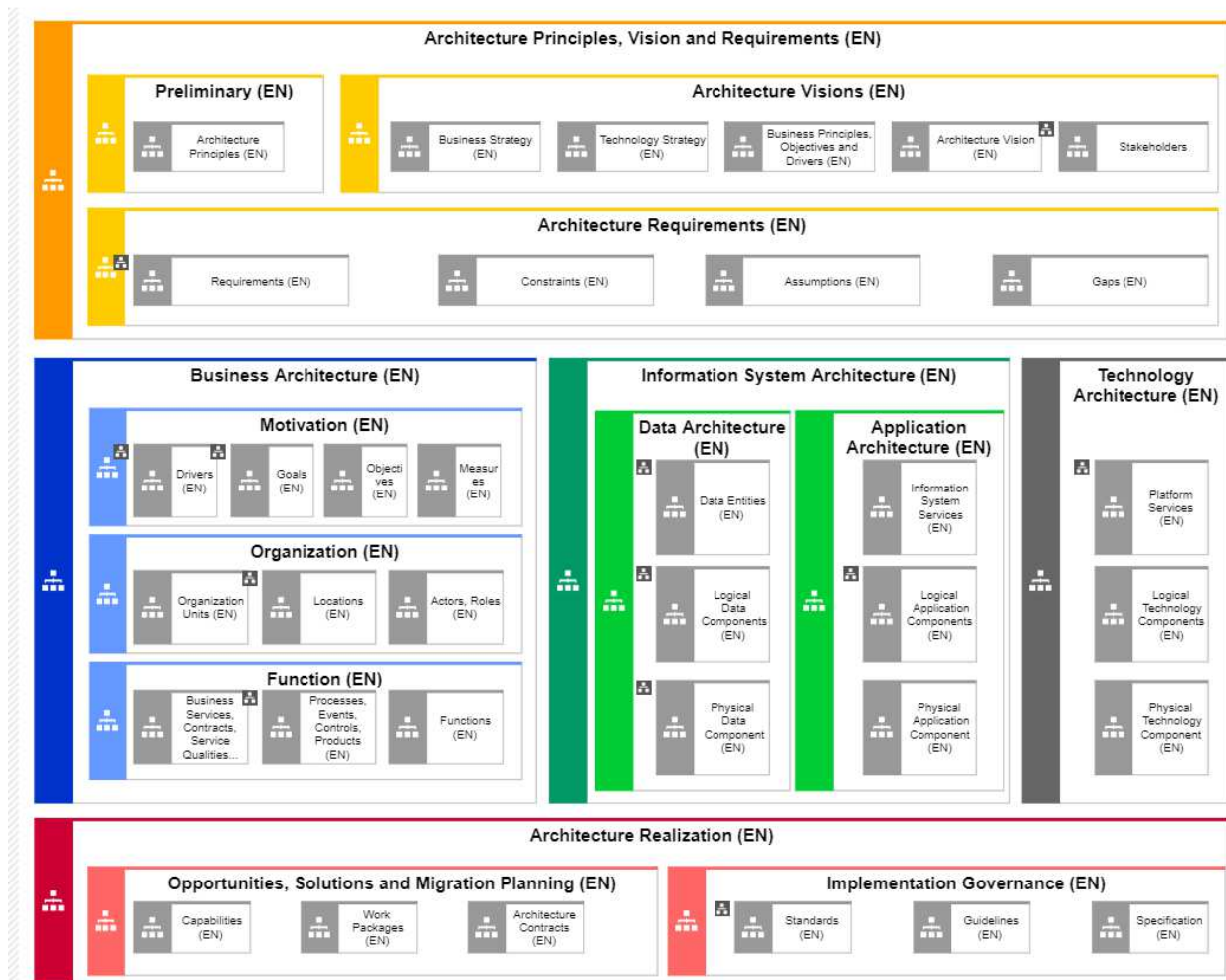


ABBILDUNG 7: ARCHITEKTURÜBERBLICK NACH TOGAF⁸ MIT HINTERLEGTE ESP-SPEZIFISCHEN MODELLEN

⁸ <https://pubs.opengroup.org/architecture/togaf9-doc/arch/>

3.1 Referenzprozesse

Die Geschäftsprozesse der ESP wurden in unterschiedlichen Granularitäten modelliert. Einen Einstieg in die Prozesse bietet die unten dargestellte Prozesslandkarte in Abbildung 8, in der die Prozessarchitektur in Kernprozesse, Managementprozesse und unterstützende Supportprozess untergliedert ist.

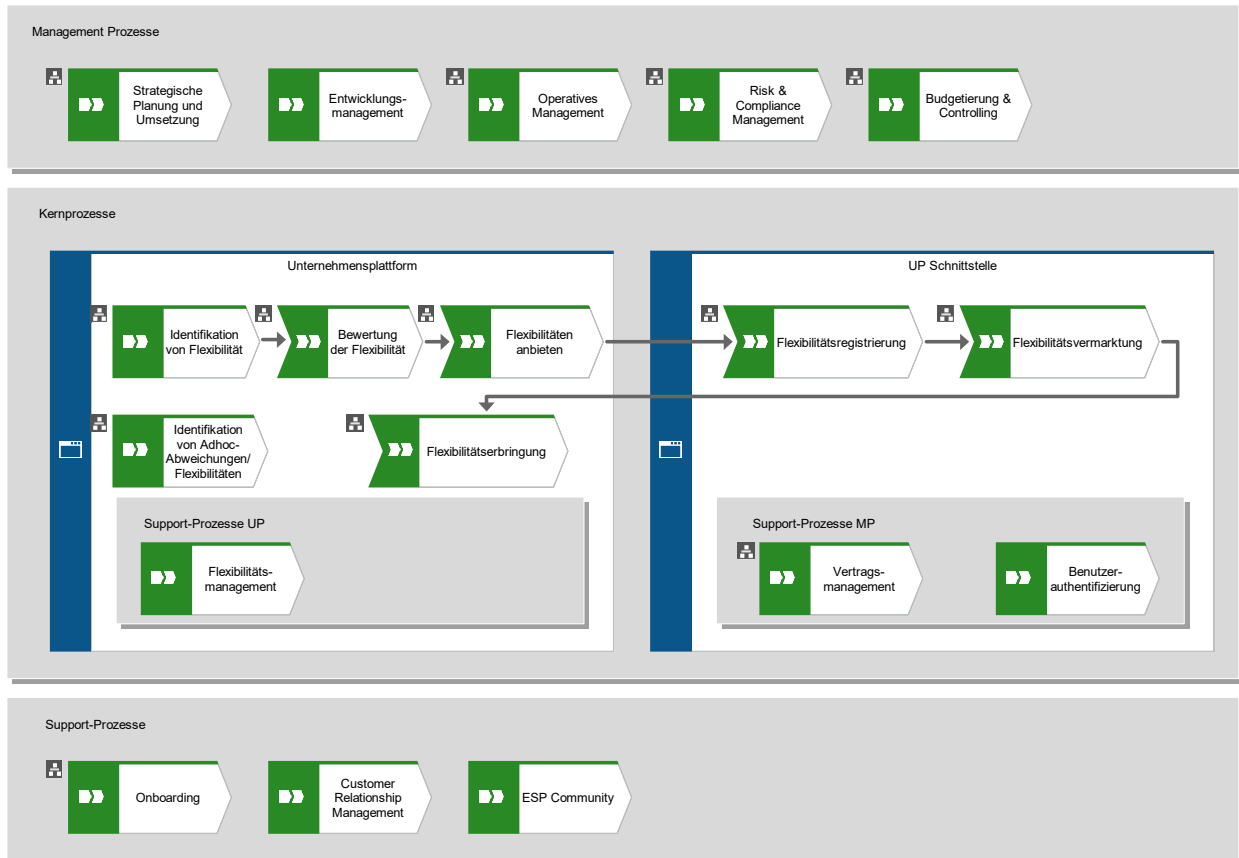


ABBILDUNG 8: ESP-PROZESSLANDKARTE

Die Kernprozesse beschreiben, wie Unternehmen ihre Flexibilitäten ermitteln, beschreiben, vermarkten und erbringen. Im Rahmen der „Identifikation von Flexibilität“ wird unter Zuhilfenahme relevanter Unternehmensdaten (Sensorik, Produktionsplanung, etc.) die verfügbare Flexibilität bestimmt und in Form eines EFDM modelliert. Die ermittelten Flexibilitäten werden anschließend bewertet und es wird über deren Vermarktung entschieden, wobei eine Optimierung genutzt werden kann. Nach erfolgter Vermarktung sind entsprechende Flexibilitätsmaßnahmen zu erbringen. Da all diese Abläufe sehr unternehmensspezifisch sind, wurden Referenzprozesse definiert und bereitgestellt, die als Prozessvarianten auf das eigene Unternehmen angepasst werden können.

3.1.1 Wie erzeuge ich ein EFDM?

Der initiale Schritt zur Erzeugung eines EFDMs⁹ ist die Potenzialanalyse oder eine komplementäre Untersuchung nach VDI 5207 Blatt 1 (VDI-Richtlinie 5207 Blatt 1) und 2 (VDI-Richtlinie 5207 Blatt 2). Hierbei können bspw. Werkzeuge verwendet werden, wie das [Flex-Audit-Tool](#) zur Identifikation von Flexibilitäten innerhalb einer Produktionslinie und der [E-Flex-Scanner](#) zur Bewertung von Flexibilitäten auf Versorgungstechnikebene, welche im Rahmen des SynErgie-Projektes entwickelt wurden. Damit lassen sich zunächst entsprechende Potenziale aufzeigen und abschätzen. Im nächsten Schritt muss für die ausgewählten Anlagen, jeweils eine Anbindung an die IT-Infrastruktur der ESP erfolgen. Dazu ist die Implementierung eines Smarten Konnektors (SK) erforderlich.

Für die Implementierung des SK ist die Erstellung des EFDMs für jede anzubindende Anlage erforderlich. Hierzu müssen die Flexibilitätsräume der Anlage mit Hilfe der erforderlichen Kennzahlen des EFDM berechnet und beschrieben werden. Weitere Infos über die erforderlichen Kennzahlen sind im Diskussionspapier „[Energieflexibilitätsdatenmodell der Energiesynchronisationsplattform](#)“ nachzulesen (Buhl et al. 2021). Die Berechnung erfolgt dabei im aktuellen Projektfortschritt noch manuell. Für den weiteren Projektverlauf wird eine teilautomatisierte Berechnung der Kennzahlen angestrebt. Die berechneten Kennzahlen können anschließend, mittels des UP-Services „EFDM GUI“, in das erforderliche JSON-Format überführt und via UP Kommunikation an den SK initial übermittelt werden. Den groben Ablauf der einzelnen Teilschritte zeigt Abbildung 9.

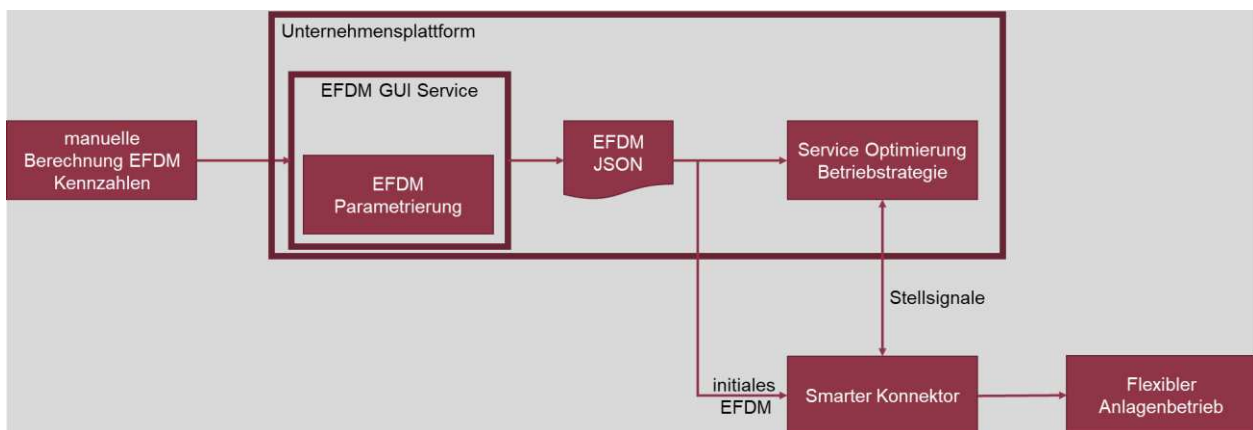


ABBILDUNG 9: AKTUELLE TEILSCHRITTE ZUR ERSTELLUNG EINES EFDM ZUM FLEXIBLEN ANLAGENBETRIEB

Für die Installation des Smarten Konnektors wird eine Hardware oder eine virtuelle Maschine benötigt, auf der Windows 7 oder höher installiert ist, welche Netzwerkzugriff auf die benötigten Anlagen hat und die auf die UP zugreifen kann. Bei der Installation und Konfiguration des SK muss feststehen, welche Anlagen angebunden werden sollen, welche Flexibilitätsräume (siehe Diskussionspapier „[Energieflexibilitätsdatenmodell der Energiesynchronisationsplattform](#)“ (Buhl et al. 2021)) es zu modellieren gilt, und welche Anlagendaten für die Umsetzung der jeweiligen Flexibilitäten vom SK angepasst werden müssen. Die anzubindenden Anlagen ergeben sich durch die bereits erkannten Flexibilitäten.

⁹ Ein EFDM kann auch die abstrakte Repräsentation von alternativen Fertigungsplänen sein. Solche EFDM könnten aus einem Optimierer (Energieorientierte Produktionsplanung und -steuerung (ePPS) oder Gesamtkostenbasierte Produktionssteuerung) kommen der alternative Fertigungssequenzen generiert und diese als EFDM formuliert.

Durch das zuvor im JSON-Format kommunizierte EFDM kann der SK konfiguriert werden. Zu konfigurieren sind die folgenden Bereiche:

- Anlagenkonnektivität:
 - Welche Anlagen müssen ausgelesen bzw. gesteuert werden? Wie lauten die Verbindungsparameter, z.B. IP-Adresse und zu verwendendes Protokoll?
- Flexibilitätsräume:
 - Welche EFDMs sollen vom SK angeboten werden? Müssen bestimmte Kennzahlen um Anlagendaten wie Sensorwerte oder Betriebszustände erweitert werden? Von welcher Anlage werden welche Parameter benötigt?
- Umsetzungsbeschreibung:
 - Welche Operationen wie das Überschreiben von Anlagendaten müssen für die Flexibilitätsumsetzung durchgeführt werden?

Sofern ein EFDM nur aus statischen Parametern besteht, muss der SK es vor der Übergabe an den EFMS in der UP nicht weiter anpassen. Sind dynamische Parameter vorhanden, muss der SK diese Parameter vor der Übergabe um die referenzierten Anlagendaten ergänzen und final einen Wert berechnen. Die Erkennung und das anschließende Auslesen und Berechnen erfolgt automatisiert auf dem SK.

3.1.2 Nutzung des EFDM zur Optimierung/Aggregation von Energieflexibilität

Ein zentraler Bestandteil der ESP bilden die Optimierungsservices (vgl. Abschnitt 2.4), welche auf den verschiedenen Ebenen einer Fabrik einsetzbar sind, um einen optimalen energieflexiblen Betrieb von Fabriken und Industrieanlagen zu ermöglichen. Hierzu werden die EFDM Informationen vom SK via MSB an den EFMS übermittelt, sodass sich die Optimierungsservices durch Pull Request EFDMs abrufen können. Anschließend können die Optimierer (Details sind dem Diskussionspapier „[Optimierung auf der Energiesynchronisationsplattform](#)“ (Schilp et al. 2021) zu entnehmen) bspw. Schaltsignale an den SK oder das fabrikeigene MES-System übermitteln. Ein beispielhafter Ablauf ist in Abschnitt 3.2 aufgezeigt.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das vermarktbare Flexibilitätspotenzial zu vergrößern, indem mehrere kleine Anlagen zu einem gemeinsamen Flexibilitätsraum kombiniert werden. Dazu dient bspw. der Merge-Service (siehe Servicebeschreibung in Abschnitt 2.4). Neben der Kombination von Flexibilitätsräumen ist auch eine Kombination von Flexibilitätsmaßnahmen geplant (Lindner et al. 2022). Ein Beispiel für die Verwendung im Kontext des ESP zeigt Abschnitt 3.2.1.

Darüber hinaus findet Optimierung nicht nur auf der UP statt. Unter Verwendung von Services, wie z.B. dem Energieflexibilitätseinsatzplanungstool, können auf der MP optimale Vermarktungsmöglichkeiten für Flexibilität identifiziert werden. Die Ergebnisse der marktseitigen Optimierung können von internen UP-Optimierungsservices genutzt werden, um die geeignetste Möglichkeit auszuwählen, Flexibilität bereitzustellen und den geeignetsten Markt für deren Vermarktung.

3.1.3 Vermarktung einer Energieflexibilität

Die Services, die sich mit der Vermarktung von Flexibilitäten befassen (konkret Aggregatoren und lokaler Flexibilitätsmarkt), müssen eine Verbindung zwischen dem Industrieunternehmen und ihrem Service herstellen, um den Dienst außerhalb der MP zu betreiben. Die Kommunikation wird auf der Seite der UP über die Vermarktungskomponente und eine für den jeweiligen Zielservice spezifische Transformationskomponente mit zwei Hauptzielen hergestellt.

Das erste Ziel ist es, das Bindeglied zwischen der UP und dem Serviceanbieter für den Informationsaustausch zu sein. Das zweite Ziel besteht darin, den Serviceanbietern die Informationen und Datenformate zur Verfügung zu stellen, die sie für ihren Betrieb benötigen. Da es sich bei dem Informationsaustausch auf der UP hauptsächlich um EFDM-Objekte handelt, wandelt die servicespezifische Transformationskomponente die Informationen dann in das entsprechende Datenformat des Serviceanbieters um. In gleicher Weise wandelt die Transformationskomponente das Datenmodell des Service in das EFDM um, wenn der Serviceanbieter mit dem Unternehmen kommunizieren möchte.

Daher hat jeder spezifische Service seine eigene Transformationskomponente, die von der MP heruntergeladen und in die UP eines Unternehmens integriert werden kann. Die Vermarktungskomponente ist hingegen eine allgemeine, interoperable Komponente. Da die Zielservices jedoch spezifisch sind, kann die Vermarktungskomponente diese nicht direkt ansprechen, sondern ist auf die Hilfe der Transformationskomponenten angewiesen.

3.1.4 Ausführung einer Energieflexibilitätsmaßnahme

Beim Erhalt eines Umsetzungssignals (Energieflexibilitätsmaßnahme) reicht der EFMS dieses an die Services weiter, die die Energieflexibilität gemeldet haben (Quelle des EFDM). Die jeweiligen Services sind dafür verantwortlich, alle nötigen Schritte einzuleiten, um die Flexibilität wie gefordert, zu erbringen. In diesem folgenden Beispiel ist der Service, der das EFDM erzeugt hat, ein Smarter Konnektor (SK).

Sobald das Umsetzungssignal am entsprechenden SK ankommt, entnimmt dieser dem Signal die relevante Information über die betroffene Anlage und den anzufahrenden Leistungszustand. Anhand dieser Daten bestimmt der SK die umzusetzende Flexibilität. Zur Realisierung der entsprechenden Flexibilität sind in einer lokalen Konfigurationsdatei eine Reihe von Operationen hinterlegt. Diese beschreiben die notwendigen Maßnahmen und Einstellungen, um den gewünschten Lastgang der Flexibilität zu erreichen. Diese Operationen können nur vom entsprechenden SK eingesehen werden. Sie werden außerhalb, bspw. zur UP hin, nicht angeboten.

```
<step type="write">  
  <variableName>Ofen01.modus</variableName>  
  <value>1</value>  
</step>
```

ABBILDUNG 10: BEISPIEL FÜR DIE DEFINITION EINER SCHREIB-OPERATION IN DER KONFIGURATIONSDATEI EINES SMARTEN KONNEKTORS

Die Ausführung einer Flexibilität wird über die native Kommunikationsschnittstelle der anzusteuern Anlagen realisiert. Unter anderem vertreten sind Beckhoff ADS, Siemens RFC 1006 oder OPC-UA. Über diese Schnittstellen können die Werte von Variablen im Steuerungsprogramm geändert werden. Die vom SK durchzuführende Reihe von

Operationen bestehen aus einer Sammlung von Lese- und Schreibbefehlen, welche in der Konfiguration vom SK für die jeweilige Flexibilität hinterlegt wurde. In Abbildung 10 ist ein Beispiel für eine Schreib-Operation gegeben. In der Operation ist definiert, dass der Wert der Variable "modus" der Steuerung "01" mit dem neuen Wert "1" überschrieben werden soll. Die Konfiguration beinhaltet Informationen darüber, zu welchen Steuerungen eine Verbindung aufgebaut werden soll. In diesem Fall sind für den Namen "Ofen01" die benötigten Verbindungsdetails angegeben, wie das zu verwendende Protokoll oder die IP-Adresse. Abstraktere Interaktionen, wie bspw. ein Knopfdruck, lassen sich ebenfalls simulieren, indem die Variable vom Knopf auf *true* gesetzt wird, ein fester Zeitraum gewartet wird, in der Regel sind 100ms mehr als ausreichend, abhängig von der verwendeten Steuerung, und anschließend der Wert wieder auf *false* gesetzt wird. Die Operationen werden nacheinander, nicht parallel, ausgeführt.

Da der Zugriff auf Variablen möglich ist, deren Änderungen von außen nicht vorgesehen sind, wird die Empfehlung ausgesprochen, dass für die Ausführung einer Flexibilität nur Variablen der Mensch-Machine-Schnittstelle (HMI) überschrieben werden sollen, deren Änderungen im SPS-Programm in der Regel berücksichtigt sind. Dabei ist zu beachten, dass für die HMI gesetzte Grenzwerte für Eingabefelder vom SK nicht ausgelesen und somit auch nicht berücksichtigt werden können. Demnach ist die Definition der Ausführung am besten in Zusammenarbeit mit den zuständigen Steuerungstechnikern durchzuführen, um sicherzugehen, dass in den konfigurierten Operationen die Grenzwerte berücksichtigt werden. Zukünftig sollen entsprechende Grenzwerte in der Konfiguration vom SK als zusätzlicher Schutz hinterlegt werden können, jedoch sind Absprachen mit Steuerungstechnikern weiterhin stark zu empfehlen.

Nachdem die Flexibilität für die angegebene Haltedauer aktiv war, soll die UP über die erfolgreiche Durchführung informiert werden, wofür es noch das entsprechende Verfahren zu bestimmen gilt. Im gleichen Zug kommuniziert der SK die zu dem Zeitpunkt aktuell möglichen Flexibilitäten an die UP und der Vermarktungsprozess beginnt von vorne.

3.2 Beispielhafte Anwendungsfälle

In diesem Abschnitt wird an drei verschiedenen Beispielen gezeigt, wie die ESP eingesetzt wird. Die drei Anwendungsfälle bauen aufeinander auf und es wird jeweils eine Grundlage für den nächsten Anwendungsfall geschaffen. Daher steigt die Komplexität der Anwendungsfälle vom ersten bis zum letzten an. Der erste Anwendungsfall verwendet nur einen Service, wohingegen die anderen beiden Anwendungsfälle verschiedene Services sowohl auf der UP als auch auf der MP nutzen. Es wird empfohlen, die Anwendungsfälle der Reihe nach durchzugehen, da die Erläuterungen im ersten Anwendungsfall für den folgenden Anwendungsfall als gegeben vorausgesetzt werden.

3.2.1 Anwendungsfall 1: Flexibilität eines Ofens wird über Aggregator vermarktet

Für den ersten Anwendungsfall betrachten wir ein Industrieunternehmen, das einen Ofen einsetzt. Der Ofen kann entweder mit Strom oder Gas betrieben werden, um Wärme zu erzeugen. Standardmäßig wird der Ofen mit Gas beheizt. Das Industrieunternehmen kann durch den Wechsel auf den Energieträger Strom seinen Strombedarf während eines bestimmten Zeitraums erhöhen, was Flexibilität (Erhöhung der Nachfrage) darstellt. Dieses Flexibilitätspotenzial wird als flexible Last gemäß EFDM dargestellt. Hierin ist die elektrische Leistung aller möglichen Betriebspunkte des Ofens in kW erfasst. Auf der UP des Unternehmens wird die Beschreibung der flexiblen Last vom Smarten Konnektor (SK) über den Manufacturing Service Bus (MSB)¹⁰ zum Energieflexibilitätsmanagementservice (EFMS), das Repository für EFDM-Objekte des Unternehmens, weitergeleitet.

Das Industrieunternehmen möchte die Flexibilität (Erhöhung der Last) vermarkten, weiß aber nicht, an welchem Markt es diese Last gut vermarkten kann. Daher beschließt das Industrieunternehmen, nachdem es über den Servicekatalog auf der MP verschiedene Möglichkeiten identifiziert hat, den Service eines Aggregators zu verwenden. Da das Industrieunternehmen und der Aggregator zum ersten Mal interagieren, muss das Unternehmen von der MP die Vermarktungskomponenten und die für den Aggregator spezifische Transformationskomponente herunterladen, deren Ziele in Abschnitt 3.1.3 beschrieben sind. Sobald die Vermarktungskomponente inklusive der Transformationskomponente innerhalb der UP des Industrieunternehmens eingerichtet ist, kann das Industrieunternehmen seine Flexibilität an den Aggregator übermitteln. Dazu ruft die Vermarktungskomponente zunächst die Flexibilität über den MSB vom EFMS ab. Je nach gewünschter Konfiguration im Unternehmen kann hier eine Freigabe der Flexibilität durch eine Person (z. B. durch jemanden aus dem Energiemanagement des Unternehmens) stattfinden oder die Verarbeitung erfolgt vollautomatisch. Nach der optionalen Freigabe übermittelt die Vermarktungskomponente unter Zuhilfenahme der Transformationskomponente, welche die Flexibilität im EFDM-Format in ein aggregatorspezifisches Format übersetzt, an den Aggregator.

Im Anschluss entscheidet der Aggregator auf der Grundlage seines Portfolios und seiner Geschäftsmodelle, wo er das Flexibilitätspotenzial des Industrieunternehmens vermarktet. Sobald der Aggregator entschieden hat, wann, wo und wie viel der Flexibilität er vermarkten will, muss er dies dem Industrieunternehmen mitteilen, damit dieses die Flexibilität für den Abruffall bereithalten kann. Die Kommunikation läuft dabei ebenfalls über die UP. Ergeben die Handelsaktivitäten des Aggregators, dass das Unternehmen seine elektrische Last erhöhen muss, wird dieser Flexibilitätsabruf ebenfalls über die UP angestoßen und durchgeführt. Der Aggregator sendet die Abrufinformation an die entsprechende Schnittstelle der Transformationskomponente. Die Transformationskomponente erstellt aus den

¹⁰ Komponenten auf der UP-Seite kommunizieren über die MSB-Middleware miteinander.

empfangenen Informationen eine Flexibilitätsmaßnahme als EFDM-Objekt und gibt diese an die Vermarktungskomponente. Je nach Konfiguration erfolgt hier wieder eine Freigabe durch eine Person oder die Verarbeitung läuft vollautomatisch weiter. Danach geht die Flexibilitätslastmaßnahme über den MSB an den EFMS. Schließlich wird die im EFMS gespeicherte Flexibilitätsmaßnahme über den MSB zurück an den smarten Konnektor gegeben. Anschließend aktiviert der smarte Konnektor die Flexibilität des Ofens basierend auf den Informationen der Flexibilitätsmaßnahme, sobald diese erbracht werden soll.

Basierend auf der vorherigen Beschreibung des ersten Anwendungsfalls stellt Abbildung 11 eine Vereinfachung des Kommunikationsprozesses zwischen dem Unternehmen und dem Aggregator dar. Bei dieser Darstellung wird davon ausgegangen, dass die Vermarktungskomponente bereits installiert ist.

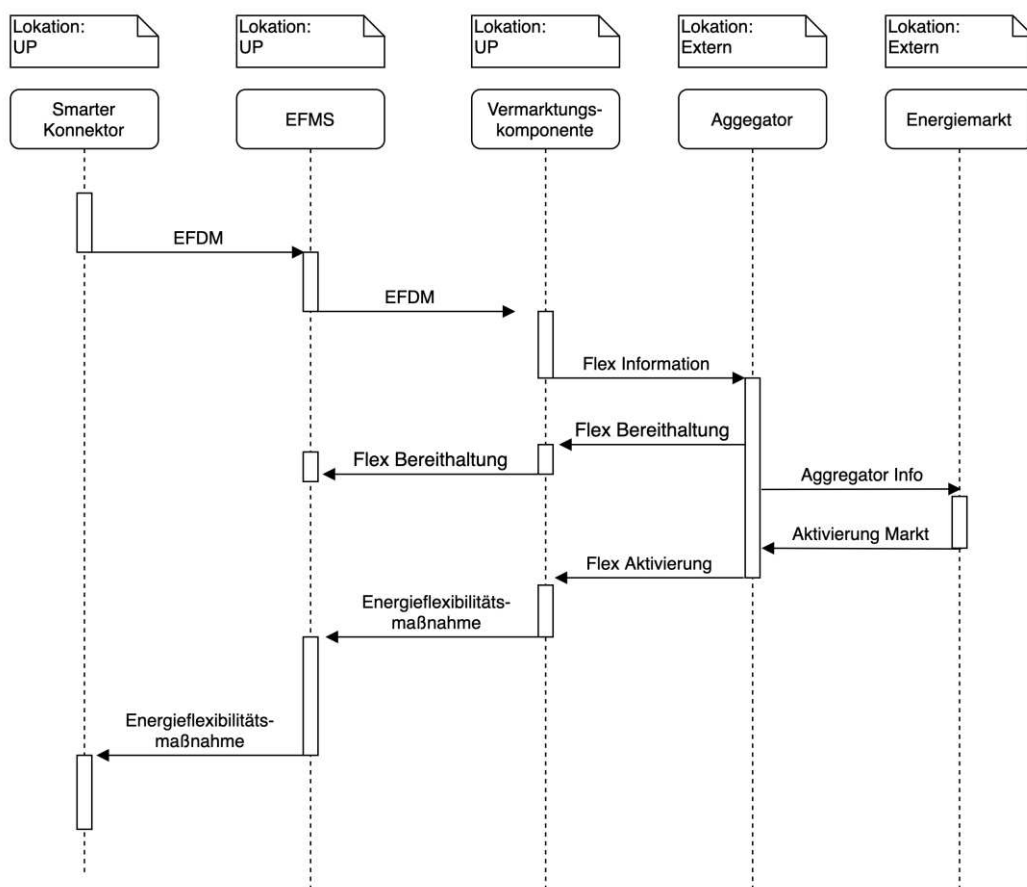


ABBILDUNG 11: FLEXIBILITÄT EINES OFENS WIRD ÜBER EINEN AGGREGATOR VERMARKTET (SEQUENZDIAGRAMM)

3.2.2 Anwendungsfall 2: Flexibilitäten mehrerer Öfen werden über Aggregator vermarktet

Dieser Anwendungsfall baut auf dem ersten Anwendungsfall auf. In diesem Anwendungsfall (siehe Abbildung 12) verfügt ein Unternehmen nicht nur über einen Ofen mit einer Flexibilität, sondern über mehrere Öfen, die als flexible Lasten genutzt werden können. Diese Flexibilitäten werden über einen Aggregator auf dem Energiemarkt vermarktet. Auf welchem Energiemarkt der Aggregator diese Flexibilität vermarktet, wird nicht betrachtet. Die Verwendung mehrerer Öfen erfordert die Nutzung eines zusätzlichen Service auf der UP. Der sogenannten EFDM-Merge-Service

(vgl. Abschnitt 2.4) fasst alle Flexibilitäten zu einer einzigen zusammen, die dann über die Vermarktungskomponente an den Aggregator weitergegeben wird.

Ähnlich wie im Anwendungsfall 1 erstellt der Smarte Konnektor zu jedem Ofen eine Beschreibung der flexiblen Last per EFDM. Das EFDM-Objekt gibt der Smarte Konnektor über den MSB an den EFMS zur Speicherung weiter. Da das Unternehmen seine Flexibilitäten der einzelnen Öfen für die Vermarktung an den Aggregator zu einer einzigen Flexibilität zusammenfassen muss, nutzt es den Merge-Service auf der UP. Der Merge-Service stellt dann über den MSB eine Verbindung mit dem EFMS her und erstellt ein EFDM-Objekt für die zusammengeführte Flexibilität, das wiederum im EFMS gespeichert wird. Das neue, zusammengefasste EFDM-Objekt wird nun an den Aggregator-Service weitergegeben, der später die Flexibilität vermarktet und ggf. vom Unternehmen abrufen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Hauptunterschied zwischen Anwendungsfall 1 und 2 die Berücksichtigung mehrerer Öfen und damit die Notwendigkeit eines Merge-Services auf der UP ist.

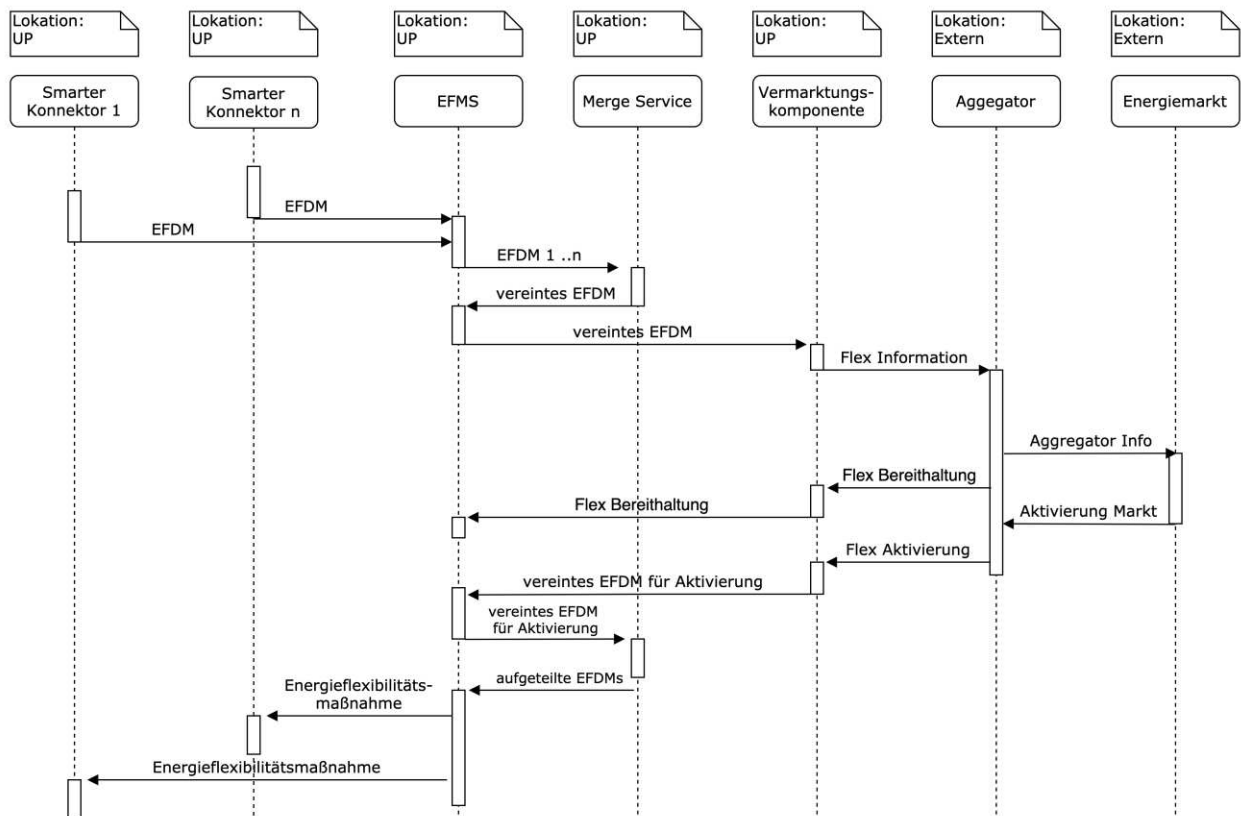


ABBILDUNG 12: FLEXIBILITÄTEN MEHRERER ÖFEN WERDEN ÜBER EINEN AGGREGATOR VERMARKTET (SEQUENZDIAGRAMM)

3.2.3 Anwendungsfall 3: Flexibilitäten mehrerer Öfen werden über lokalen Flexibilitätsmarkt vermarktet

Der letzte in diesem Diskussionspapier beschriebene Anwendungsfall ist eine leichte Abwandlung des vorherigen Anwendungsfalles 2. Der Hauptunterschied besteht in der Vermarktung der Flexibilität, die hier über den lokalen Flexibilitätsmarkt (LFM) erfolgt. Das zugehörige Ablaufdiagramm ist in Abbildung 13 zu finden.

Der Ablauf, in dem das Industrieunternehmen die Flexibilitäten seiner Öfen in ein einziges EFDM-Objekt zusammenführt – wie im vorherigen Anwendungsfall beschrieben – bleibt in diesem Anwendungsfall bestehen. Da hier zur Vermarktung ein anderer marktseitiger Service genutzt werden soll, muss das Industrieunternehmen die Transformationskomponente des LFM herunterladen und auf seiner UP installieren, so dass diese nun von der Vermarktungskomponente genutzt werden kann. Die Schnittstelle zwischen Industrieunternehmen und LFM wird durch die LFM-Transformationskomponente geschaffen.

Der Verteilnetzbetreiber (VNB) verbindet sich über eine Webseite mit dem LFM. Innerhalb des LFM kann der VNB nach verschiedenen Flexibilitäten suchen, die dort angeboten werden. In diesem Anwendungsfall gehen wir davon aus, dass der VNB die vom Unternehmen angebotene Flexibilität kaufen und auch direkt die Aktivierung anfordern möchte. Der LFM wickelt den Beschaffungsprozess intern ab und informiert das Industrieunternehmen per Nachricht an die LFM-Transformationskomponente, dass das Angebot des Unternehmens angenommen wurde und auch aktiviert wird. Da es sich bei dem Flexibilitätsangebot um eine zusammengefügte Flexibilität handelt, die Flexibilitäten mehrerer Öfen enthält, müssen diese mittels des Merge-Services wieder voneinander getrennt werden (ähnlich, wie im vorherigen Anwendungsfall beschrieben). Sobald dieser Prozess abgeschlossen ist, kommuniziert der EFMS über den MSB mit dem Smarten Konnektor und übermittle die relevanten Betriebsparameter, sodass die Öfen ihre Flexibilität zur vorgesehenen Zeit bereitstellen.

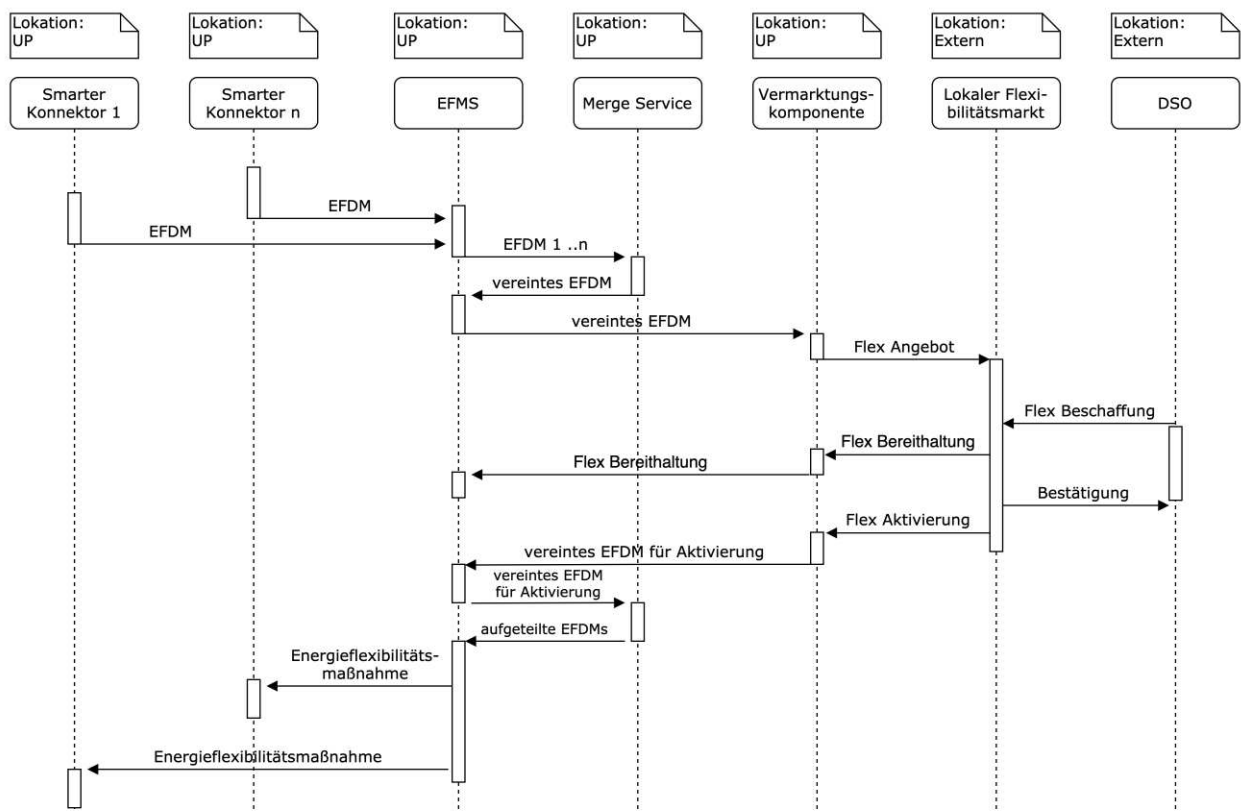


ABBILDUNG 13: FLEXIBILITÄTEN MEHRERER ÖFEN WERDEN ÜBER EINEN LOKALEN FLEXIBILITÄTSMARKT VERMARKTET (SEQUENZDIAGRAMM)

4 FAZIT UND AUSBLICK

Dieses Diskussionspapier beschreibt aktuelle konzeptionelle Entwicklungen und Implementierungen der Energiesynchronisationsplattform (ESP)-Referenzarchitektur im Rahmen des SynErgie-Projektes. Diese Aktualisierung unterstützt die Idee, durch die in SynErgie geleistete Arbeit Leitlinien für die Industrie anzubieten. Es soll erstens gezeigt werden, was aktuell technisch entwickelt wird und zweitens eine erste Blaupause bereitstellen für Diskussionen und Systeme, die zukünftig entwickelt und implementiert werden sollen. Die ständige Weiterentwicklung der Referenzarchitektur im Rahmen von SynErgie trägt zum Wachstum und zur Weiterentwicklung der Lösungen bei, die auf den automatisierten und flexiblen Handel von Energieflexibilität in der Industrie abzielen. Die Bedeutung des Flexibilitätspotenzials innerhalb der Industrieunternehmen kann die Innovation erheblich vorantreiben und vor allem einen wichtigen Beitrag zur Energiewende leisten.

Die Aktualisierung, die in diesem Diskussionspapier vorgestellt wird, bietet einen tieferen Einblick in die ESP-Referenzarchitektur aus zwei Blickwinkeln, der Marktplattform (MP) und der Unternehmensplattform (UP). Dies sind die zwei wichtigsten Konzepte, die die ESP in die Lage versetzen, einen automatisierten industriellen Flexibilitätshandel zu ermöglichen. Darüber hinaus werden die Beschreibungen der MP und UP durch die Darstellung verschiedener Dienste, sogenannter Services, ergänzt. Services unterstützen Anwender beim automatisierten Handel von Flexibilität (sowohl markt- als auch unternehmensseitig). Die Vielzahl der für die UP und MP entwickelten Services resultiert aus der Komplexität und Diversität einzubindender Prozesse und Systeme für den automatisierten Flexibilitätshandel auf der Industrie- und Marktseite.

Die Aktualisierung in diesem Diskussionspapier gibt ebenfalls einen Überblick über die verschiedenen Prozesse, die für den Informationsaustausch notwendig sind. Dabei werden auch Verbindungen und Verweise zu den weiteren Veröffentlichungen (Diskussionspapieren) hergestellt, da jeder Aspekt angemessen behandelt werden muss. Darüber hinaus haben wir uns entschieden mit Hilfe von drei beispielhaften Anwendungsfällen in diesem Diskussionspapier den Ablauf des Informationsflusses innerhalb der ESP zu zeigen. Die drei Anwendungsfälle sind in ihrer Komplexität gestaffelt und dienen als Hauptbeispiele, um zu erklären, wie die Informationen zwischen dem Service oder mehreren Services und zwischen der UP, der MP und den Services ausgetauscht bzw. übertragen werden. Die Einbeziehung dieser Anwendungsfälle hilft den Leserinnen und Lesern, den Kommunikationsprozess in einer standardisierten Weise (durch Sequenzdiagramme) zu verstehen. Dies ermöglicht auch in internen Gesprächen und Diskussionen im Rahmen des SynErgie-Projekts eine klare Sicht auf die Funktionsweise des Kommunikationsprozesses bei der Nutzung von Services.

Dennoch können die in diesem Diskussionspapier vorgestellten Informationen nicht als endgültig angesehen werden. Viele der in diesem Diskussionspapier vorgestellten Konzepte werden Änderungen erfahren, wenn wir uns auf reale Systemimplementierungen zubewegen und die Services weiter testen.

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.
- 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.
- 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 (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.
- DIN EN 62264:2011: DIN EN 62264:2011, Integration von Unternehmens-EDV und Leitsystemen.
- 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.

Haupt, L.; Körner, M.-F.; Schöpf, M.; Schott, P.; Fridgen, G. (2020): Strukturierte Analyse von Nachfrageflexibilität im Stromsystem und Ableitung eines generischen Geschäftsmodells für (stromintensive) Unternehmen. In: *Z Energiewirtschaft* 44 (2), S. 141–160. DOI: 10.1007/s12398-020-00279-5.

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.

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.

Mell, P.; Grance, T. (2017): The NIST Definition of Cloud Computing. Online verfügbar unter <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf>, zuletzt geprüft am 19.06.2020.

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.; Bauer, D.; Vasquez, F. G.; Schulz, F.; Bauernhansl, T. (2018): IT Platform for Energy Demand Synchronization Among Manufacturing Companies. In: *Procedia CIRP* 72, S. 826–831. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.237.
- 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.
- Stock, D.; Stöhr, M.; Rauschecker, U.; Bauernhansl, T. (2014): Cloud-based Platform to Facilitate Access to Manufacturing IT. In: *Procedia CIRP* 25, S. 320–328. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.045.
- TTTECH (2020): Time-Sensitive Networking (TSN). IEEE Standard Ethernet for Guaranteed Real-Time Communication. Online verfügbar unter <https://www.tttech.com/technologies/time-sensitive-networking-tsn/>, zuletzt geprüft am 11.08.2020.
- 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 2, 2021-01: VDI 5207 Blatt 2:2021-01 - Entwurf.

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

