



Alexander Sauer
Hans Ulrich Buhl
Alexander Mitsos
Matthias Weigold

ENERGIEFLEXIBILITÄT IN DER DEUTSCHEN INDUSTRIE

Band 2: Markt- und Stromsystem,
Managementsysteme und Technologien
energieflexibler Fabriken

KOPERNIKUS
SynErgie **PROJEKTE**
Die Zukunft unserer Energie

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Alexander Sauer
Hans Ulrich Buhl
Alexander Mitsos
Matthias Weigold

ENERGIEFLEXIBILITÄT IN DER DEUTSCHEN INDUSTRIE

Band 2: Markt- und Stromsystem, Managementsysteme und
Technologien energieflexibler Fabriken



Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird bei Personenbezeichnungen und personenbezogenen Begriffen in diesem Buch das generische Maskulinum verwendet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für alle Geschlechter. Die verkürzte Sprachform hat nur redaktionelle Gründe und beinhaltet keine Wertung.



Geleitwort des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

Liebe Leserinnen und Leser,

vollständige Klimaneutralität 2045 und ein möglichst rasches Ende der Abhängigkeit von fossilen Energieimporten – wir stehen vor großen energiepolitischen Herausforderungen.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung versteht sich als Schrittmacher der Energiewende. Bereits im Jahr 2016 haben wir die Kopernikus-Projekte ins Leben gerufen.

Denn: Wer Tempo in der Energiewende will, braucht Spitzenforschung – und einen effektiven Brückenschlag in die Anwendung. Die Kopernikus-Projekte und SynErgie stehen genau hierfür.

Dieser zweite SynErgie-Band zeigt die erfolgreiche Arbeit des Projekts. Neben Lösungen für die großen Energieverbraucher hat SynErgie mit der Betrachtung von Kälte- und Wärmeanlagen die Anwendung von Energieflexibilität auch für kleine und mittlere Unternehmen möglich gemacht. Zudem zeigt der erfolgreiche Test der SynErgie-Energiesynchronisationsplattform, dass der Handel mit Flexibilität binnen kürzester Zeit umgesetzt werden könnte.

In den nächsten Jahren gilt es, die in diesem Buch umfassend dargestellten Konzepte in die breite Anwendung zu bringen und, wo nötig, weiterzuentwickeln. Denn nur mit Lösungen wie denen aus SynErgie lässt sich die Energiewende erfolgreich umsetzen.

Bei angewandter Energieflexibilität profitieren im Idealfall alle:

- Die Umwelt, weil Energieflexibilität die Integration von erneuerbaren Energien im Netz unterstützt.
- Die Bürgerinnen und Bürger, weil wir durch Energieflexibilisierung weniger Netzausbau benötigen.
- Die Netzbetreiber, weil ihnen die Flexibilitäten bei der Stabilisierung der Stromnetze helfen.
- Und die Unternehmen, die ihre Stromnachfrage an das Stromangebot anpassen, weil sie ihre Flexibilität als Dienstleistung verkaufen können und von niedrigeren Stromkosten profitieren.

Die Ergebnisse des SynErgie-Projekts zeigen eindrücklich, was Forschung bewirken kann, wenn Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft von Anfang an zusammenarbeiten. Ich bin beeindruckt und stolz, dass der Plan unserer Kopernikus-Initiative so erfolgreich aufgegangen ist: SynErgie ist Forschung, die Wirkung zeigt. Dafür vielen Dank an alle Projektpartner und allen Leserinnen und Lesern eine anregende Lektüre.

Herzlichst,

Ihr Christoph Rövekamp

Leiter des Referats »Energie; Wasserstofftechnologien« im Bundesministerium für Bildung und Forschung

Vorwort der Herausgeber

Liebe Leserinnen und Leser,

seit der Klimakonferenz in Paris im Dezember 2015 sehen sich alle Länder mit der Frage konfrontiert, wie die Zukunft der Energieversorgung gestaltet werden kann und wie klimafreundliche Technologien mit dem Ziel der Klimaneutralität etabliert werden können (United Nations, 2015; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2018). Mit dem Green Deal hat sich die Europäische Union verpflichtet, bis 2050 keine Treibhausgasemissionen mehr freizusetzen (Europäische Kommission, 2019). Die deutsche Bundesregierung möchte dieses Ziel bereits im Jahr 2045 erreichen (Bundes-Klimaschutzgesetz, 2019).

Eine wichtige Säule hierfür ist das Vorantreiben des Ausbaus erneuerbarer Energien. Deutschland ist in diesem Bereich Technologie- und Innovationstreiber und konnte im Jahr 2020 bereits 47,4 Prozent des deutschen Bruttostromverbrauchs durch erneuerbare Energien abdecken. 2021 gab es wegen schlechterer Wetterbedingungen und eines stark steigenden Stromverbrauchs einen Rückgang auf 42,6 Prozent (Bundesnetzagentur, 2021a; Bundesnetzagentur, 2022). Die deutsche Bundesregierung strebt an, bis 2030 einen Anteil der erneuerbaren Energien von 65 Prozent am Bruttostromverbrauch zu erreichen, und das bei weiterhin steigendem Stromverbrauch (Erneuerbare-Energien-Gesetz EEG, 2021). Die neue deutsche Bundesregierung hat sich diesbezüglich im Dezember 2021 vorgenommen, »neues Tempo in die Energiewende [zu bringen], indem wir Hürden für den Ausbau der Erneuerbaren Energien aus dem Weg räumen« (SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und FDP, 2021). Auch global ist ein stark ansteigender Ausbau erneuerbarer Energie mit einem Rekordwert an neu installierter Leistung von 290 GW im Jahr 2021 zu erkennen (International Energy Agency, 2021).

Für eine erfolgreiche Umsetzung solch hoher Anteile erneuerbarer Energien muss ein Energiesystem geschaffen werden, das mit der zunehmend fluktuierenden Stromeinspeisung als Folge des steigenden Anteils erneuerbarer Energien umgehen kann (Fell, 2020; Papaefthymiou et al., 2018). Wie relevant dies ist, zeigt sich auch an der zunehmenden Anzahl von Stunden mit negativen Strompreisen am Day-Ahead-Markt: Diese Stunden mit einem Überschuss erneuerbarer Energien im Stromsystem stiegen von 126 Stunden im Jahr 2015 auf 298 Stunden im Jahr 2020 (Bundesnetzagentur, 2021a).

Für die erfolgreiche Gestaltung der Energiewende rief das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Jahr 2015 die Kopernikus-Projekte ins Leben und initiierte die bis dahin größte nationale Forschungsinitiative zur Energiewende. Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft entwickeln gemeinsam technologische und wirtschaftliche Lösungen für den Umbau hin zu einem klimaneutralen Energiesystem (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2021). Die Kopernikus-Projekte verfolgen vier große Forschungsvorhaben:

- Ariadne – Politische Maßnahmen für eine erfolgreiche Gestaltung der Energiewende
- ENSURE – Weiterentwicklung der Stromnetze



- P2X – Umwandlung erneuerbarer Energie in stoffliche Energieträger
- SynErgie – Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung

Eine der großen Herausforderungen bei der Etablierung einer nachhaltigen Versorgung durch erneuerbare Energien liegt in deren fluktuierender Stromerzeugung. Die Leistung aus Windkraft und Photovoltaik schwankt kurzfristig über die Tageszeit sowie langfristig im Jahresverlauf, z. B. durch untertägige, mehrtägige oder saisonale Wetterveränderungen. Um das Stromsystem bei einem wachsenden Anteil erneuerbarer Energien jederzeit im notwendigen Gleichgewicht von Erzeugung und Verbrauch zu halten, bedarf es großer Mengen an Energiespeicherkapazitäten, Netzausbau und Sektorenkopplung sowie Flexibilität auf der Verbraucherseite (Babatunde et al., 2020). Solange dies nicht erreicht ist, müssen auf der Erzeugerseite kostenintensive Regeleingriffe erfolgen. Im Jahr 2020 wurden hierfür 1,4 Milliarden Euro aufgewendet und durch die Netzentgelte u. a. von allen Bürgern bezahlt (Bundesnetzagentur, 2021b).

Die aus heutiger Sicht erforderlichen Investitionen in die Energieversorgungs- und Netzinfrastruktur können reduziert werden, wenn sich die Entwicklung weg von einer zentralen, verbrauchsorientierten Erzeugung hin zu einer dezentralen, erzeugungsorientierten Verbrauchssteuerung bewegt (Raquet und Liotta, 2013; Deutsche Energie-Agentur, 2017). Innerhalb dieses Paradigmenwechsels wird die Industrie, die in Deutschland einen Anteil von etwa 44 Prozent am Stromverbrauch hat, mehr und mehr dazu übergehen müssen, sich dem Energieangebot flexibel anzupassen (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2021). Der Faktor Energie wird somit zu einer variablen Planungs- und Steuerungsgröße im Produktionsbetrieb.

Hier setzt das Kopernikus-Projekt SynErgie mit über 90 Projektpartnern aus Industrie, Wissenschaft, Verbänden und Zivilgesellschaft an. Industrielle Prozesse werden weiterentwickelt, elektrifiziert und flexibilisiert mit dem Ziel, Strom vermehrt dann zu nutzen, wenn er reichlich vorhanden und damit kostengünstig ist, sowie entsprechend weniger, wenn das Gegenteil der Fall ist. Seit September 2016 forscht im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie deutschlandweit eine ganze Generation an hochmotivierten Wissenschaftlern, um den Technologievorsprung deutscher Unternehmen zu sichern und den Grundstein für eine bessere und klimaneutrale Zukunft zu legen. Die Umstellung des deutschen Energiesystems auf volatile erneuerbare Energien soll dadurch ermöglicht und unterstützt werden.

Wichtige Ergebnisse zum Flexibilitätspotenzial der deutschen Industrie, zu konkreten Anwendungen in der industriellen Produktion sowie zur automatisierten Vermarktung der Flexibilität hatten wir bereits im ersten Band unseres Fachbuchs »Energieflexibilität in der deutschen Industrie« dargestellt (Sauer, Abele und Buhl, 2019). Mit dem vorliegenden zweiten Band greifen wir die Thematik erneut auf und geben Ihnen einen Einblick in zwischenzeitlich zusätzlich erarbeitete, wichtige Ergebnisse. Wir wünschen Ihnen viel Freude beim Lesen!

Es grüßen Sie herzlichst,

Ihr Alexander Sauer, Hans Ulrich Buhl, Alexander Mitsos und Matthias Weigold

Im Januar 2022

Die Herausgeber



© Fraunhofer IPA/Rainer Bez

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. **Alexander Sauer**, Jahrgang 1976, ist Leiter des Instituts für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart sowie Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA.

Er hat an der RWTH Aachen Maschinenbau und Betriebswirtschaftslehre studiert, am WZL der RWTH Aachen promoviert und dort verschiedene nationale und internationale Forschungs- und Industrieprojekte geleitet. Anschließend war er verantwortliches Mitglied der Geschäftsleitung eines internationalen Automobilzuliefererunternehmens für den Bereich Operations. Alexander Sauer folgte vor seinem Wechsel nach Stuttgart einem Ruf an die Hochschule München, der mit der Leitung des

Labors für angewandte Fertigungstechnik verbunden war. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich des Produktionsmanagements sowie der energie- und ressourceneffizienten Produktion.

Prof. Sauer ist Autor zahlreicher Publikationen und national sowie international in verschiedenen Beiratsfunktionen und Gutachtergremien engagiert. Gemeinsam mit Prof. Abele leitete Prof. Sauer die erste dreijährige Förderphase des Kopernikus-Projekts SynErgie. Mit der Verabschiedung von Prof. Abele in den Ruhestand und dem Beginn der zweiten Förderphase hat er die alleinige Leitung übernommen.



© Björn Seitz – kontender.Fotografie

Dr. **Hans Ulrich Buhl**, 1955 in Esslingen geboren, ist Professor für BWL, Wirtschaftsinformatik, Finanz- & Informationsmanagement. Seit 2002 baute er als wissenschaftlicher Leiter das von der bayerischen Staatskanzlei eingerichtete Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement und zusätzlich seit 2011 die Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Informationstechnik FIT in Augsburg und Bayreuth auf. Er ist beiden Einrichtungen weiterhin eng verbunden.

Prof. Buhl studierte von 1976 bis 1981 Wirtschaftsingenieurwesen an der Universität Karlsruhe sowie Industrial Engineering and Operations Research an der University of California in Berkeley, USA. 1980 erfolgte der Abschluss als Master of Science in Berkeley und 1981 die Prüfung zum Diplom-Wirtschaftsingenieur (Informatik/OR) in Karlsruhe. Dort promovierte er 1982 und habilitierte sich 1985 mit Arbeiten über Anwendungen der dynamischen Optimierung auf volks- und betriebswirtschaftliche Problemstellungen. Nach sieben Jahren in der Praxis bei IBM und einem ersten Lehrstuhl in Gießen hatte er von August 1994 bis September 2021 einen Lehrstuhl an der



Universität Augsburg inne. Daneben war Hans Ulrich Buhl von 2004 bis 2021 federführender Wissenschaftler und Vorsitzender des Boards des vom Elitenetzwerk Bayern und zehn renommierten Praxispartnern (darunter Allianz, Hilti, Infineon, KPMG, Kuka, MAN Energy Solutions, Oetker-Gruppe und ZEISS) geförderten Elitenetzwerk-Studiengangs »Finanz- & Informationsmanagement« der TU München, Universität Augsburg und Universität Bayreuth. Das CHE-Ranking zeichnete dieses Programm wiederholt als besten Masterstudiengang aus.

Im Verband der Hochschullehrerinnen und Hochschullehrer für Betriebswirtschaft (VHB) wurde er 2017 bzw. 2018 jeweils einstimmig in den Gesamtvorstand bzw. zum stellvertretenden Vorsitzenden und 2020 einstimmig zum Vorsitzenden des Gesamtvorstandes des VHB gewählt. Er ist Mitglied der wissenschaftlichen Kommission Wirtschaftsinformatik (WKWI), des Fachkollegiums für Betriebswirtschaftslehre der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und des Kuratoriums der Bayerischen EliteAkademie. Seine Forschung konzentriert er aktuell insbesondere auf die Bereiche Digital Energy & Smart Districts.

Im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie verantwortet Prof. Buhl das Cluster »Markt- und Stromsystem« und ist stellvertretender Leiter des Clusters »Energieflexible Modellregion Augsburg«.



© alexlevay

Alexander Mitsos ist Professor am Lehrstuhl für Systemverfahrenstechnik der Aachener Verfahrenstechnik (AVT) an der RWTH Aachen University sowie Direktor des IEK-10 (Energy Systems Engineering) am Forschungszentrum Jülich. Seit 2018 ist er Associate Editor des Elsevier Journals »Computers & Chemical Engineering« und Teil des Editorial Boards des »AAAS Science Advances«, und seit 2020 Programming Chair der AIChE CAST Division.

Prof. Mitsos erhielt 1999 das Diplom für Chemieingenieurwesen an der Universität Karlsruhe und promovierte 2006 am Massachusetts Institute of Technology (MIT) auf dem Gebiet der Systemverfahrenstechnik. Nach Positionen als Senior Engineer in der RES Group Inc. (2006 bis 2007) und als Junior Research Group Leader am AICES, RWTH Aachen University (2008) war Prof. Mitsos von 2009 bis 2012 Assistant Professor am Department of Mechanical Engineering des MIT.

Die Forschungsschwerpunkte von Alexander Mitsos sind einerseits optimale Entwicklung und Betriebsführung von chemischen und biotechnologischen Prozessen und Energiesystemen sowie andererseits Theorie und Algorithmen für deterministische globale Optimierung. Dazu werden Methoden aus Data Science und Machine Learning eingesetzt und weiterentwickelt.

Im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie verantwortet Prof. Mitsos diverse Teilprojekte im Cluster »Schlüsselproduktionsprozesse«. Zudem ist er Projektverantwortlicher für die Nachwuchsförderung der Promovierenden.



©PTW/S. Scheibner

Prof. Dr.-Ing. **Matthias Weigold**, Jahrgang 1977, hat Maschinenbau an der TU Darmstadt studiert. Während seiner Promotion am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der TU Darmstadt forschte er in den Bereichen Automatisierungstechnik und Fertigungstechnologieentwicklung u. a. an der spannenden Bearbeitung mit Industrierobotern.

Heute ist Prof. Weigold Leiter des PTW. Zuvor war er bei der Heidelberger Druckmaschinen AG und bei der SAP SE im Bereich Digital Manufacturing in führenden Funktionen tätig. Seit der Übernahme der Institutsleitung von Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele hat Matthias Weigold die Forschungsaktivitäten auf Digitalisierung, künstliche Intelligenz und klimaneutrale Produktion ausgerichtet. Er verantwortet die Aktivitäten der ETA-Fabrik (Energietechnologien und Anwendungen in der Produktion) sowie des Fertigungstechnologiebereichs des PTW.

Prof. Weigold engagiert sich in unterschiedlichen nationalen und internationalen Gutachtergremien und ist Autor zahlreicher Publikationen, u. a. im Bereich der energieflexiblen und energetisch optimierten Produktion. Im Kopernikus-Projekt SynErgie leitet er das Cluster »Produktionsinfrastruktur«.

Literatur

2019. BUNDES-KLIMASCHUTZGESETZ. KSG [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/>

2021. ERNEUERBARE-ENERGIEN-GESETZ – EEG 2021 (Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien). EEG [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/

BABATUNDE, O.M., J.L. MUNDA und Y. Hamam, 2020. Power system flexibility: A review. Energy Reports 6, 101–106. ISSN 23524847. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.egyr.2019.11.048

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG, 2021. Kopernikus-Projekt für die Energiewende [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/energiewende/kopernikus-projekte-fuer-die-energiewende/kopernikus-projekte-fuer-die-energiewende_node.html

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT, 2018. Atomkraftwerke in Deutschland. Abschaltung der noch betriebenen Reaktoren gemäß Atomgesetz (AtG) [Zugriff am: 16. Februar 2018]. Verfügbar unter: <http://www.bmub.bund.de/themen/atomenergie-strahlenschutz/nukleare-sicherheit/aufsicht-ueber-kernkraftwerke/kernkraftwerke-in-deutschland/>



BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ, 2021. Energieeffizienz in Zahlen. Entwicklungen und Trends in Deutschland 2021 [Zugriff am: 18. Januar 2022]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-entwicklungen-und-trends-in-deutschland-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=6

BUNDESNETZAGENTUR, 2021a. Das Jahr 2020 – Stromerzeugung und Stromhandel im Überblick [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: <https://www.smard.de/page/home/topic-article/204970/202398>

BUNDESNETZAGENTUR, 2021b. Quartalsbericht Netz- und Systemsicherheit – Gesamtes Jahr 2020 [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2020/Quartalszahlen_Gesamtjahr_2020.html

BUNDESNETZAGENTUR, 2022. Der Strommarkt im Jahr 2021 [Zugriff am: 18. Januar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.smard.de/page/home/topic-article/444/206664>

DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR, 2017. dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse und Erkenntnisse aus dem Studienprozess. Zwischenfazit. Berlin: Deutsche Energie-Agentur [Zugriff am: 12. März 2018]. Verfügbar unter: https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9214_dena-Leitstudie-Integrierte-Energiewende_Zwischenfazit.pdf

EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2019. Der europäische Grüne Deal [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>

FELL, M.J., 2020. Just flexibility? Nature Energy 5(1), 6–7. Nature Energy. Verfügbar unter: doi:10.1038/s41560-019-0510-3

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021. Renewables 2021. Analysis and forecast to 2026 [Zugriff am: 3. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/renewables-2021>

PAPAEFTHYMIU, G., E. HAESSEN und T. SACH, 2018. Power System Flexibility Tracker: Indicators to track flexibility progress towards high-RES systems. Renewable Energy 127, 1026–1035. ISSN 09601481. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.renene.2018.04.094

RAQUET, C. und G. LIOTTA, 2013. Datenübertragungstechnologien in Smart Metering und Smart Grids. In: C. Aichele und O.D. Doleski, Hg. Smart Meter Rollout. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 389-402. ISBN 978-3-8348-2439-4.

SAUER, A., E. ABELE und H.U. BUHL, Hg., 2019. Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie). Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN 978-3-8396-1479-2.

SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und FDP, 2021. Koalitionsvertrag: Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit [Zugriff am: 18. Januar 2022]. Verfügbar unter: https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf

UNITED NATIONS, 2015. Paris Agreement [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf

Inhalt

	Geleitwort des Bundesministeriums für Bildung und Forschung	3
	Vorwort der Herausgeber	4
A	Das aktuelle und zukünftige Markt- und Stromsystem	25
A.1	Gestaltung des aktuellen und zukünftigen Markt- und Stromsystems	29
	Management Summary	30
	Autoren	30
1	Motivation	32
2	Herausforderungen der Energieflexibilitätsvermarktung und (Weiter-) Entwicklung von kurzfristigen Anreizen für Energieflexibilität	32
2.1	Gegenwärtige Hemmnisse der Energieflexibilitätsvermarktung	32
2.2	Energieflexibilitätsvermarktung profitabel gestalten	35
3	Ein Strommarktdesign 2030–2050 zur Schaffung von langfristigen Anreizen für Energieflexibilität	46
3.1	Strommärkte und Systemdienstleistungen	46
3.2	Ziele und Erfolgsfaktoren eines zukunftsfähigen Strommarktdesigns	48
3.3	Gestaltungsoptionen für ein zukunftsfähiges Strommarktdesign	49
3.4	Strategische Gesichtspunkte eines zukünftigen Strommarktdesigns	53
3.5	Vision eines Strommarktdesigns 2030–2050	55
3.6	Ausgestaltung des Übergangs in ein zukunftsfähiges Strommarktdesign 2030–2050	57
4	Energieflexibilität in einem zukunftsfähigen europäischen Strommarktdesign	64
5	Literatur	64
A.2	Potenzialanalyse und systemische Betrachtung	73
	Management Summary	74
	Autoren	74
1	Ausgangssituation und Zielsetzung	76
2	Energieflexibilitätsaudits	76
2.1	Methodische Anforderungen und allgemeine Struktur des Energieflexibilitätsaudits	77



2.2	Phase I: Identifizierung und Charakterisierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen	78
2.3	Phase II: Bewertung des EFM-Katalogs	82
3	Analyse der Energieflexibilitätspotenziale	83
3.1	Energieflexibilitätspotenziale der deutschen Industrie	83
3.2	Regionalisierung der Energieflexibilitätspotenziale	88
3.3	Internationales Energieflexibilitätspotenzial	90
4	Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und CO ₂ -Emissionen	93
4.1	Abschätzung der CO ₂ -Reduzierung beim Einsatz von Energieflexibilitätsmaßnahmen	93
4.2	Auswirkungen von industriellen CO ₂ -Verminderungsmaßnahmen auf die Flexibilität von Prozessen und Technologien	97
4.3	Flexibilität und Kreislaufwirtschaft bei ausgewählten, disruptiv dekarbonisierten Produktionstechniken	104
5	Systemische Kosten-Nutzen-Abschätzung	106
5.1	Methodik zur systemischen Kosten-Nutzen-Abschätzung	106
5.2	Auswahl, Charakterisierung und Matching der Einsatz- und Flexibilitätsoptionen	107
5.3	Systemisches Kosten-Nutzen-Verhältnis von Flexibilitätsoptionen für stromnetzstabilisierende Einsatzoptionen	109
6	Fazit	113
7	Literatur	114
A.3 Energieflexible Modellregion Augsburg		117
	Management Summary	118
	Autoren	118
1	Ausgangssituation und Zielsetzung	121
2	Lösungsbausteine der regionalen Vermarktung von industrieller Energieflexibilität	122
2.1	Ökonomischer Lösungsbaustein: Lokaler Flexibilitätshandel	123
2.2	Technische Lösungsbausteine: IKT-Lösungen für regionale Nachfrageflexibilität	124
2.3	Gesellschaftliche Lösungsbausteine	125
3	Befähigung von energieflexiblen Fabriken in der Region Augsburg	128
3.1	Beschreibung des angewandten Vorgehens in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg	128

3.2	Themenfelder der Energieflexiblen Modellregion Augsburg	130
3.3	Anwendungsfälle in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg	133
3.4	Konzeptioneller Testbetrieb der Anwendungsfälle	146
4	Weiterentwicklung und Übertragung der Energieflexiblen Modellregion Augsburg	148
4.1	Energieflexibilitätpotenzial und CO ₂ -Einsparung	148
4.2	Technische Übertragbarkeit auf weitere Regionen	148
4.3	Gesellschaftliche Perspektive zur erfolgreichen Weiterentwicklung	152
5	Fazit und Ausblick	155
6	Literatur	156
B	Managementsysteme für energieflexible Fabriken	159
B.1	Werkzeuge für die energetische Flexibilisierung	163
	Management Summary	164
	Formelverzeichnis	164
	Autoren	164
1	Einleitung	166
2	Werkzeuge zur Energieflexibilitätpotenzialanalyse	167
2.1	Grundlagen	167
2.2	Schnell-Check-Tool	168
2.3	Energieflexibilitätsaudit	168
2.4	E-Flex-Scanner	168
2.5	Flexibilitätseinsatzplanungstool	169
3	Werkzeuge zur Konzeption und Planung	170
3.1	Grundlagen und Anwendungsbeispiel	170
3.2	Technische Umsetzung	171
3.3	Beispielhafte Demonstration der Anwendung	173
3.4	Zusammenfassung	175
4	Umsetzung und Implementierung am Beispiel von Speicher-Wandler-Systemen	176
4.1	Digitaler Retrofit für den energieflexiblen Betrieb von Kälteversorgungssystemen	176
4.2	Anwendungsbeispiel	179
4.3	Zusammenfassung	181



5	Operative Energieflexibilitätsvermarktung	181
5.1	Die Plattform »Flexys« zur Vermarktung von Energieflexibilität	181
5.2	Forschungs- und Vermarktungsansätze	182
5.3	Plattform-Konzept zur Vermarktung von Energieflexibilität	182
5.4	Funktionsweise und Einsatz von »Flexys«	183
6	Controlling und Monitoring am Beispiel Last- und Flexibilitätsmanagement	184
6.1	Grundlagen	184
6.2	Last- und Flexibilitätsmanagement in der Kunststoffproduktion	185
6.3	Last- und Flexibilitätsmanagement in der Automobilindustrie	190
6.4	Zusammenfassung	193
7	Betriebsoptimierung	194
7.1	Grundlagen	194
7.2	Anwendungsfall	199
7.3	Zusammenfassung	204
8	Zusammenfassung und Ausblick	205
9	Literatur	206
B.2	Energieflexibilitätsorientierte Prozessplanung	211
	Management Summary	212
	Formelverzeichnis	212
	Autoren	213
1	Einleitung	214
1.1	Betrieb des Elektrostahlwerks	214
1.2	Fluktuation des Energiebedarfs	215
2	Vorhandene Planungsinstrumente	217
2.1	Monatlicher Produktions- und Energieplan	217
2.2	Ablaufplanung im Stahlwerk	219
2.3	Monatlicher Instandhaltungsbericht	220
2.4	Lastmanagement	222
3	Entwicklung einer neuen Planungsplattform	224
3.1	Vorbemerkungen und Zielsetzungen	224
3.2	Erneuerung der Ablauf- und Energieplanung im Stahlwerk	225
3.3	Bestimmung des spezifischen Energiebedarfs	229

3.4	Nutzung von Energieflexibilität	230
3.5	Ermittlung des 15-Minuten-Forecasts	232
4	Decision-Support-Tool zur Prüfung von Energieflexibilitätsmaßnahmen	233
5	Literatur	235
B.3 Integration der Flexibilitätsvermarktung		237
	Management Summary	238
	Autoren	238
1	Einleitung	240
1.1	Einordnung und Motivation	240
1.2	Ziele der Energiesynchronisationsplattform	241
2	Referenzarchitektur	242
2.1	Energiesynchronisationsplattform	242
2.2	Marktplattform	243
2.3	Marktplattformseitige Services	246
2.4	Unternehmensplattform	246
2.5	Unternehmensplattformseitige Kernkomponenten und Services	248
3	Energieflexibilitätsdatenmodell	249
3.1	Notwendigkeit des Datenmodells	249
3.2	Ziel und Zweck des Datenmodells	250
3.3	Klassen des Datenmodells	250
3.4	Exemplarische Beschreibung	253
4	Prozesse und Informationsflüsse	255
4.1	Prozessmodell der Energiesynchronisationsplattform	255
4.2	Umsetzung von Prozessen	257
5	Informationstechnische Sicherheit	261
5.1	Maßnahmen des Security-Prozesses	261
5.2	Umsetzungsmaßnahmen	266
6	Demonstratoren	269
6.1	Übersicht der Demonstratoren	269
6.2	Wichtigste Erkenntnisse	271
7	Fazit und Ausblick	271
8	Literatur	272



C	Technologien für energieflexible Fabriken	277
C.1	Chlor-Alkali-Elektrolyse	281
	Management Summary	282
	Formelverzeichnis	282
	Autoren	283
1	Grundlagen und Potenziale der Chlor-Alkali-Elektrolyse	284
1.1	Energieflexible Chlor-Alkali-Elektrolyse	284
1.2	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Chlor-Alkali-Elektrolyse	286
1.3	Energieflexible Chlor-Alkali-Elektrolyse bei der Covestro Deutschland AG	288
1.4	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	289
2	Technische Umsetzung der Energieflexibilitätsmaßnahmen	290
2.1	Auswirkung flexibler Fahrweise auf die Langzeitstabilität	290
2.2	Spülverhalten einer Chlor-Alkali-Elektrolysezelle	291
3	Wirtschaftliche Bewertung der Energieflexibilitätsmaßnahmen	293
3.1	Energieflexibilitätsoptionen und ihre Auswirkungen auf den Gesamtprozess	293
3.2	LCA-Studie der Energieflexibilitätsmaßnahmen	293
4	Literatur	295
C.2	Lastflexible Extraktion biobasierter Carbonsäuren	297
	Management Summary	298
	Formelverzeichnis	298
	Autoren	298
1	Grundlagen und Potenziale der elektrifizierten Carbonsäureherstellung	299
1.1	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	304
2	Technische Umsetzung	307
3	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	313
4	Literatur	315

C.3	Flexible Luftzerlegungsanlagen	319
	Management Summary	320
	Autoren	321
1	Grundlagen und Potenziale von energieflexiblen Luftzerlegungsanlagen	322
1.1	Energieflexible Luftzerlegungsanlagen	322
1.2	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen	323
1.3	Flexible Luftzerlegungsanlagen bei Linde Engineering	324
1.4	Flexible Kompressoren bei MAN Energy Solutions	324
1.5	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	325
2	Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	327
2.1	Robustifizierung des Hauptwärmeübertragers	327
2.2	Erweiterter Lastbereich der Kompressoren	330
2.3	Flexible Betriebsstrategien und Digitale Zwillinge	336
3	Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen	341
4	Literatur	341
C.4	Papierherstellung	345
	Management Summary	346
	Autoren	347
1	Grundlagen und Potenziale der energieflexiblen Papierherstellung	348
1.1	Energieflexible Papierherstellung	348
1.2	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen der energieflexiblen Papierherstellung	350
1.3	Energieflexible Papierherstellung bei UPM	351
1.4	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	352
2	Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	355
2.1	Standort Plattling: Energieflexibilität unter Desinvestitionsbedingungen »DesFlex«	356
2.2	Standort Schongau: Energieflexibilität in der Halbstofffertigung »FlexPulp«	357
2.3	Standorte Dörpen, Plattling, Schongau: Skalierbare energieflexibilitätsfördernde IT-Architektur »EnFlex«	358
3	Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	359
3.1	Standort Plattling: Wirtschaftlichkeit der technischen Energieflexibilitätsmaßnahmen	360



3.2	Standort Schongau: Wirtschaftlichkeit der technischen Energieflexibilitätsmaßnahmen	360
3.3	Standorte Dörpen, Plattling, Schongau: Wirtschaftlichkeit der IT-seitigen Energieflexibilitätsmaßnahmen	363
4	Literatur	363
C.5	Aluminiumelektrolyse	367
	Management Summary	368
	Formelverzeichnis	368
	Autoren	369
1	Grundlagen und Potenziale der flexiblen Aluminiumelektrolyse	370
1.1	Energieflexible Aluminiumelektrolyse	370
1.2	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen der Aluminiumelektrolyse	371
1.3	Energieflexible Aluminiumelektrolyse bei der TRIMET Aluminium SE	371
1.4	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	372
2	Technische Umsetzung des Digitalen Zwillings	372
2.1	Prozessvorhersagemodell	372
2.2	Magnetohydrodynamik-Modell	379
2.3	Prozessüberwachung: Anodenstrommessung	382
2.4	Digitaler Zwilling zur Steuerung energieflexibler Aluminiumelektrolysezellen	386
3	Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen	388
4	Literatur	389
C.6	Klimatisierungs- und Raumluftechnik	393
	Management Summary	394
	Autoren	395
1	Grundlagen und Potenziale der branchenübergreifenden Klimatisierungs- und Raumluftechnik	396
1.1	Energieflexible Klimatisierungs- und Raumluftechnik	396
1.2	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen von branchenübergreifender Klimatisierungs- und Raumluftechnik	397
1.3	Energieflexible Klimatisierungs- und Raumluftechnik bei der B+T Oberflächentechnik GmbH	398

1.4	Energieflexible Technologie für klimatisierte Räume und Gebäude in der Industrie am Beispiel eines Kühllagers (Intercool GmbH, Dr. Oetker)	398
1.5	Abschätzung des Energieflexibilitätpotenzials	400
2	Energieflexible Klimatisierungs- und Raumluftechnik in der ETA-Fabrik	402
2.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen	402
2.2	Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen	410
3	Energieflexible Klimatisierungs- und Raumluftechnik bei B+T GmbH	412
3.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahme	412
3.2	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahme	413
4	Literatur	414
C.7 Prozesskälte		417
	Management Summary	418
	Autoren	419
1	Grundlagen und Potenziale branchenübergreifender Prozesskältebereitstellung	420
1.1	Energieflexible Prozesskältebereitstellung	420
1.2	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen branchenübergreifender Prozesskältebereitstellung	420
1.3	Energieflexible Prozesskältebereitstellung bei der DMK Group	421
1.4	Energieflexible Prozesskältebereitstellung bei Mercedes-Benz	421
1.5	Energieflexible Prozesskältebereitstellung bei der Badischen Staatsbrauerei Rothaus	422
2	Abschätzung des Energieflexibilitätpotenzials	423
3	Prozesskälteversorgung im milchverarbeitenden Gewerbe	424
3.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	424
3.2	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	426
4	Energieflexible Prozesskälteversorgung in der Automobilindustrie	427
4.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	428
4.2	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	429
5	Energieflexible Prozesskälteversorgung im Brauereigewerbe	431
5.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	432



5.2	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	435
6	Literatur	437
C.8	Prozesswärme	439
	Management Summary	440
	Autoren	440
1	Grundlagen und Potenziale branchenübergreifender Prozesswärmebereitstellung	441
1.1	Energieflexible Prozesswärmebereitstellung	441
1.2	Energieflexibilitätsmaßnahmen der Prozesswärmebereitstellung	441
1.3	Energieflexible Prozesswärmebereitstellung bei Evonik	442
1.4	Energieflexible Prozesswärmebereitstellung bei Schaeffler	442
1.5	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	443
2	Energieflexible Prozesswärmeversorgung in der chemischen Industrie	444
2.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	444
2.2	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	448
3	Energieflexible Prozesswärmeversorgung in der metallverarbeitenden Industrie	449
3.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	449
3.2	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	455
4	Literatur	457
C.9	Bivalenter Nichteisenmetalldruckguss	459
	Management Summary	460
	Autoren	460
1	Grundlagen und Potenziale der energieflexiblen Technologien im Nichteisenmetalldruckguss	461
2	Energieflexibler Nichteisenmetalldruckguss	462
2.1	Schmelzofen	463
2.2	Beschichtungsprozesses	464
2.3	Recyclingofen	464
2.4	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen im Nichteisenmetalldruckguss	466

2.5	Energieflexibilitätsmaßnahmen des Nichteisenmetalldruckgusses bei der Torun Bark Magnesium GmbH	466
2.6	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	467
3	Technische Umsetzung eines bivalenten Ofens	467
3.1	Vorauswahl des Brennersystems	468
3.2	Steuerung und Regelung	468
3.3	Konstruktion	469
3.4	Numerische Simulation	471
4	Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahme	476
5	Literatur	478
C.10 Bivalente Wärmebehandlung in der Massivumformung		481
	Management Summary	482
	Autoren	482
1	Grundlagen und Potenziale in der Massivumformung	483
1.1	Wärmebehandlung in der Massivumformung	483
1.2	Energieflexibilitätsmaßnahmen bei Hirschvogel Group	483
1.3	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	485
2	Technische Umsetzung der bivalenten Wärmebehandlung in der Massivumformung	486
2.1	Wärmebehandlungsöfen	486
2.2	Konzept zur bivalenten Wärmeversorgung	487
2.3	Simulationsbasierte Untersuchung der Anlage	488
2.4	Ergebnisse der Simulation	490
2.5	Umsetzung der bivalenten Anlage	493
2.6	Fazit der technischen Umsetzung	495
3	Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen	497
4	Literatur	498
C.11 Hybride Beheizung in der Stahlindustrie		501
	Management Summary	502
	Autoren	502
1	Grundlagen und Potenziale einer hybriden Beheizung in der Stahlindustrie	503
1.1	Energieflexible Beheizung in der Stahlindustrie	503



1.2	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahme der Wärmebereitstellung eines hybriden Strahlrohrs	504
1.3	Projektpartner	505
1.4	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	506
2	Technische Umsetzung der hybriden Beheizung	506
2.1	Anforderungen	506
2.2	Konzeptentwicklung	507
2.3	Konstruktion des Prototyps	507
2.4	Test der elektrischen Beheizung	508
2.5	Komplettmontage	509
2.6	Test der Gasbeheizung	510
2.7	Betriebsnahe Untersuchungen	511
3	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	513
4	Literatur	514
C.12 Energieträgerübergreifende hybride Energiespeicher		517
	Management Summary	518
	Autoren	518
1	Grundlagen und Potenziale von Energiespeichertechnologien in der Automobilindustrie	519
1.1	Energieflexibilitätsmaßnahmen der energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeicher	519
1.2	Energieträgerübergreifende hybride Energiespeicherung bei Mercedes-Benz	519
1.3	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	520
2	Energieträgerübergreifende hybride Energiespeicherung in der Automobilindustrie	521
3	Technische Umsetzung der energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeicher	522
3.1	Anwendungsfälle für (hybride) Energiespeicher	523
3.2	Prognosetool für thermische und elektrische Energieverbräuche zum Betrieb hybrider Energiespeichersysteme	526
3.3	Auslegung und Bewertung eines hybriden Energiespeichers im Automobilwerk	528
3.4	Umsetzung des methodischen Vorgehens über ein Simulations- und Analysetool	530

4	Wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes von hybriden Energiespeichern für ein Automobilwerk	531
4.1	Fazit und Ausblick	534
5	Literatur	534



Managementsysteme für energieflexible Fabriken

- B.1 Werkzeuge für die energetische Flexibilisierung
- B.2 Energieflexibilitätsorientierte Prozessplanung
- B.3 Integration der Flexibilitätsvermarktung







B.3

Integration der Flexibilitätsvermarktung

Management Summary

Die Energiesynchronisationsplattform adressiert den gesamten Prozess des automatisierten Energieflexibilitäts Handels von der Maschine bis zu den Vermarktungsservices. Sie stellt somit das übergeordnete Gesamtkonzept eines digitalen Ökosystems dar, welches industrielle Nachfrageflexibilität ermöglicht. Die Energiesynchronisationsplattform besteht dabei aus unternehmensindividuellen Unternehmensplattformen und einer zentralen Marktplattform. Der Marktplattform kommt die Rolle der Servicevermittlung zu. Dies ermöglicht es, auf Veränderungen innerhalb der Services bzw. der Marktplattform schnell reagieren zu können. Im vorliegenden Kapitel werden beispielhafte Services der Unternehmens- und Marktplattformen beschrieben. Zudem wird ein Überblick über die Referenzabläufe für den Betrieb und die Vermarktung von Energieflexibilität gegeben. Die Prozesse werden anhand eines möglichen Anwendungsfalls dargestellt. Außerdem wird das weiterentwickelte Energieflexibilitätsdatenmodell vorgestellt und anhand von vier Klassen beschrieben. Zur Bedrohungsanalyse im Kontext der IT-Sicherheit werden Threat Models (Bedrohungsmodelle) angewandt und auf Basis verschiedener Sicherheitslevels vorgestellt. Darüber hinaus werden Rollen- und Rechedefinitionen beschrieben und Anforderungen an die IT-Sicherheit abgeleitet. Eine Kurzvorstellung entwickelter Demonstratoren schließt das Kapitel ab.

Autoren

Ahrens, Raphael
 raphael.ahrens@fit.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik
 FIT
 Schloss Birlinghoven, 53754 Sankt Augustin

Köberlein, Jana
 info@igcv.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und
 Verarbeitungstechnik IGCV
 Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg

Bank, Lukas
 lukas.bank@igcv.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und
 Verarbeitungstechnik IGCV
 Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg

Kalchschmid, Vincent
 vincent.kalchschmid@igcv.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und
 Verarbeitungstechnik IGCV
 Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg

Oeder, Andreas
 andreas.oeder@iis.fraunhofer.de
 Fraunhofer-IIS für Integrierte Schaltungen IIS
 Am Wolfsmantel 33, 91058 Erlangen

Schlereth, Andreas
 andreas.schlereth@ipa.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
 Automatisierung IPA
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Grigorjan, Arthur
 arthur.grigorjan@ipa.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
 Automatisierung IPA
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Kaymakci, Can
 can.kaymakci@ipa.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
 Automatisierung IPA
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Schel, Daniel
 daniel.schel@ipa.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
 Automatisierung IPA
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Bauer, Dennis
 dennis.bauer@ipa.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
 Automatisierung IPA
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Schulz, Fabian
 fabian.schulz@ipa.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
 Automatisierung IPA
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Lodwig, Ragnar
 ragnar.lodwig@ipa.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
 Automatisierung IPA
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Bauernhansl, Thomas
 thomas.bauernhansl@ipa.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
 Automatisierung IPA
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Sauer, Alexander
 alexander.sauer@eep.uni-stuttgart.de
 Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
 Universität Stuttgart
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Lindner, Martin
 m.lindner@ptw.tu-darmstadt.de
 Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
 Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
 Darmstadt
 Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Weigold, Matthias
 weigold@ptw.tu-darmstadt.de
 Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
 Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
 Darmstadt
 Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Schulz, Julia
 julia.schulz@iwb.tum.de
 Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissen-
 schaften (iwb), Technische Universität München
 Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München

Schöpf, Michael
 michael.schoepf@uni.lu
 SnT – Interdisciplinary Centre for Security, Reliability and
 Trust, University of Luxembourg
 Av. John F. Kennedy 29, 1855 Luxembourg

van Stiphoudt, Christine
 christine.vanstiphoudt@uni.lu
 SnT – Interdisciplinary Centre for Security, Reliability and
 Trust, University of Luxembourg
 Av. John F. Kennedy 29, 1855 Luxembourg

Fridgen, Gilbert
 gilbert.fridgen@uni.lu
 SnT – Interdisciplinary Centre for Security, Reliability and
 Trust, University of Luxembourg
 Av. John F. Kennedy 29, 1855 Luxembourg

Potenciano Menci, Sergio
 sergio.potenciano-menci@uni.lu
 SnT – Interdisciplinary Centre for Security, Reliability and
 Trust, University of Luxembourg
 Av. John F. Kennedy 29, 1855 Luxembourg

Winter, Christian
 christian.winter@softwareag.com
 Software AG
 Uhlandstraße 12, 64297 Darmstadt

Schimmelpfennig, Jens
 jens.schimmelpfennig@softwareag.com
 Software AG
 Altenkesseler Straße 17, 66115 Saarbrücken

1 Einleitung

Autoren: Schlereth · Bauer · Bauernhansl

1.1 Einordnung und Motivation

Um die vorhandene Energieflexibilität energieintensiver Industrieprozesse nutzbar zu machen, ist neben deren technischer Befähigung ein entsprechendes Markt- und Stromsystem sowie insbesondere eine Automatisierung durch Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) notwendig. Die IKT nimmt dabei eine Schlüsselrolle bei der Verbindung der Produktion und Produktionsinfrastruktur mit dem Markt- und Stromsystem ein (Bauer et al., 2021). Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, eine effektive und effiziente Energieflexibilitätsvermarktung sowie bidirektionale Informationsflüsse, auch über Unternehmensgrenzen hinweg, von und zum Markt- und Stromsystem zu definieren und damit die klassische Automatisierungspyramide zu erweitern (Körner et al., 2019). Weil es diverse beteiligte Stakeholder gibt, muss das Zusammenspiel verschiedener Services für eine effektive und effiziente Energieflexibilitätsvermarktung koordiniert und darauf aufbauend die Automatisierung und Standardisierung des gesamten Prozesses zur Energieflexibilitätsvermarktung vorangetrieben werden (Seitz et al., 2019; Bauernhansl et al., 2019).

Traditionell haben Industrieunternehmen die Beschaffung von Strom als einen unidirektionalen Prozess verstanden. Die erforderliche Menge an Strom für einen meist längerfristigen Zeitraum wird hierbei an einem bestimmten Stichtag und zu einem festen Preis beschafft (Maier et al., 2017). Jedoch sind in den letzten Jahren die Preise an den Strommärkten sehr viel volatil geworden. Für Unternehmen, die ihren Stromverbrauch flexibel an Marktpreise anpassen, können sich bei einem Wechsel von festen Strompreisen zur flexiblen, kurzfristigen Beschaffung auf den Strommärkten wirtschaftliche Vorteile ergeben. Die Identifizierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen, deren technische und wirtschaftliche Bewertung sowie die anschließende Vermarktung stellen dabei eine Herausforderung für Unternehmen dar (Strbac, 2008). Gründe dafür sind unterschiedliche Zielsetzungen bei der Nutzung und Vermarktung von Energieflexibilität und ein stark divergierender Grad des Energieflexibilitätspotenzials vorhandener Produktionsmaschinen (VDI 5207 Blatt 2).

Dies führt nicht nur zu einem Interesse an Intermediären wie etwa Aggregatoren, die Unternehmen bei der Vermarktung von Energieflexibilität unterstützen, sondern auch an Dienstleistern für Entscheidungsunterstützungssysteme. Auf diese Weise können bei der Strombeschaffung wirtschaftliche Chancen durch Nutzung von Energieflexibilität wahrgenommen, zugehörige Risiken begrenzt und administrative Aufwände reduziert werden (Lübbecke et al., 2016). Für die Integration unternehmensinterner IKT-Systeme und neuer Services, aber auch für die Kommunikation mit und Integration von externen Partnern rücken zunehmend IKT-Plattformen in den Fokus (Roesch et al., 2019). Bauernhansl et al. (2019) beschreiben mit der Energiesynchronisationsplattform eine Plattform für die Automatisierung und Standardisierung der Energieflexibilitätsvermarktung hinsichtlich ihrer Funktionalität und Architektur, der damit einhergehenden Interoperabilität, des Datenschutzes und der Datensicherheit sowie des Wettbewerbs zwischen Services. Die Energiesynchronisationsplattform wird in den nachfolgenden Kapiteln weiter ausdetailliert und mit ihrer Referenzarchitektur, dem Energieflexibilitätsdatenmodell (EFDM), Prozessen und Informationsflüssen, IT-Sicherheit sowie Demonstratoren dargestellt.

1.2 Ziele der Energiesynchronisationsplattform

Das Ziel der Energiesynchronisationsplattform (ESP) ist es, durch den Aufbau eines Plattformökosystems den gesamten Prozess des Energieflexibilitätshandels von der Maschine bis zu den Vermarktungsservices zu automatisieren und zu standardisieren. Hierfür ist insbesondere die Integration von Energieflexibilitätsmaßnahmen im Sinne von Demand Response (DR) in die Produktionsplanung und -steuerung des Industrieunternehmens notwendig.

Bei der Energiesynchronisationsplattform handelt es sich nicht um eine Plattform im Sinne einer als Software implementierten Plattform. Die Energiesynchronisationsplattform umfasst viel mehr als übergeordnetes Konzept die Interaktion zwischen den beiden Teilplattformen Unternehmensplattform (UP) und Marktplattform (MP). Sie umfasst Rahmenbedingungen, Schnittstellen, Datenmodelle, Stakeholder und Sicherheitsaspekte und bildet den gesamten Prozess des automatisierten Energieflexibilitätshandels von der Maschine bis zu Vermarktungsservices ab. 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). Diese Eigenschaften bieten einen deutlich höheren Funktionsumfang und ein höheres Informationsangebot als aktuell bestehende Plattformen (Roesch et al., 2019).

Für die Energiesynchronisationsplattform wurde ein durchgängiges Konzept entwickelt, einschließlich des Daten- und Informationsflusses von der Maschine bis zu Vermarktungsservices, die beispielsweise durch Aggregatoren bereitgestellt werden. 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 Vielzahl an Optimierungsservices entwickelt. 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, wurden verschiedene Demonstratoren konzipiert, entwickelt und umgesetzt. Sie werden im Forschungsumfeld sowie – gemeinsam mit Industrieunternehmen und Netzbetreibern – im industriellen Umfeld und der Energieflexiblen Modellregion Augsburg genutzt. IT-Sicherheit muss bei allen Konzeptions- und Umsetzungsschritten eines Systems in adäquatem Maß bedacht sowie bei allen logischen und physischen Bestandteilen des Systems implementiert und im operativen Betrieb aufrechterhalten werden. Zur Gewährleistung eines hohen Sicherheitsniveaus, d. h. insbesondere auch zur Minimierung des Risikos beim Betrieb der Plattformen und zur Abwehr von potenziellen Angriffen auf und über die Plattformen, wurden deshalb verschiedene technische und organisatorische Sicherheitsmaßnahmen definiert.

Die technische Umsetzung der Energiesynchronisationsplattform bildet die Grundlage für eine echtzeitnahe Synchronisation flexibler Industrieprozesse mit dem volatilen Stromangebot 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 generieren (z. B. als Systemdienstleistung). Von zentraler Bedeutung für die Akzeptanz und den Erfolg des Konzepts sind die Wirtschaftlichkeit der Energieflexibilität für die Unternehmen sowie

die technischen Aspekte des Schutzes sensibler Unternehmensdaten, denen im Rahmen der Konzeption der ESP eine besondere Bedeutung zukommt. Die zentralen Erfolgsfaktoren für eine Erhöhung der Akzeptanz sind die Harmonisierung und Standardisierung des erforderlichen Datenmodells und der Schnittstelle zum sicheren Datenaustausch zwischen Industrieunternehmen und den Vermarktungsservices.

2 Referenzarchitektur

Autoren: Potenciano Menci · Winter · Schimmelpfennig · Schlereth · Schel · Bank · van Stiphoudt · Schöpf · Grigorjan · Schulz · Ludwig · Köberlein · Bauer · Fridgen

2.1 Energiesynchronisationsplattform

Basierend auf den in *Kapitel 1.2* genannten Zielen und Visionen der Energiesynchronisationsplattform (ESP) wird im Folgenden die Referenzarchitektur dieser Plattform mit ihren Teilplattformen Unternehmensplattform (UP) und Marktplattform (MP) vorgestellt. Die Aufteilung der ESP in die beiden Teilplattformen UP und MP grenzt spezifisches Domänenwissen und Technologien und Methoden voneinander ab, ohne den potenziellen Betrieb und die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems zu beeinträchtigen (Bauer et al., 2017; Schott et al., 2018). Die Architektur der beiden Teilplattformen wird in *Kapitel 2.2* und *Kapitel 2.4* vorgestellt. Eine ausführliche Darstellung wird von Menci et al. (2021) gegeben.

Für das Ziel, den Handel von Energieflexibilität zu automatisieren, ist neben der Architektur der Teilplattformen auch deren Interaktion und die Zusammenarbeit mit externen Serviceanbietern zu berücksichtigen. Die beteiligten Akteure lassen sich dabei den Kategorien Industrieunternehmen, Plattformbetreiber und Serviceanbieter zuordnen. Das übergeordnete Zusammenspiel zwischen beiden Teilplattformen bzw. den verschiedenen Stakeholdern in dem digitalen Ökosystem der ESP ist in *Abbildung 1* dargestellt. Es ergeben sich die folgenden drei Kommunikationsbeziehungen:

- Kommunikation zwischen **Serviceanbieter** und **Marktplattform** zur Serviceveröffentlichung und zur Vermittlung bei der Buchung eines Service
- Kommunikation zwischen **Unternehmen** und **Marktplattform** zur Servicesuche und zur Vermittlung bei der Buchung eines Service
- Kommunikation zwischen **Unternehmen (via Unternehmensplattform)** und **Service** für die Nutzung eines Service

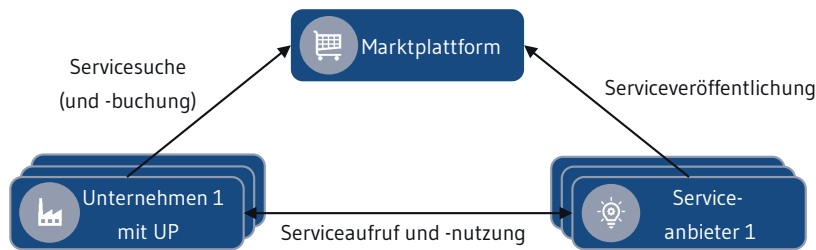


Abb. 1 Übergeordnetes Zusammenspiel von Marktplattform, Unternehmensplattform (UP) und Serviceanbietern

Die Serviceanbieter bzw. die bereitgestellten Services sind dabei über eine lose Kopplung mit der Markt- bzw. der Unternehmensplattform verbunden (McGovern et al., 2003). Dies wird durch eindeutig definierte Schnittstellen dieser beiden Plattformen und der Services gewährleistet. Das bedeutet, dass wenige Abhängigkeiten zwischen Serviceanbieter und Marktplattform bzw. zwischen Service und Unternehmensplattform bestehen. Dies hat den Vorteil, dass z. B. bei Veränderungen innerhalb eines Service nicht zwangsläufig Anpassungen beim Servicenutzer, also dem Unternehmen bzw. seiner Unternehmensplattform, vorgenommen werden müssen.

Damit ein Unternehmen über seine Unternehmensplattform einen externen Service nutzen kann, muss dieser über die verschiedenen verfügbaren Services und Serviceanbieter informiert werden. Das Unternehmen kann dazu das auf der Marktplattform registrierte Serviceangebot durchsuchen. Sollte das Unternehmen einen Service finden, der seinen Bedürfnissen entspricht, kann der entsprechende Service über die Marktplattform gebucht werden. Diese nimmt die Buchung entgegen und informiert den Serviceanbieter darüber. Der Serviceanbieter generiert einen Application Programming Interface (API) Key für das Unternehmen, damit dieser den gebuchten Service mittels seiner UP abrufen kann. Dieses Zusammenspiel von Unternehmensplattform, Marktplattform und Serviceanbieter wird als Service-Broker-Architektur bezeichnet (Tsai et al., 2007). Die Kommunikation zwischen der UP und dem Service findet dann ohne Einbezug der Marktplattform in den Kommunikationsweg statt.

2.2 Marktplattform

Die Marktplattform ist eine der beiden Teilplattformen innerhalb der Energiesynchronisationsplattform. Sie kann als multilaterale Plattform bezeichnet werden, da sie mehrere unabhängige Parteien miteinander verbindet (Roesch et al., 2019). Diese Parteien bieten flexibilitätsorientierte Services an bzw. nutzen diese. Beispiele für solche Services sind Prognoseservices, Energieflexibilitätshandels-services von Aggregatoren sowie Services für lokalen Energieflexibilitätshandel. Sie können von jeder interessierten Partei angeboten werden. Einzelheiten zu den entwickelten und über die Marktplattform vermittelten Services sind *Kapitel 2.3* zu entnehmen. Die Marktplattform konzentriert sich auf Industrieunternehmen, die Energieflexibilitätsmaßnahmen vermarkten und als Nutzer der Plattform und deren angebundenen Services auftreten.

Die Marktplattform fungiert als Vermittlungsplattform zwischen Industrieunternehmen und Serviceanbietern und verfolgt dabei zwei Hauptziele. Das erste Ziel ist die Herstellung eines einfachen, aber effektiven ersten Kontakts zwischen Industrieunternehmen und Serviceanbietern. Als erste Anlaufstelle bietet die Marktplattform den Industrieunternehmen die Möglichkeit, sich über Services zu informieren (Welche Services gibt es? Was macht der Service? Welche Anforderungen sind für die Nutzung des Service zu erfüllen?) und solche zu identifizieren, die für das Industrieunternehmen von Interesse sein könnten. Das zweite Ziel der Marktplattform besteht darin, Werkzeuge für die standardisierte Kommunikation und Interaktion zwischen den Services und den Industrieunternehmen bereitzustellen. Zudem ermöglicht die Marktplattform eine Interaktion und Vernetzung zwischen Services untereinander, sodass Services andere Services nutzen können (Value Co-Creation). Mit diesen Zielen wird die Realisierung einer multilateralen Plattform angestrebt, die Industrieunternehmen eine Möglichkeit bietet, relevante Services zu identifizieren und zu vergleichen sowie mit den jeweiligen Serviceanbietern einen Kontakt herzustellen.

Für ein ganzheitliches Verständnis ist es notwendig, spezifische Aspekte zu nennen, die von der Marktplattform nicht abgedeckt werden. Die Marktplattform legt beispielsweise nicht fest, welche Art von Service sich mit ihr verbinden. Dennoch muss ein Serviceanbieter die Registrierung seines Service bei der Marktplattform beantragen, um diesen über die Marktplattform anbieten zu können. Der Serviceanbieter ist auch für den Betrieb des Service verantwortlich. Das bedeutet, dass die Marktplattform die Services nicht selbst anbietet, sondern nur deren Vermittlung. Nach der initialen Kontaktherstellung über die Marktplattform findet die weitere, technische Kommunikation direkt zwischen Unternehmensplattform und Service statt. Durch diese Form der Architektur soll ein Kommunikationsflaschenhals vermieden werden. Da die Kommunikation von Energieflexibilität nicht über die Marktplattform abgebildet wird, kann die Einstufung der Marktplattform als kritische Infrastruktur zur Bündelung bzw. Steuerung elektrischer Leistung ebenfalls vermieden werden (BSI, 2021). Dennoch ist es möglich, dass andere Teile der Energiesynchronisationsplattform als kritische Infrastruktur eingestuft werden können.

Im Rahmen der Marktplattform gibt es vier Hauptakteure, die zu berücksichtigen sind:

- Der **Betreiber der Marktplattform** konzentriert sich auf den Betrieb und die Überwachung der Marktplattform.
- **Serviceanbieter** registrieren ihre Services auf der Marktplattform und können andere Services in Anspruch nehmen.
- **Industrieunternehmen** verfügen über die tatsächlichen Energieflexibilitätspotenziale und sind über ihre jeweilige Unternehmensplattform die Hauptnutzer von Services.
- **Weitere Servicenutzer** sind Unternehmen, die mit einem Service interagieren könnten, z. B. ein Netzbetreiber.

Die Interaktion von Industrieunternehmen und Serviceanbietern mit spezifischen Komponenten der Marktplattform zeigt *Abbildung 2* in einer vereinfachten Form.

2.3 Marktplattformseitige Services

Industrieunternehmen können für die Bewertung, Nutzung und Vermarktung von Energieflexibilität eine Vielzahl von Services unterschiedlicher Anbieter nutzen, die durch die Marktplattform vermittelt werden. Durch das Nutzen der Services kann Industrieunternehmen ein Zugang zu verschiedenen Energiemärkten ermöglicht werden. Aber auch die Unterstützung interner Entscheidungsprozesse und daraus resultierende Erlöse durch die Vermarktung von Energieflexibilität sind möglich. Detaillierte Steckbriefe zu einzelnen Services, die im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie entwickelt wurden, sind bei Wenninger et al. (2020) zu finden. Eine Auswahl dieser Services ist im Folgenden aufgeführt.

- Das Ziel des in *Kapitel A.1* bereits vorgestellten **Flexibilitätseinsatzplanungstools (Flex-Tool)** ist die energiemarktübergreifende Optimierung von Energieflexibilitätseinsätzen. Industrieunternehmen sollen dabei unterstützt werden, einen Energiemarkt zu identifizieren, an dem sie ihre Energieflexibilität zu möglichst hohen Erlösen vermarkten können. Darüber hinaus werden die Ausprägungen von Energieflexibilitätspotenzialen spezifiziert (z. B. feste Zeitintervalle festgelegt), aus denen ein »Einsatzplan« für Maschinen abgeleitet werden kann. Die Optimierung kann dabei sowohl minimale Kosten als auch maximale Erlöse zum Ziel haben.
- Der Service **Aggregator-Flexibilitätshandel** ermöglicht die Vermarktung von Energieflexibilität über einen Aggregator und somit einen Zugang zu Energieflexibilitätsmärkten für Industrieunternehmen, denen dies bisher nicht möglich war.
- Der **lokale Flexibilitätshandel (LFH)** ist für die Vermarktung von Energieflexibilität auf lokaler Ebene (am Standort des Unternehmens) konzipiert. Die Hauptdienstleistung ist die Bereitstellung von Energieflexibilität für den lokalen Verteilnetzbetreiber. Der Verteilnetzbetreiber kann für das Engpassmanagement Energieflexibilitätsangebote auswählen, die reserviert bzw. aktiviert werden sollen.
- Die **Prognosedienste für Märkte und Netze** stellen Prognosen für Strompreise verschiedener nationaler und lokaler Märkte bereit.

2.4 Unternehmensplattform

Die Unternehmensplattform ist die zweite Teilplattform innerhalb der Energiesynchronisationsplattform. Sie stellt das modulare, serviceorientierte, sichere und nach außen gekapselte IKT-System zur Bereitstellung von Energieflexibilität innerhalb eines Industrieunternehmens dar (Schel et al., 2018). Erstens finden in der Unternehmensplattform Aufnahme, Zusammenführung, Analyse und Optimierung von Prozess- und Produktionsdaten statt. Zweitens werden Systeme, Anlagen und Komponenten energiesynchron gesteuert und geregelt. Die UP ermöglicht dadurch einen energieflexiblen Ablauf der Produktion (Schel et al., 2018). Drittens ermöglicht die Unternehmensplattform eine Kommunikation zur Marktplattform und zu externen Services, um die Vermarktung von Energieflexibilität zu ermöglichen (siehe beispielhafter Prozessablauf in *Kapitel 4.2.5*). Eine Auswahl der UP-seitigen Komponenten

und Services wird in *Kapitel 2.5* vorgestellt. Die Unternehmensplattform strebt durch unterschiedliche Betriebskonzepte – On-Premises, in der Cloud oder hybrid – eine hinreichende Skalierbarkeit an und lässt sich so an die Bedürfnisse der Industrieunternehmen anpassen (Bauernhansl et al., 2019).

Im Kontext der Unternehmensplattform gibt es verschiedene Rollen, die zu berücksichtigen sind. Für eine ausführliche Auflistung einzelner Stakeholder sei auf Menci et al. (2021) verwiesen:

- **Plattformteilnehmer** sind Industrieunternehmen, die Energieflexibilität bereitstellen können. Sie nutzen Services (»Apps«) unterschiedlicher Hersteller auf der UP mit dem Ziel, eine passende Unterstützung für den energieflexiblen Betrieb ihrer Produktionsprozesse zu finden.
- Der **Plattformbetreiber** stellt den Betrieb der Plattform zur Bereitstellung von Services sowie die Grundfunktionalitäten zur Serviceautomatisierung und -orchestrierung sicher.
- **Serviceanbieter** entwickeln Serviceanwendungen (»Apps«) und stellen diese bereit, um den Funktionsumfang der Unternehmensplattform zu erweitern.

Abbildung 3 zeigt den generellen Aufbau der Unternehmensplattform mit ihren Schnittstellen zu unternehmensinternen Systemen und zu marktseitigen Diensten. Systeme und Anlagen können auf der Unternehmensplattform über Konnektoren bzw. spezifische Services eingebunden werden. Die Kernkomponenten und Services werden mit ihrem jeweiligen Einsatzzweck nachfolgend beschrieben. Eine ausführliche Beschreibung der Architektur der Unternehmensplattform ist bei Menci et al. (2021) zu finden.

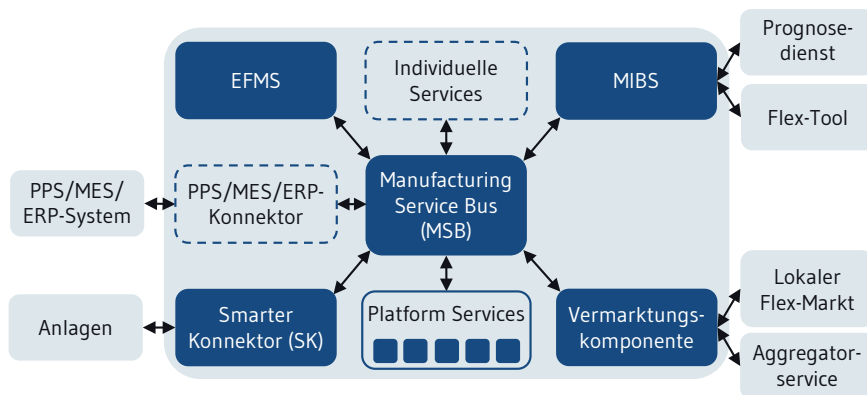


Abb. 3 Aufbau der Unternehmensplattform mit Darstellung der Kommunikationsbeziehungen zwischen den Komponenten und den externen Entitäten

2.5 Unternehmensplattformseitige Kernkomponenten und Services

Abbildung 3 zeigt die softwareseitigen Kernkomponenten der Unternehmensplattform (dunkelblau hervorgehoben), die zur Erfassung und Kommunikation von Energieflexibilität zwischen Maschinen und marktseitigen Services benötigt werden. Zum anderen gibt es weitere optionale Services, die in den Kommunikationsprozess innerhalb der Unternehmensplattform eingebunden werden können. Zur Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten und Services wird hauptsächlich das EFDM verwendet. Die in *Abbildung 3* aufgeführten Komponenten und Services werden im Folgenden aufgelistet. Detaillierte Steckbriefe zu allen Komponenten und Services sind in Grigorjan et al. (2020) zu finden.

- Der **Manufacturing Service Bus (MSB)** ist die zentrale Komponente der Unternehmensplattform. Über den MSB werden Informationen zwischen Services und Komponenten verteilt (hauptsächlich EFDMs). Der MSB ist als eine Middleware definiert, an die bestehende IT-Services angebunden werden können. Dabei unterstützt der MSB verschiedene offene und standardisierte Kommunikationsprotokolle.
- Der **Smarte Konnektor (SK)** ist die Integrationskomponente für die zusätzliche Einbindung von proprietären SPS-Protokollen. Als Softwareschnittstelle ermöglicht der Smarte Konnektor es, Steuerungsdaten mit IT-Systemen und Cloud-Komponenten zu verbinden und damit Steuerungs- und Energiedaten aus unterschiedlichen Quellen zu integrieren. Nach einer umfangreichen Konfiguration erstellt der Smarte Konnektor aus den ausgelesenen Daten Energieflexibilitätsdatenmodelle (EFDM) (*Kapitel 3*) und setzt deren Erbringung (Steuerung) nach einer erfolgten Vermarktung um.
- Der **Energieflexibilitätsmanagementservice (EFMS)** dient als Repository für die vom Smarten Konnektor oder anderen Services erstellten EFDM-Objekte des Industrieunternehmens. In seiner weiteren Funktion als Broker übermittelt der EFMS die EFDM-Objekte über den MSB an relevante Services (Vermarktungsservice, Optimierungsservice etc.).
- **Konnektoren für Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme (PPS), Manufacturing Execution Systems (MES) und Enterprise Resource Planning (ERP)** ermöglichen die Einbeziehung von Daten, die auf einer höheren Ebene der Automatisierungspyramide erfasst und von bestimmten individuellen Services angefragt und genutzt werden. Die Datenbereitstellung geschieht hierbei nicht zwingend über das EFDM.
- Der **Marktinformationsbeschaffungsservice (MIBS)** ermöglicht die Beschaffung von Informationen aus Services der Marktplattform zur Nutzung auf der Unternehmensplattform (z. B. Informationen zu Strompreisentwicklungen). Der MIBS fungiert dabei als Schnittstelle für die Anbindung dieser externen Services.
- Die **Vermarktungskomponente** ermöglicht die Kommunikation zwischen Unternehmensplattform und Vermarktungsservices, welche zuvor über die Marktplattform vermittelt wurden (z. B. Aggregator-Flexibilitätshandel). Die Vermarktung von zuvor in der Unternehmensplattform ermittelter Energieflexibilität kann in dieser Komponente manuell angestoßen werden oder vollautomatisiert geschehen. Der Vorteil aus Nutzersicht ist hier, dass der Vermarktungsprozess unabhängig vom Zielservice einheitlich und in einem zentralen System gesteuert wird.

Die Vermarktungskomponente übernimmt im Hintergrund die vermarktungsservicespezifische Kommunikation und die Transformation von EFDM nach vermarktungsservicespezifischem Datenmodell. Die Transformation wird von einem entsprechenden Vermarktungsadapter in der Vermarktungskomponente durchgeführt.

- Die **Platform Services** sind technische Basisdienste der Unternehmensplattform. Dazu gehören z. B. das Identitäts- und Berechtigungsmanagement oder ein Repository für installierte und installierbare Services (»Apps«).

Darüber hinaus gibt es weitere individuelle Services, die je nach Anwendungsfall eingesetzt werden können. Dazu gehören z. B. verschiedene Optimierungsservices und der Merge-Service. Detaillierte Erläuterungen zu Optimierungsservices sind in Schilp et al. (2021) zu finden.

- Der **Merge-Service** ist ein Beispiel für einen individuellen Service. Dieser kombiniert (aggregiert) einzelne Energieflexibilitäten und teilt (disaggregiert) kombinierte Energieflexibilitäten wieder in ursprüngliche Energieflexibilitäten auf. Dies gilt sowohl für Flexibilitätsräume als auch für Flexibilisierungsmaßnahmen (*Kapitel 3*). Dadurch können viele kleine Energieflexibilitäten gemeinsam auf einem Energiemarkt vermarktet werden, wodurch sich das vermarktbare Energieflexibilitätspotenzial erhöht. Der Einsatz des Service verringert darüber hinaus die Komplexität nachgelagerter Optimierungsprobleme. Somit kann der Merge-Service zu einer Steigerung ökonomischer Nutzbarkeit der Energieflexibilitätspotenziale innerhalb eines Industrieunternehmens beitragen.

3 Energieflexibilitätsdatenmodell

Autoren: van Stiphoudt · Schöpf · Potenciano Menci · Lindner · Fridgen · Weigold

Für die Kommunikation von Energieflexibilität innerhalb der Energiesynchronisationsplattform, d. h. insbesondere innerhalb der Unternehmensplattform und idealerweise sogar auch mit externen, über die Marktplattform vermittelten Services, wurde das Energieflexibilitätsdatenmodell (EFDM) entwickelt. Das EFDM ermöglicht einen standardisierten Austausch von Informationen zu Energieflexibilität in einem generischen Format, und zwar unabhängig von der eigentlich physisch zugrundeliegenden Energieflexibilität. Die Spezifikation des EFDMs erfolgte in Zusammenarbeit mit der energieintensiven Industrie des SynErgie-Konsortiums (Schott et al., 2019). Dieses Kapitel geht auf die Ausgestaltung des EFDMs ein. Für eine detaillierte Beschreibung sei auf Buhl et al. (2021) verwiesen. Die Anwendung des EFDMs innerhalb der ESP wird in *Kapitel 4.2.4* erläutert.

3.1 Notwendigkeit des Datenmodells

Durch digitale Kommunikationstechnologien ist es möglich, lokale Engpässe im Stromnetz (Smart Grid) zu identifizieren und durch entsprechende Maßnahmen zu schließen (Schott et al., 2019). Damit dies gelingt, ist eine einheitliche Beschreibung von Energieflexibilitäten von entscheidender Bedeutung, um die unterschiedlichen Arten von Energieflexibilität wirtschaftlich für eine sichere Stromversorgung

einsetzen zu können. Die Verwendung eines standardisierten Datenmodells zur Beschreibung von Energieflexibilität ermöglicht dabei eine automatisierte Kommunikation zwischen den verschiedenen Parteien innerhalb des Energiesystems. Dadurch können zwei Probleme vermieden werden: Erstens werden mögliche Fehlerquellen in der Übersetzung verschiedener Modelle vermieden. Zweitens entfallen durch einen standardisierten Datenaustausch Lock-in-Effekte für Nutzer der ESP. Sollten sich Anforderungen von Industrieunternehmen ändern oder andere Anreize den Wechsel eines Serviceanbieters erfordern, kann dies ohne hohe Kosten durch Anpassung der Schnittstellen erfolgen. Durch ein standardisiertes Datenmodell kann der Informationsaustausch verbessert, der Zugang zu Services und das Angebot an Flexibilitätsbereitstellungen erhöht sowie das Plattform-Ökosystem insgesamt vergrößert werden (Schott et al., 2019). Unter diesem Gesichtspunkt ist das Energieflexibilitätsdatenmodell entwickelt und mithilfe von Prototypen evaluiert, validiert und erweitert worden.

3.2 Ziel und Zweck des Datenmodells

Das Energieflexibilitätsdatenmodell bildet Energieflexibilität in einem Flexibilitätsraum und in konkreten Energieflexibilitätsmaßnahmen ab. Ein Flexibilitätsraum beschreibt hierbei die Möglichkeit eines energieflexiblen Systems, seine Leistung gegenüber dem Referenzbetrieb zu variieren. Die Erzeugung eines Digitalen Zwillings als virtuelles und vollständig realitätsgetreues Abbild einer Energieflexibilität wird nicht angestrebt. Die generische Beschreibung beschränkt sich daher auf ein Mindestmaß an Parametern und Kennzahlen, die alle technischen und energetisch relevanten Informationen enthalten, um Energieflexibilität für alle Anwendungsfälle der ESP zu beschreiben. Dadurch sollen zum einen die Komplexität und die Datenmenge der ausgetauschten Informationen beschränkt werden; zum anderen soll der Austausch sensibler Produktions- und Prozessdaten vermieden werden.

Das EFDM ist eine zentrale Grundlage für alle darauf aufbauenden Services innerhalb und außerhalb der ESP. Ausgehend davon können Datenmodelle für spezielle Anwendungsfälle, beispielsweise zur Optimierung abgeleitet werden (Schilp et al. 2021), die nur einen Teil der Informationen des EFDMs beinhalten. Für die Beschreibung von EFDMs wurde ein JSON-Schema entwickelt.

3.3 Klassen des Datenmodells

Ein Energieflexibilitätsdatenmodell stellt den Rahmen zur generischen Beschreibung von Flexibilitätsräumen und Flexibilitätsmaßnahmen mithilfe von Kennzahlen dar. Die technischen energieflexiblen Systeme werden durch die Klassen »Flexible Last«, »Energiespeicher« und »Abhängigkeit« charakterisiert. Über die Ausprägung der Kennzahlen der genannten Klassen werden die Freiheitsgrade der Energieflexibilität definiert und somit die zulässigen Möglichkeiten des technischen Systems, seine Leistung zu variieren, als Flexibilitätsraum beschrieben.

Neben den drei genannten Klassen zur Beschreibung des Flexibilitätsraums eines Systems beinhaltet das EFDM auch die Klasse »Energieflexibilitätsmaßnahme«, die eine konkrete Leistungsänderung des Systems innerhalb seines Flexibilitätsraums beschreibt.

Eine Übersicht über die verwendeten Klassen »Flexible Last«, »Energiespeicher«, »Abhängigkeiten« und »Energieflexibilitätsmaßnahmen« gibt *Abbildung 4* mit jeweils einer kurzen Beschreibung. Für weitere Beschreibungen, Herleitungen und Definitionen sei auf Schott et al. (2019) verwiesen. Jede Klasse beinhaltet unterschiedliche Kennzahlen. Die Kennzahlen beinhalten interne Schlüssel-Wert-Paare, die vom JSON-Schema benötigt werden.

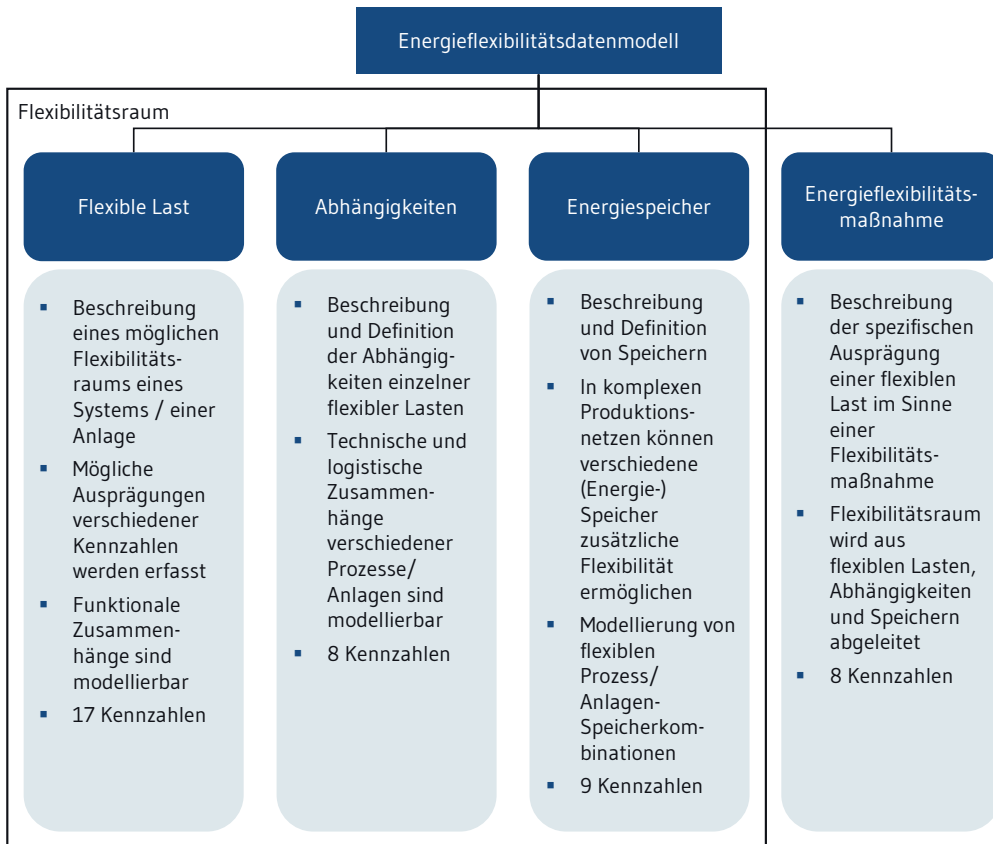


Abb. 4 Klassen des Energieflexibilitätsdatenmodells

3.3.1 Flexible Last

Eine flexible Last beschreibt ein technisches System oder das Zusammenspiel verschiedener technischer Systeme, die das Potenzial haben, eine Leistungsänderung hervorzubringen. Ob es sich bei dem technischen System um einen Erzeuger oder Verbraucher von Energie und damit um eine positive oder negative Last handelt, ist dabei irrelevant. Bei der Definition einer flexiblen Last werden Beschränkungen der Leistungsänderung bzw. der energetischen Freiheitsgrade an sich berücksichtigt. Abhängigkeiten zu anderen flexiblen Lasten oder zu Energiespeichern werden nicht in der Klasse »Flexible Last« beschrieben. Insgesamt beinhaltet die Klasse »Flexible Last« 17 Kennzahlen (Buhl et al., 2021).

3.3.2 Energiespeicher

Ein Energiespeicher ist ein technisches System oder das Zusammenspiel verschiedener technischer Systeme, die das Potenzial haben, Energie zu speichern. Grundsätzlich sind neben direkten Energiespeichern (z.B. Wärmespeicher oder Batteriespeicher) auch inhärente Speicher wie Produktspeicher (z.B. Halbstoffe bei der Papierproduktion) möglich. Energiespeicher können ohne flexible Lasten (oder im weiteren Sinne auch flexible Stromerzeuger) nicht für Energieflexibilität genutzt werden, da ohne eine flexible Last keine Leistungsänderung möglich ist. Beispielsweise kann die Energieflexibilität eines Wärmespeichers nur genutzt werden, wenn entsprechende Anlagen zur Wärmeversorgung und/oder -abnahme als flexible Lasten mit dem Speicher verbunden sind. Insgesamt beinhaltet die Klasse »Energiespeicher« neun Kennzahlen (Buhl et al., 2021).

3.3.3 Abhängigkeiten

Produktionsprozesse sind komplexe Systeme, die voneinander abhängige Prozesse beinhalten. Daher beinhaltet das Energieflexibilitätsdatenmodell die Klasse »Abhängigkeiten«, um diese Komplexität beschreiben zu können. Insgesamt beinhaltet die Klasse »Abhängigkeiten« acht Kennzahlen (Buhl et al., 2021).

3.3.4 Energieflexibilitätsmaßnahmen

Neben den drei Klassen »Flexible Last«, »Energiespeicher« und »Abhängigkeiten« zur Beschreibung des Flexibilitätsraums beschreibt eine Energieflexibilitätsmaßnahme (EFM) eine bewusste Aktion zur Durchführung eines definierten Zustandswechsels in einem Produktionssystem und die damit verbundenen Wechselwirkungen im Produktionssystem (Schott et al., 2019; VDI 5207 Blatt 1). Dies geht mit einer konkreten Leistungsänderung innerhalb des Flexibilitätsraums einher, weist selbst keine Freiheitsgrade mehr auf und ist zeitlich terminiert. Insgesamt beinhaltet die Klasse »Energieflexibilitätsmaßnahme« acht Kennzahlen (Buhl et al., 2021).

In der Klasse »Energieflexibilitätsmaßnahme« werden für die einzelnen Kennzahlen konkrete Werte z. B. als Sollwert für die ausführende Instanz vorgegeben bzw. definiert. Die maschinenseitige Regelung ist dafür zuständig, die Energieflexibilität umzusetzen und Toleranzen bestmöglich einzuhalten. Dies erfolgt beispielsweise bei SPS-gesteuerten Anlagen über entsprechende Regler (z. B. proportional–integral–derivative (PID)-Regler), welche anwendungsfallspezifisch eingestellt sind.

3.4 Exemplarische Beschreibung

Die Forschungs- und Lernfabrik ETA an der TU Darmstadt stellt einen Forschungsdemonstrator in Realmaßstab dar und ermöglicht es so, die Entwicklungsergebnisse an realen Produktionsanlagen zu erproben. Darauf basierend wurde in einem Versuchsaufbau das EFDM für ein beispielhaftes Produktionsinfrastruktursystem erstellt (Abbildung 5).

Bei dem betrachteten System handelt es sich um die Prozesskältebereitstellung für die Maschinenkühlung einer Werkzeugmaschine. Hierbei kommt als flexible Last ein luftgekühltes Kompressionskälteaggregat zum Einsatz. Das Energieflexibilitätspotenzial wird durch die Kopplung eines Kältespeichers erhöht und ermöglicht dadurch den energieflexiblen Betrieb der Werkzeugmaschine als Energieverbraucher.

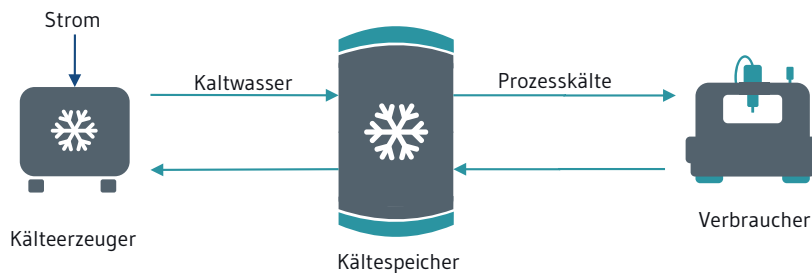


Abb. 5 Schematische Darstellung eines Beispielsystems in der ETA-Fabrik der TU Darmstadt

Die Berechnung bzw. Erstellung des initialen EFDM liegt bei der für den Anlagenbetrieb zuständigen Person. Sie kann z. B. dem Energiemanagement, der Produktionsleitung oder auch der Instandhaltung eines Industrieunternehmens angehören. Ein Auszug aus dem EFDM für das in *Abbildung 5* gezeigte System ist in *Tabelle 1* und *Tabelle 2* aufgeführt. Die einzelnen Kennzahlen müssen dabei aus den maschinenspezifischen Daten sowie ihrer Verwendung entsprechend berechnet oder eingetragen werden. Detailliertere Ausführungen sind in Schott et al. (2019) und Buhl et al. (2021) zu finden.

Um anschließend ein EFDM zu erhalten, das den Spezifikationen im definierten JSON-Schema entspricht, wird der auf der Unternehmensplattform verfügbare Service »EFDM–GUI« verwendet. Dieser ermöglicht durch eine logische Abfrage der Kennzahlen jeder Klasse die Erstellung des system-

zugehörigen EFDs. Dieses kann im Anschluss z. B. an den Smarten Konnektor weitergegeben werden und ermöglicht eine Anbindung der Anlage an die Unternehmensplattform. Die informationstechnische Umsetzung wird in *Kapitel 4.2* sowie in Menci et al. (2021) näher beschrieben.

Tab. 1 Berechnete Kennzahlen für die flexible Last »Kälteaggregat« des Beispielsystems (Punkt als Dezimaltrennzeichen, Komma zur Abgrenzung der Komponenten eines Vektors oder von Intervallgrenzen, Werte in Sekunden werden zur Veranschaulichung teils als Zeitstempel dargestellt. (Buhl et al. (2019))

Kennzahl	Wert	Einheit
Energieflexibilitäts-ID	2009210002	–
Reaktionsdauer	60	s
Gültigkeit	[2021–09–20T06:00:00, 2021–09–20T11:00:00]	s
Leistungszustände	[0.8,6]	kW
Haltedauer	[30, infinity]	s

Tab. 2 Berechnete Kennzahlen für den Speicher des Beispielsystems

Kennzahl	Wert	Einheit
Speicher-ID	2009210003	–
Nutzbare Speicherkapazität	[0, 4.648]	kWh
Anfangsenergiegehalt inkl. Zeitpunkt	(2.0, 2021–09–20T06:00:00)	(kWh, s)
Zielenergiegehalt inkl. Zeitpunkt	(0, 2021–09–20T11:00:00)	(kWh, s)
Energieverluste	1.228/3600	% · s ⁻¹
Versorgungssysteme	(2009210002, 2.6)	(–, –)
Nicht beeinflussbarer Energiebedarf	(11:00:00, 0.477)	(s → kW)

4 Prozesse und Informationsflüsse

Autoren: Potenciano Menci · Winter · Grigorjan · Lindner · van Stiphoudt · Schöpf · Fridgen

4.1 Prozessmodell der Energiesynchronisationsplattform

Die Prozesse der Energiesynchronisationsplattform wurden mittels The Open Group Architecture Framework (TOGAF), einem Vorgehensmodell zur Entwicklung von Unternehmensarchitekturen, erhoben und modelliert. Ausgehend von den Zielen der ESP wurden Rahmenbedingungen, Geschäftsprozesse, Anwendungsprozesse und Informationsflüsse insbesondere in der Geschäftsarchitektur und der Informationssystemarchitektur abgebildet. Die Geschäftsprozesse der ESP wurden in unterschiedlichen Granularitäten modelliert. Einen Überblick über die Prozesse bietet die in *Abbildung 6* dargestellte Prozesslandkarte, in der die Prozessarchitektur in Kernprozesse, Managementprozesse und Supportprozesse untergliedert ist.

Die Kernprozesse beziehen sich auf die Ermittlung, Beschreibung, Vermarktung und Erbringung von Energieflexibilität. Die hier modellierten Prozesse sind Grundlage für die Implementierung der Energiesynchronisationsplattform (*Kapitel 2*). Im Rahmen der »Identifikation von Flexibilität« wird unter Zuhilfenahme relevanter Unternehmens-, Prozess- und Betriebsdaten (Sensorik, Produktionsplanung, etc.) die verfügbare Energieflexibilität bestimmt und mithilfe des Energieflexibilitätsdatenmodells beschrieben. Die ermittelten Energieflexibilitätsräume werden anschließend bewertet und es wird über deren Vermarktung entschieden. Nach erfolgter Vermarktung sind entsprechende Flexibilitätsmaßnahmen zu erbringen. Da all diese Abläufe teilweise unternehmensspezifisch sind, wurden Referenzprozesse definiert und bereitgestellt, die als Prozessvarianten an ein spezifisches Unternehmen angepasst werden können.

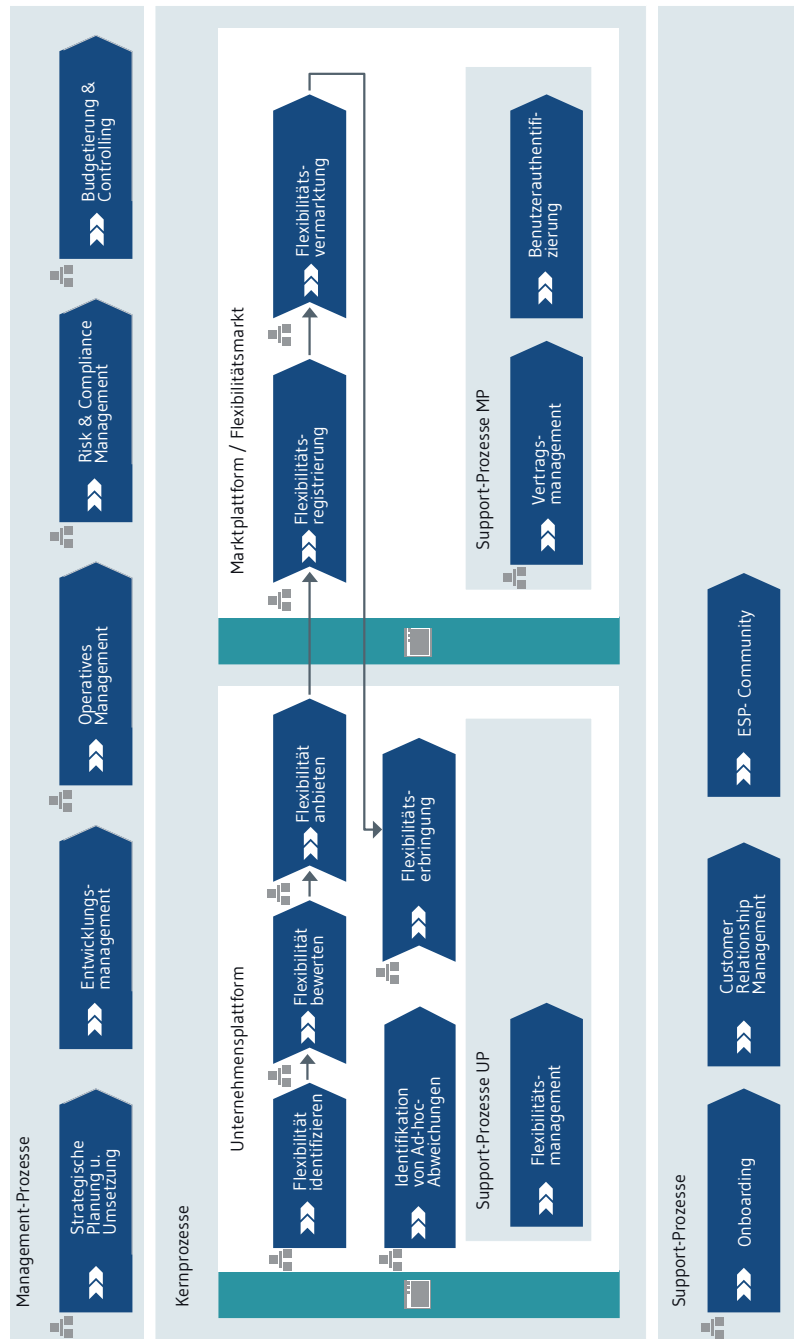


Abb. 6 Prozesslandkarte der Energiesynchronisationsplattform

4.2 Umsetzung von Prozessen

Nachfolgend wird beschrieben, wie ausgewählte Prozesse mit den Komponenten der Energiesynchronisationsplattform umgesetzt werden.

4.2.1 Erfassung von Energieflexibilität im Energieflexibilitätsdatenmodell

Der erste Schritt zur Erschließung von Energieflexibilität ist die Erfassung des Energieflexibilitätspotenzials. Dazu können Potenzialanalysen oder komplementäre Untersuchungen nach VDI 5207 Blatt 1 und 2 durchgeführt werden (VDI 5207 Blatt 1, 5207 Blatt 2). Mögliche einsetzbare Werkzeuge sind das Energieflexibilitätsaudit zur Identifikation von Energieflexibilität innerhalb einer Produktionslinie (siehe Kopernikus-Projekt SynErgie (2021b) für weitere Details und *Kapitel B.1*) und der E-Flex-Scanner zur Bewertung von Energieflexibilität auf Versorgungstechnikebene (siehe Kopernikus-Projekt SynErgie (2021a) für weitere Details und in *Kapitel B.1*). Nach Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials und einer entsprechenden Auswahl an Anlagen kann in einem nächsten Schritt eine Anbindung der ausgewählten Anlagen an die IT-Infrastruktur der ESP erfolgen. Dazu ist zunächst die Implementierung des Smarten Konnektors zur Anbindung von Anlagen oder anderer Konnektoren erforderlich, um beispielsweise ein MES anzubinden (Menci et al., 2021).

Nach erfolgter Implementierung und Anbindung an die IT-Infrastruktur der ESP kann die Beschreibung der Energieflexibilität jeder anzubindenden Anlage im EFDM erfolgen. Hierzu werden die Flexibilitätsräume der Anlage mithilfe der Kennzahlen des EFDMs beschrieben. Weitere Informationen über das EFDM können *Kapitel 3* entnommen werden. Zunächst muss dafür bestimmt werden, wie Anlagenparameter und Messwerte in EFDM-Kennzahlen überführt werden. Anschließend wird diese Parametrierung mittels UP-seitigem »EFDM GUI«-Service eingegeben und danach an den Smarten Konnektor übermittelt. Schließlich bestimmt der Smarte Konnektor im laufenden Betrieb aus den Eingangsdaten und seiner Parametrierung konkrete Flexibilitätsräume. Detaillierte Informationen dazu beschreiben Menci et al. (2021).

4.2.2 Optimierung bzw. Aggregierung von Energieflexibilitäten

Bevor die erstellten EFDM-Objekte, konkret die flexiblen Lasten in den Flexibilitätsräumen, zur Vermarktung genutzt werden, besteht die Möglichkeit, verschiedene individuelle Services der Unternehmensplattform zu nutzen, z. B. Optimierungsservices oder den Merge-Service (Schilp et al., 2021). Diese bilden einen zentralen Bestandteil der Energiesynchronisationsplattform und sind auf verschiedenen Ebenen von Fabriken und Industrieanlagen einsetzbar. Sie sollen einen optimalen, energieflexiblen Betrieb ermöglichen. Zur Nutzung dieser Services werden die EFDM-Objekte vom Smarten Konnektor an den Energieflexibilitätsmanagementservice (EFMS), dem Repository für EFDM-Objekte, übermittelt. Ein Optimierungsservice oder der Merge-Service kann nun durch Pull Request diese EFDM-Objekte abrufen (Schilp et al., 2021). In komplexen Szenarien können mehrere solcher Services eine kaskadierte Verarbeitung vornehmen.

Optimierungsservices auf der Unternehmensplattform können auch Marktdaten wie beispielsweise Preisprognosen, die durch Services der Marktplattform bereitgestellt werden, für ihre Optimierungen nutzen. Die Anfrage erfolgt dabei über den Marktinformationsbeschaffungsservice. Neben Optimierungen auf der Unternehmensplattform gibt es auch Services der Marktplattform, die Optimierungen vor der eigentlichen Vermarktung bzw. der Nutzung von Vermarktungsservices durchführen. Ein Beispiel ist das Flexibilitätseinsatzplanungstool (*Kapitel 2.3* sowie *Kapitel A.1*), das optimale Vermarktungsmöglichkeiten für Energieflexibilität identifiziert und eine Entscheidungsunterstützung bietet. Darüber hinaus können in einigen Fällen Ergebnisse von Optimierungen innerhalb von Services der Marktplattform auch von internen Services der Unternehmensplattform für ihre Optimierung genutzt werden.

4.2.3 Vermarktung von Energieflexibilität

Für die Vermarktung von Energieflexibilität stehen derzeit die Services von Aggregatoren und der lokale Flexibilitätshandel zur Verfügung (*Kapitel 2.3*). Die Kommunikation wird auf der Seite der Unternehmensplattform über die Vermarktungskomponente und einen für den jeweiligen Zielservice spezifischen Vermarktungsadapter hergestellt. Die Vermarktungskomponente ist eine allgemeine, interoperable Komponente. Da die Zielservices jedoch spezifisch sind, kann die Vermarktungskomponente diese nicht direkt ansprechen, sondern ist auf die Hilfe der Vermarktungsadapter angewiesen.

Ein Vermarktungsadapter agiert als Plug-in für die Vermarktungskomponente und ist Bindeglied zwischen der Unternehmensplattform und einem externen Vermarktungsservice. Er stellt dem Service die nötigen Daten in den passenden Datenformaten zur Verfügung. Da es sich bei dem Informationsaustausch innerhalb der Unternehmensplattform hauptsächlich um EFDM-Objekte handelt, aber externe Services zumeist (noch) nicht das Energieflexibilitätsdatenmodell verwenden, wandelt der servicespezifische Vermarktungsadapter die Informationen in das entsprechende Datenformat des Serviceanbieters um. In gleicher Weise wandelt der Vermarktungsadapter das Datenmodell des Serviceanbieters in das EFDM um, wenn der externe Service mit dem Industrieunternehmen kommunizieren möchte. Neben der Behandlung von Datenformaten ist ein Vermarktungsadapter auch zur Abwicklung der servicespezifischen Kommunikationsprozesse über servicespezifische Protokolle nötig. Daher verfügt jeder Vermarktungsservice über einen individuellen Vermarktungsadapter, der von der Marktplattform heruntergeladen und in die Unternehmensplattform eines Industrieunternehmens integriert werden kann.

4.2.4 Ausführung einer Energieflexibilitätsmaßnahme

Wurde Energieflexibilität erfolgreich vermarktet, wird im Falle eines Flexibilitätsabrufs ein Aktivierungssignal vom Service, der die Vermarktung durchgeführt hat (z. B. der Energieflexibilitätshandelservice eines Aggregators), an die Vermarktungskomponente bzw. den zugehörigen Vermarktungsadapter in die Unternehmensplattform gesendet. Der Adapter übersetzt das Aktivierungssignal in eine Energieflexibilitätsmaßnahme im Energieflexibilitätsdatenmodell. Diese Maßnahme entspricht einem konkreten Lastgang innerhalb eines bestehenden Flexibilitätsraums. Die Energieflexibilitätsmaßnahme geht über den Manufacturing Service Bus an den Energieflexibilitätsmanagementservice und

wird von diesem weitergereicht an die Komponente bzw. den Service auf der Unternehmensplattform, die den Flexibilitätsraum gemeldet hat. Diese Komponente bzw. der Service ist für die Einleitung der weiteren nötigen Schritte verantwortlich, um die Maßnahme wie gefordert zu erbringen. Hierbei wird die Kette aller Komponenten bzw. Services, die zur Erzeugung der vermarkteten Energieflexibilität geführt hat, rückwärts durchlaufen bis zum relevanten Konnektor (etwa dem Smarten Konnektor). Dieser Prozess wird nachfolgend in Kapitel 4.2.5 an einem Beispiel illustriert.

Sobald eine Energieflexibilitätsmaßnahme am entsprechenden Smarten Konnektor ankommt, ordnet er die Maßnahme über den entsprechenden Flexibilitätsraum einer Anlage zu. Zur Realisierung der Energieflexibilitätsmaßnahme sind in einer lokalen Konfigurationsdatei eine Reihe von Operationen hinterlegt. Diese beschreiben anlagenspezifisch die notwendigen Aktionen und Einstellungen, um den gewünschten Lastgang der Energieflexibilitätsmaßnahme zu erreichen. Die Konfigurationsdatei kann nur vom entsprechenden Smarten Konnektor eingesehen werden und steht außerhalb dessen (auch UP-seitig) nicht zur Verfügung.

Nachdem die Energieflexibilitätsmaßnahme für die angegebene Haltedauer aktiv war, soll die Vermarktungskomponente und letztlich der Käufer der Energieflexibilität über die erfolgreiche Durchführung informiert werden. Hierfür gilt es, noch ein entsprechendes Verfahren zu bestimmen.

4.2.5 Anwendungsbeispiel

In diesem Kapitel wird anhand eines Beispiels der Einsatz der Energiesynchronisationsplattform illustriert. In der betrachteten Anwendung (Abbildung 7) verfügt ein Industrieunternehmen über mehrere Metallschmelzöfen, die als flexible Lasten (z. B. Erhöhung der Nachfrage) eingesetzt werden können. Diese Energieflexibilität soll über einen Aggregator auf einem der Spotmärkte vermarktet werden.

Nach einer Potenzialerschaffung erstellt der Smarte Konnektor zu jedem Metallschmelzofen eine Beschreibung der flexiblen Last. Das generierte EFDM-Objekt wird im Anschluss vom Smarten Konnektor über den MSB an den EFMS zur Speicherung weitergegeben. Von dort aus wird der Merge-Service auf der Unternehmensplattform aufgerufen. Dieser fasst die flexiblen Lasten der einzelnen Metallschmelzöfen für die Vermarktung zusammen. Der Merge-Service stellt über den MSB eine Verbindung mit dem EFMS her und erstellt ein EFDM-Objekt für die zusammengeführte Energieflexibilität, das wiederum im EFMS gespeichert wird. Das neue EFDM-Objekt wird nun durch die Vermarktungskomponente (mit Unterstützung eines Vermarktungsadapters) an den Aggregator-Service weitergegeben, der die Energieflexibilität für Handelsgeschäfte auf dem Spotmarkt nutzt und ggf. schließlich die Energieflexibilität vom Industrieunternehmen abrufen. Ein Aktivierungssignal wird vom Aggregator an die Vermarktungskomponente gesendet, und diese schickt eine Flexibilitätsmaßnahme an den Merge-Service. Der Merge-Service übersetzt die aggregierte Maßnahme in mehrere Maßnahmen für die einzelnen Smarten Konnektoren und sendet sie an dieses. Der EFMS ist als EFDM-Repository wieder bei jeder Übermittlung der EFDM-Objekte zwischen Vermarktungskomponente und Merge-Service bzw. zwischen Merge-Service und Smartem Konnektor geschaltet. Die Smarten Konnektoren sorgen im letzten Schritt für die Steuerung der Metallschmelzöfen und somit für die Erbringung der vermarkteten und somit abgerufenen Energieflexibilitätsmaßnahme.

Das vorgestellte Beispiel veranschaulicht den Einsatz der Energiesynchronisationsplattform im Zusammenspiel mit den zuvor vorgestellten Komponenten und Services. Die automatisierte Kommunikation über standardisierte Schnittstellen innerhalb der Unternehmensplattform sowie nach außen mit Services, die eine Vermarktungsrolle einnehmen, wird für einen konkreten Anwendungsfall (Vermarktung von Energieflexibilität mehrerer Metallschmelzöfen) beschrieben. Dies verdeutlicht den Einsatzzweck der Energiesynchronisationsplattform als Unterstützer für eine automatisierte Vermarktung und die Bereitstellung von Energieflexibilität.

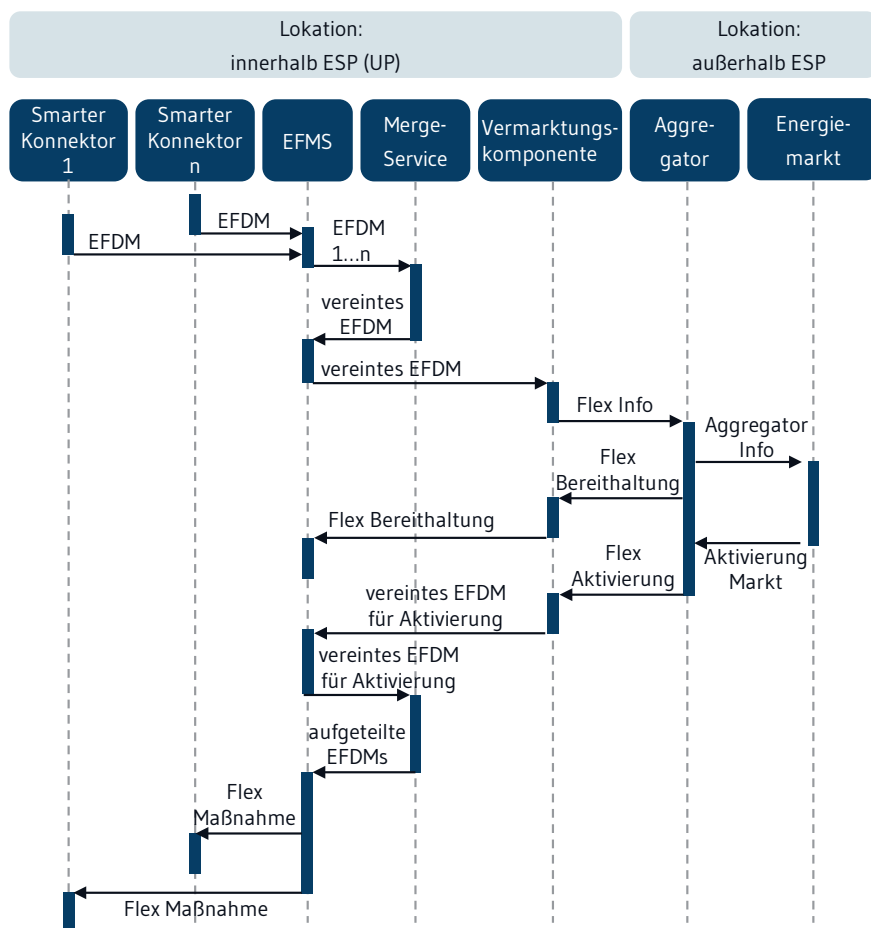


Abb. 7 Sequenzdiagramm: Die Energieflexibilität mehrerer Öfen wird über einen Aggregator vermarktet (EFDM: Energieflexibilitätsdatenmodell; EnerFlex: Energieflexibilität; ESP: Energiesynchronisationsplattform)

5 Informationstechnische Sicherheit

Autoren: Oeder · Ahrens · Winter

IT-Sicherheit ist eine wesentliche Voraussetzung für den erfolgreichen Betrieb von IT-Systemen. Daher ist die Perspektive der IT-Sicherheit ein zentrales Querschnittsthema für die Energiesynchronisationsplattform. Um IT-Sicherheit bestmöglich gewährleisten zu können, ist eine systematische Herangehensweise mit bewährten Methoden notwendig. Dies bringt beim Planen, Entwickeln, Installieren und Betreiben eines Systems entsprechende Anforderungen und Aufgaben mit sich. Nachfolgend wird eine Auswahl an solchen Anforderungen und Aufgaben vorgestellt. Es erfolgt eine Unterteilung in begleitende Maßnahmen wie Prozesse aus dem Sicherheitsmanagement und technische Umsetzungsmaßnahmen für Entwicklung, Installation und Betrieb der Energiesynchronisationsplattform.

Die Anforderungen der Energiesynchronisationsplattform an die IT-Sicherheit kommen aus zwei Richtungen. Einerseits gibt es die Sicherheitsanforderungen, die sich aus dem industriellen Umfeld, also der Produktion, ergeben und andererseits die Anforderungen, welche aus einer Einstufung der Energiesynchronisationsplattform oder Teilen dieser als kritische Infrastruktur (KRITIS) resultieren könnten. Die Einstufung als KRITIS kann insbesondere für die Unternehmensplattform oder die durch die Marktplattform vermittelten Services relevant werden, wenn die Schwellenwerte für KRITIS überschritten werden. Für Erzeugungsanlagen und Anlagen oder Systeme zur Steuerung/Bündelung von elektrischer Leistung liegen diese ab Januar 2022 bei 104 MW installierter Nettonennleistung. Für Anlagen zur Erbringung von Primärregelleistung liegt der Wert bei 36 MW (BT-Drs. 19/26106, BSI, 2021). Während im industriellen Umfeld die Sicherstellung des Produktionsprozesses im Vordergrund steht, ist es bei KRITIS im Allgemeinen die Versorgungssicherheit und hier insbesondere die Zuverlässigkeit der Stromversorgung. Details und Anforderungen zur Umsetzung regeln die gesetzlichen Vorgaben und Standards (BT-Drs. 19/26106; BSI, 2021; bdew, 2019).

5.1 Maßnahmen des Security-Prozesses

Maßnahmen zur IT-Sicherheit sind immer mit zeitlichem, organisatorischem und personellem Aufwand verbunden und generieren zusätzliche Kosten. Damit die Anforderungen an die IT-Sicherheit und damit die umzusetzenden Maßnahmen auch dem tatsächlichen Schutzbedarf bei den Kernkomponenten und den Services der Energiesynchronisationsplattform entsprechen, ist es erforderlich, Bedrohungen und Risiken zu analysieren und mögliche Schäden im Falle eines erfolgreichen Cyber-Angriffs abzuschätzen sowie Maßnahmen zu ergreifen, die in einem ausreichenden Maße vor den Schäden schützen. Für die Bedrohungsanalyse wurde ein sogenanntes Threat Modeling durchgeführt. Damit die zu treffenden Maßnahmen dem tatsächlichen Schutzbedarf entsprechen, erfolgte eine Einstufung in eines von fünf Sicherheitslevels (SL). Durch die Nutzung kryptografischer Zertifikate kann die Identität von Teilnehmern sichergestellt werden; ebenso dienen sie zum verschlüsselten Datenaustausch und gewährleisten die Authentizität von Daten. Zusätzlich sorgt das Rollen- und Rechte management für eine eindeutige Zuordnung von Verantwortlichkeiten und schützt vor unberechtigten Zugriffen. Durch das Life Cycle Management wird sichergestellt, dass die Sicherheitsstandards über den gesamten Lebenszyklus der Plattformen und der Services aufrechterhalten werden.

5.1.1 Threat Model

Für die Durchführung des Threat Modeling der Energiesynchronisationsplattform wurde die STRIDE-Methodik gewählt (Kohnfelder und Garg, 1999; Shostack, 2014). STRIDE steht für die folgenden sechs möglichen Angriffsarten:

- **Spoofing:** Vortäuschen einer fremden Identität
- **Tampering:** Manipulation von Daten
- **Repudiation:** Leugnung einer Handlung
- **Information Disclosure:** Einsicht in Informationen durch unautorisierte Dritte
- **Denial of Service:** Herbeigeführter Ausfall einer Funktion der Software
- **Elevation of Privilege:** Überwinden von Zugriffsbeschränkungen, um unautorisierte Handlungen durchzuführen

Als Ergebnis der durchgeführten Analysen zeigte sich, dass unter anderem die Integrität und Authentizität der Nachrichten innerhalb der Unternehmensplattform noch nicht auf dem ganzen Kommunikationsweg gesichert ist. Derzeit ist die Integrität und Vertraulichkeit der Kommunikation zwischen einem Service und dem Manufacturing Service Bus (MSB) über Transport Layer Security gesichert. Dies bedeutet aber nicht, dass damit auch die Kommunikation zwischen zwei Services sicher ist, obwohl beide Services über den MSB kommunizieren. Eine Designentscheidung der Unternehmensplattform ist es, dass die Vertraulichkeit der Nachrichten vom MSB gebrochen wird. Der Grund dafür sind die Funktionen des MSB wie die Transformation von Datenformaten, das inhaltsbasierte Routing und das Extrahieren von Inhalten aus Nachrichten. Für diese Funktionen muss der MSB den Inhalt der Nachrichten lesen können, und daher wäre eine Verschlüsselung kontraproduktiv. Zudem kann die Integrität der Nachrichten nicht gewährleistet werden, weil der MSB selbst Nachrichten manipulieren kann und für die bereits erwähnte Transformation dies auch muss. Zusätzlich ist es auch möglich, dass ein Service eine Nachricht mit einem falschen Urheber an den MSB sendet. Derzeit erfolgt die Autorisierung innerhalb der Unternehmensplattform ausschließlich durch den MSB; dadurch wird der MSB zum Single Point of Failure.

Für die Marktplattform und die darüber angebotenen Services ergab das Threat Modeling die folgenden wesentlichen Ergebnisse: Die Umstellung der Architektur der Marktplattform zu einem Service-Broker, der den Kontakt vermittelt, trägt zur Verringerung der Angriffsfläche bei. Lediglich die Registrierung, die Suche nach Services und die Kontaktvermittlung zwischen Unternehmen und Service müssen abgesichert werden. Hinzukommt, dass ein Ausfall der Marktplattform nicht zu einem Ausfall aller über sie angebotenen Service führt. Dafür sind diese Services verpflichtet, selbst eine Authentifizierung, Autorisierung und die Absicherung des Kommunikationskanals durchzuführen.

Als ESP-übergreifende Erkenntnisse können folgende Punkte festgehalten werden: Bei der Mehrheit der Services der Unternehmensplattform und der Marktplattform existierte noch kein oder kein ausreichendes Logging-Konzept. Zur Erhöhung der Funktionssicherheit muss bei den Services noch eine Datenvalidierung erfolgen, und die Integration der Services kann noch verbessert werden.

5.1.2 Sicherheitslevel

Für die Einstufung in den passenden Sicherheitslevel ist der Schutzbedarf der Informationen festzulegen, die eine Komponente verarbeitet, sowie das Risiko eines Angriffs auf die Komponente zu ermitteln. Als Bewertungskriterium für den Schutzbedarf der Daten dient die Einschätzung des möglichen Schadens im Falle eines erfolgreichen Angriffs, der den Verlust der Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit zufolge hat. Die abgestuften Sicherheitslevel (SL 0 bis SL 4) stellen mit zunehmendem Sicherheitslevel höher werdende Anforderungen an die zu ergreifenden IT-Sicherheitsmaßnahmen. Dabei wird der Angreifertypus in die Betrachtungen einbezogen (geringste Fähigkeiten bis zu staatlichen Organisationen) und ebenso die notwendigen Maßnahmen, die dem tatsächlichen Schutzbedarf der Daten entsprechen. Eine detaillierte Übersicht zu den Sicherheitslevels ist Ronge et al. (2021) zu entnehmen.

Für die Komponenten der Unternehmensplattform gilt, dass meist der Verfügbarkeit sowie der Integrität von Daten die höchste Priorität zugemessen wird. Werden für die Optimierung der Energieflexibilität Auftragsdaten oder Produktionsdaten benötigt und diese über den MSB zwischen Services ausgetauscht, resultieren hieraus ggf. zusätzliche Anforderungen an den Schutz der Vertraulichkeit dieser Daten. Gleiches gilt für den Datenaustausch, der über den MIBS zwischen externen Services und lokalen Services erfolgt. Durch Filterung und Anonymisierung an der Datenquelle kann hierbei oft ein zu hoher Sicherheitslevel vermieden werden.

In der Phase der Erstellung von Flexibilitätsinseraten ist ein hoher Schutz gegen Manipulation gefordert. Bei der Umsetzung einer gebuchten Flexibilität kommen hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit hinzu, damit diese auch tatsächlich umgesetzt wird.

Aus Sicht der Netzbetreiber (Stromnetze) steigen mit der Höhe der angebotenen und vermarkteten Leistung die Anforderungen. Sie finden ihr Maximum, wenn ein System als KRITIS gilt. Aus Unternehmenssicht steht hingegen zumeist die Einhaltung von Produktionszielen (u. a. Einhaltung von Lieferterminen) im Vordergrund. Der niedrigste Sicherheitslevel, der beim Einsatz in KRITIS gewählt werden kann, ist SL3. Für die Kernkomponenten der Unternehmensplattform und der Marktplattform zeigte die Analyse, dass auch ohne Einordnung als KRITIS meist eine Einstufung in SL 3 erfolgte, während für andere Services häufiger auch niedrigere Sicherheitslevel ausreichend sind (*Tabelle 3* und *Tabelle 4*).

Tab. 3 Sicherheitslevel von Kernkomponenten und ausgewählten Services der Unternehmensplattform

Komponente oder Services der Unternehmensplattform	Art	Sicherheitslevel
Platform Services	Kernkomponente	SL 3
Vermarktungskomponente	Kernkomponente	SL 3
Manufacturing Service Bus (MSB-Middleware, IaaS-Interface)	Kernkomponente	SL 3
Smarter Konnektor (SK)	Kernkomponente	SL 3 (ggf. SL 4, wenn höchste Verfügbarkeit gefordert)
Energieflexibilitätsmanagementservice (EFMS)	Kernkomponente	SL 3
Marktinformationsbeschaffungsservice (MIBS)	Kernkomponente	SL 2 (nur Marktinformationen) SL 3 (beliebige Dienste)
Merge-Service	Service	SL 2
Diverse Optimierungsservices	Service	SL 2 bis SL 3

Tab. 4 Sicherheitslevel der Marktplattform an sich und von ausgewählten, an die Marktplattform angebundenen Services

Komponenten der Marktplattform oder externe Services	Art	Sicherheitslevel
Marktplattform	Kernkomponente	SL 3
Aggregator-Flexibilitätshandel	Service	SL 3
Lokaler Flexibilitätshandel	Service	SL 3
Flexibilitätsplanungstool (Flex-Tool)	Service	SL 2
Prognosedienste für Märkte und Netze	Service	SL 2

5.1.3 Nutzung von kryptografischen Zertifikaten

Die Energiesynchronisationsplattform hat eine eigene Public Key Infrastructure (PKI). Die zentrale Zertifizierungsstelle (Certificate Authority, CA) der PKI wird auf der MP betrieben. Die PKI beinhaltet ein sogenanntes Wurzelzertifikat, welches den Vertrauensanker für die gesamte PKI bildet. Direkt unter dem Wurzelzertifikat befinden sich zwei Zwischenzertifikate. Mit dem einen Zwischenzertifikat stellt die CA weitere Zwischenzertifikate für die an der ESP teilnehmenden energieflexiblen Industrieunternehmen aus. Mit dem zweiten Zwischenzertifikat unter dem Wurzelzertifikat stellt die CA wiederum Zwischenzertifikate für die auf der Marktplattform registrierten Services aus.

Sowohl die Unternehmen als auch die marktplattformseitigen Services können mit ihren Zwischenzertifikaten eine eigene CA betreiben und damit Subsysteme und Zugriffskonten in der Energiesynchronisationsplattform mit Zertifikaten versorgen. So können beispielsweise Komponenten der Unternehmensplattform die Zertifikate nutzen, um EFDM-Objekte zu signieren, oder Nutzer, um sich beim lokalen Flexibilitätshandel mit Zertifikaten zu authentifizieren.

Der Aufbau der PKI ist in *Abbildung 8* illustriert. Gezeigt werden auch die Zertifikate der sogenannten Online Certificate Status Protocol Responder (OCSP-Responder) auf Seiten der Marktplattform, womit die OCSP-Funktionalität zum Prüfen des Widerrufsstatus von Zertifikaten umgesetzt wird.

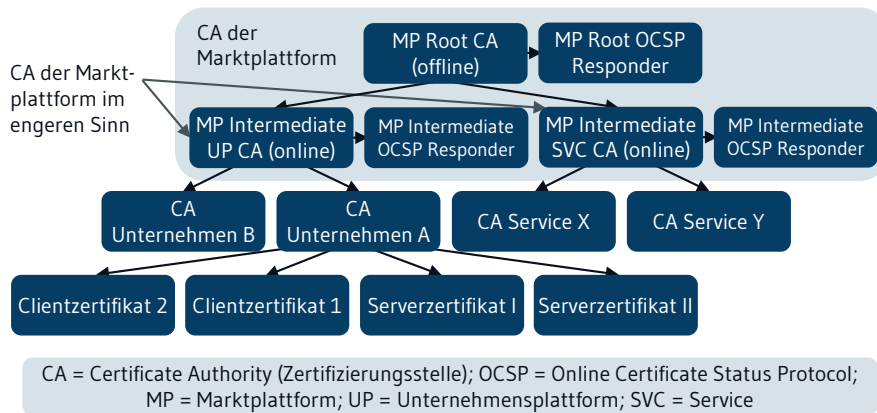


Abb. 8 Aufbau der SynErgie-PKI

5.1.4 Rollendefinitionen und Rechtemanagement

Ein weiteres Sicherheitsmerkmal der Energiesynchronisationsplattform ist die Umsetzungen eines geeigneten Rechte- und Zugriffsmanagements. Für die ESP und ihre Teilplattformen wurde ein rollenbasiertes Rechtekonzept gewählt. Basis eines rollenbasierten Rechtekonzepts ist die Definition von Rollen, denen ganz spezifische Aufgaben übertragen und die für die Aufgaben erforderlichen Rechte eingeräumt werden. Je granularer die Definition der Rollen erfolgt, desto übersichtlicher ist die Vergabe der notwendigen Rechte. Die Besetzung einer Rolle erfolgt durch die Zuweisung der Rolle zu einer Stelle, also einem Mitarbeiter. Ein Rollenkonzept ermöglicht, dass ein Mitarbeiter mehrere Rollen in einem Unternehmen übernimmt. Ebenso kann eine Rolle aber auch mehreren Mitarbeitern zugeordnet werden.

Bei kritischen Infrastrukturen ist die Besetzung von Rollen an Bedingungen geknüpft. Hier sind die Anforderungen aus dem internationalen Standard ISO/IEC 27001 Anhang A (27001:2017) zu beachten, die sich speziell mit dem Thema der Sicherheitsüberprüfungen und Beurteilung der Befähigung bei der Vergabe und Besetzung von Rollen beschäftigen.

Für die Beschreibung der erforderlichen Rollen im Rahmen des Deployments und des Betriebs der Plattformen werden diese in sechs Kategorien unterteilt: Infrastrukturbetreiber, Plattformbetreiber, Administratoren, Nutzer, IT-Sicherheitsteam und Incident Team.

5.1.5 Security Life Cycle Management

Die Services von Unternehmens- und Marktplattform unterliegen, wie jedes andere Produkt auch, einem Lebenszyklus. Dieser beginnt bei der ersten Idee, erstreckt sich über die Entwicklung und den Betrieb und endet mit der Außerbetriebnahme bzw. mit der Deinstallation des Service. Jede einzelne Phase im Lebenszyklus eines Service oder einer Komponente muss hierbei Beachtung finden (Abbildung 9). Das Security Life Cycle Management (S-LCM) legt für jede Lebensphase eines Service der Energiesynchronisationsplattform Anforderungen fest und definiert Maßnahmen, die in der jeweiligen Lebensphase umzusetzen sind. Damit das erforderliche Sicherheitsniveau angemessen bleibt, ist eine kontinuierliche Überprüfung erforderlich. Ändern sich beispielsweise Funktionen eines Service, Angriffsrisiken oder gesetzliche Rahmenbedingungen, so kann dies eine Änderung des erforderlichen Sicherheitslevels für die Services erfordern oder auch Anpassungen der definierten Maßnahmen innerhalb des Sicherheitslevels.



Abb. 9 Lebensphasen im Lebenszyklus eines Service

5.2 Umsetzungsmaßnahmen

Aus den Sicherheitslevels und dem Threat Modeling leiten sich umfangreiche IT-Sicherheitsanforderungen an die Energiesynchronisationsplattform ab. Diese führen durch das Ergreifen geeigneter Maßnahmen zu einer Reduzierung des Risikos, Opfer einer Cyber-Attacke zu werden. Bei der Durchführung der Workshops zum Threat Modeling und der Bestimmung der Sicherheitslevel zeigten sich mögliche Schwachstellen, die durch nachfolgend beschriebene, serviceübergreifende Umsetzungsmaßnahmen adressiert werden können.

5.2.1 Filterung der Daten an der Datenquelle – Vererbung von Anforderungen

Die Daten sollten – sofern dies möglich ist – bereits an der Datenquelle dem Need-to-Know-Prinzip entsprechend gefiltert, abstrahiert oder redigiert werden, damit die Anforderungen an die Vertraulichkeit und dementsprechend die erforderlichen Maßnahmen überschaubar und handhabbar bleiben. Ansonsten könnte eine Ende-zu-Ende-Verschlüsselung von Daten erforderlich sein, was durch die brokerbasierte Kommunikation über den MSB (*Kapitel 5.1.1*) erschwert wird.

5.2.2 Nutzerauthentifizierung über einen zentralen SSO-Service mit der Möglichkeit zur Anbindung an existierende Benutzerverwaltungssysteme

Viele Services müssen Benutzer authentifizieren. Um die Angriffsfläche zu verkleinern, ist es ratsam, die Authentifizierung auf einen Single-sign-on-Service auszulagern (SSO-Service). Dadurch werden sensible Daten wie Passwörter an wenigen Orten gespeichert. Zudem wird die Außerbetriebnahme von Nutzerkonten erleichtert und der Entwicklungsaufwand des Service verringert.

5.2.3 Zentrales Logging in der Unternehmensplattform und einheitliches Format für Log-Nachrichten

Zu einer erfolgreichen Sicherheitsstrategie gehört neben der Reduktion der Risiken, der Minimierung des potenziellen Schadens und der Aufwandserhöhung für den Angreifer auch die Erkennung und Protokollierung eines Angriffs. Nur wenn man einen Angriff erkennt, ist man in der Lage, aktiv dagegen vorzugehen; und nur wenn man einen Angriff nachvollziehen kann, kann man ihn in der Zukunft verhindern. Die Sammlung und Analyse wird in einem Unternehmen idealerweise zentral von der IT verwaltet. Log-Nachrichten werden dazu von einem Security Information and Event Management (SIEM) gesammelt und von einem Intrusion Detection System (IDS) oder einem Intrusion-Prevention-System (IPS) verarbeitet. Diese Systeme benötigen daher auch die sicherheitsrelevanten Ereignisse aus der Unternehmensplattform, um ihre Aufgaben zu erledigen.

Innerhalb der Unternehmensplattform muss ein zentraler Log-Server vorgesehen werden, damit die Anbindung der Plattform an die Unternehmens-IT leichter vonstattengeht. Für die Log-Nachrichten muss ein einheitliches Format definiert werden. Dieses dient der Übersichtlichkeit und erleichtert eine automatisierte Auswertung und Analyse von Einträgen durch SIEM, IDS und IPS.

5.2.4 Bessere Unterstützung für ein automatisiertes Deployment

Viele Services auf der Unternehmensplattform bieten eine Web-Schnittstelle in Form einer grafischen Benutzeroberfläche an, mit welcher der Service im laufenden Betrieb neu konfiguriert werden kann. Dies verursacht zwei Probleme: Zum einen muss eine solche Web-Schnittstelle von einem Menschen

bedient werden und kann nicht ohne Weiteres automatisiert werden. Zum anderen benötigt diese Web-Schnittstelle eine Authentifizierung und Autorisierung, welche innerhalb des Service umgesetzt werden muss.

Es ist daher empfehlenswert, stattdessen eine Konfigurationsdatei zu verwenden, die durch die Authentifizierung und Autorisierung des Betriebssystems geschützt werden kann. Eine Konfigurationsdatei lässt sich auch einfacher in Continuous Integration / Continuous Delivery Pipelines (CI/CD-Pipelines) verwenden.

5.2.5 Signieren der EFDM-Nachrichten

Innerhalb der Unternehmensplattform werden Informationen zwischen Services über den MSB ausgetauscht. Somit besteht kein Ende-zu-Ende gesicherter Kanal zwischen den involvierten Services. Geschützt ist hier nur die Kommunikation zwischen dem jeweiligen Service und dem MSB. Zudem ist der Ursprung einer Nachricht für einen empfangenden Service nicht überprüfbar. Viele Services vertrauen jedoch darauf, dass der MSB nur Informationen und Nachrichten übermittelt, die von bestimmten Services kommen. Dabei ist aber nicht ausgeschlossen, dass der MSB als »Confused Deputy« handelt (siehe Hardy, 1988 für Details). Um das Problem abzumildern, müssen Nachrichten, die über den MSB versandt werden, vom Sender signiert werden und die Empfänger müssen diese Signatur überprüfen.

5.2.6 Testdaten für das Energieflexibilitätsdatenmodell

Für die Übertragung von EFDM-Objekten wird das Energieflexibilitätsdatenmodell in das JSON-Format serialisiert. Allerdings hat der JSON-Standard Unklarheiten, die zum Sicherheitsproblem werden können. Um dem zuvorzukommen, sollte eine Datenbasis an validen und nicht validen Testdaten für das Energieflexibilitätsdatenmodell erstellt werden. Mit diesen Testdaten können dann alle Services, die EFDM-Objekte empfangen, auf deren Konformität mit der EFDM-Spezifikation und auf Robustheit im Umgang mit dem JSON-Format überprüft werden.

5.2.7 Kapselung auf Netzwerk- und Anwendungsebene

Umfangreiche IT-Infrastrukturen erfordern eine fortschrittliche Strategie für die Netzwerksicherheit. Dabei ist es nicht ausreichend, das gesamte Netzwerk mit einer Firewall nach außen abzugrenzen. Vielmehr sollte das interne Netzwerk in kleine, logische Einheiten segmentiert sein, und alle diese Einheiten sollten mit Netzwerksicherheitsmaßnahmen voneinander gekapselt werden. Dies verhindert, dass ein Angreifer, der an einer Stelle in das Firmennetz eingedrungen ist, sich ungestört weiträumig im Netzwerk bewegen und weitere Systeme infiltrieren kann. Zudem hat die äußere Firewall eines Unternehmens in der heutigen vernetzten Welt viele Öffnungen, sodass die äußere Angriffsfläche groß und unübersichtlich ist. Durch geeignete Segmentierung kann man hier zu übersichtlichen, geschützten Bereichen gelangen.

Für die Einbettung der Unternehmensplattform in eine Unternehmensinfrastruktur bedeutet dies, dass die Plattform in einem eigenständigen, geschützten Netzwerksegment oder in einer geschützten Cloud-Umgebung betrieben werden sollte. Verbindungen mit anderen, ebenfalls gekapselten Bereichen wie dem Büronetz oder dem Produktionsnetz sind somit nur über explizit freigegebene und geschützte Zugriffswege möglich.

Ebenso ist es zu vermeiden, dass beliebige Komponenten der Unternehmensplattform Verbindungen mit Systemen außerhalb haben können. Stattdessen sind hierfür in der Architektur der Unternehmensplattform dedizierte Konnektoren sowie der MIBS und die Vermarktungskomponente vorgesehen (*Kapitel 2*). Weiterhin sollten die einzelnen Services innerhalb der Unternehmensplattform voneinander gekapselt sein, d. h. nur über definierte Schnittstellen zugänglich sein, Eingangsdaten bzgl. Format, Struktur und Inhalt validieren sowie für die eigene Datenhaltung private Ablageorte haben, die gegen den Zugriff anderer Services geschützt sind.

6 Demonstratoren

Autoren: Schlereth · Kalchschmid · Lindner · Kaymakci · Schimmelpfennig · Schulz, J.

Zur Validierung der entwickelten Konzepte und Lösungen sowie der technischen Machbarkeit des automatisierten und standardisierten Energieflexibilitätshandels werden Unternehmens- und Marktplattform sowohl im Forschungsumfeld als auch im industriellen Umfeld erprobt. Darüber hinaus wird die Energiesynchronisationsplattform in Form einer Demonstrationsplattform mit innovativen, regionalen Marktmechanismen in einem konzeptionellen Testbetrieb in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg unter Beteiligung der ansässigen Unternehmen und Netzbetreiber getestet (*Kapitel A.3*). Im Folgenden werden die Demonstratoren und die zentralen Erkenntnisse vorgestellt. Die Demonstratoren decken entweder branchenübergreifende Anwendungsfälle ab, oder sie sind branchenspezifisch.

6.1 Übersicht der Demonstratoren

6.1.1 Nutzung von inhärenten Speichern und bivalenten Verbrauchern in der gesamtkostenbasierten Produktionssteuerung

Anhand eines Anwendungsfalls im Forschungsumfeld wird demonstriert, wie bivalente Verbraucher und inhärente Speicher in Produktionssystemen berücksichtigt und gezielt genutzt und so in der Produktionsplanung und -steuerung sinnvoll eingesetzt werden können. Zum Nachweis der dadurch erzielbaren Vorteile wird ihre Nutzung durch Anwendung des Unternehmensplattform-Service »Gesamtkostenbasierte Produktionssteuerung« ökonomisch bewertet.

6.1.2 Pooling und Optimierung von Produktionsinfrastruktur

Ein weiterer Demonstrator im Forschungsumfeld illustriert, wie Anlagen durch einen gemeinsam optimierten Betrieb in der Produktionsinfrastruktur flexibler und kosteneffizienter zum Einsatz kommen können. Des Weiteren wird aufgezeigt, wie verschiedene Services der Unternehmensplattform miteinander interagieren, um durch einen optimierten Anlagenbetrieb das größtmögliche Potenzial zur Einsparung von Energiekosten zu realisieren.

6.1.3 Regelkreis einer Aluminiumelektrolyse mit dem Flexibilitätseinsatzplanungstool

Der industrielle Demonstrator veranschaulicht anhand eines Anwendungsfalls der TRIMET Aluminium SE das Zusammenspiel zwischen Unternehmens- und Marktplattform und verdeutlicht dabei die sich ergebenden Vorteile im Zusammenspiel mit dem Flexibilitätseinsatzplanungstool. Das Flexibilitätseinsatzplanungstool unterstützt Unternehmen dabei, den optimalen Zeitpunkt und Energiemarkt für den Einsatz ihrer Energieflexibilität zu finden. So können die wirtschaftlichen Erlösmöglichkeiten bei der Energieflexibilitätsvermarktung erhöht werden. Das Ergebnis wird an die Unternehmensplattform zurückgespielt und visualisiert. Seitens TRIMET kommt hierbei das System »Flexys« zum Einsatz. Eine detailliertere Vorstellung erfolgt in *Kapitel B.1*.

6.1.4 Intelligente Betriebsführung eines Schmelzofen-Verbunds

Der industrielle Demonstrator der intelligenten Betriebsführung eines Schmelzofenverbunds soll die energieflexible, optimale Fahrweise der elektrischen Heizelemente ein oder mehrerer bivalenter Öfen darstellen. Dabei werden durch Services auf der Unternehmensplattform die Lastkurve der Öfen optimiert, Energieflexibilitäten identifiziert und Energieflexibilitätsdatenmodelle bereitgestellt.

6.1.5 Anbindung existierender IoT-Plattformen an die ESP

In der Praxis finden industrielle IoT-Plattformen zunehmend Anwendung. Die damit in Unternehmen bereits vorhandene Konnektivität zu Maschinen und Anlagen kann für eine schnelle Anbindung an die Energiesynchronisationsplattform (ESP) genutzt werden. Dies wird in einem Demonstrator im Forschungsumfeld exemplarisch veranschaulicht.

6.1.6 Konzeptioneller Testbetrieb in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg

Im konzeptionellen Testbetrieb der Energieflexiblen Modellregion Augsburg wird die Energiesynchronisationsplattform im regionalen Kontext unter Einbezug aller relevanten Stakeholder erprobt. Instanzen der Unternehmensplattform werden bei den energieflexiblen Fabriken implementiert, damit diese über die Marktplattform auf unterschiedliche Services zugreifen können, etwa den

lokalen Flexibilitätshandel. Verteilnetzbetreiber haben ebenfalls Zugang zur Marktplattform und die darauf angebotenen Services, um das industrielle Nachfrageflexibilitätsangebot zur regionalen Netzstabilisierung zu testen.

6.2 Wichtigste Erkenntnisse

Eine kontinuierliche Absprache zwischen den Unternehmen und den Anbietern von Services ist unverzichtbar, um frühzeitig kritische Abhängigkeiten und Herausforderungen erkennen zu können. Zudem ist umfassendes (branchenspezifisches) Know-how und eine detaillierte physikalische Beschreibung der Prozesse erforderlich, um die Demonstration erfolgreich durchzuführen. Auch ist das kollektive Ausfüllen des Energieflexibilitätsdatenmodells sehr wichtig, um ein gemeinsames Verständnis von den betroffenen Prozessen zu entwickeln. Die Implementierung der Unternehmensplattform ist je nach Anwendungsfall mit unterschiedlichen Aufwänden verbunden, die sich durch die in den Unternehmen bestehenden Anlagen, Produktionsprozesse und IT-Systeme sowie die gehobenen Energieflexibilitätspotenziale ergeben.

Die Demonstratoren zeigen, dass die meisten Flexibilisierungsprojekte bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) auch Digitalisierungsprojekte sind, da oftmals die Verarbeitung von Daten aus der Produktion im Vordergrund steht und bislang nicht durchgängig umgesetzt ist.

Trotz dieser Herausforderungen ergeben sich aus der Nutzung der Energiesynchronisationsplattform vielfältige Chancen. Sie ermöglicht durch eine breite Aufstellung an Services und Komponenten die Behandlung und übergreifende Optimierung verschiedenster produktions- und energietechnischer Problemstellungen. Eine rein unternehmensplattformspezifische Optimierung (Pooling und Optimierung von Produktionsinfrastruktur) ist dabei ebenso möglich wie die energiewirtschaftliche Optimierung durch die Kombination aus UP und MP (Regelkreis bei TRIMET). Neben den existierenden Lösungen veranschaulichen die Demonstratoren beispielhaft, wie andere (IoT-)Plattformen angebunden werden können oder der konzeptionelle lokale Flexibilitätshandel in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg Anwendung findet. Die Beispiele zeigen die vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten der Energiesynchronisationsplattform hinsichtlich externer Systeme und Flexibilitätsnutzer.

7 Fazit und Ausblick

Autoren: Schlereth · Bauer · Bauernhansl

Die in Bauernhansl et al. (2019) entwickelte Konzeption der Energiesynchronisationsplattform konnte verbessert und um relevante Services und Komponenten erweitert werden. Damit ist das Ziel, die Nutzung industrieller Energieflexibilität zu automatisieren und die Kommunikation zu standardisieren, einen Schritt näher gerückt. Die Betrachtungsweisen beider Plattformen sind dabei unterschiedlich: Die Marktplattform fungiert einerseits als Vermittler zwischen Industrieunternehmen und Serviceanbietern und umfasst andererseits auch eigene Services, um beispielsweise den Flexibilitätseinsatz zu optimieren. Demgegenüber umfasst die Unternehmensplattform eigens entwickelte Services zur Erfassung, Optimierung und Nutzung von Energieflexibilitäten.

Durch das Vorgehensmodell TOGAF konnten die Prozesse der Energiesynchronisationsplattform in unterschiedlichen Granularitäten entwickelt und modelliert werden. Das entwickelte Energieflexibilitätsdatenmodell ermöglicht einen standardisierten Austausch von Informationen zu Energieflexibilität in einem generischen Format und ermöglicht in seiner aktuellen Version eine umfassende Modellierung durch eine Aufteilung in vier verschiedene Klassen. Bezüglich der IT-Sicherheit konnten umfassende Threat Models sowie Rollen- und Rechtedefinitionen für die Softwarekomponenten erstellt werden. Aus den Threat Models sowie den zuvor definierten Sicherheitslevels konnten zudem umfangreiche Anforderungen an die IT-Sicherheit abgeleitet werden. Die Ergebnisse wurden in Demonstratoren erprobt. Neben allgemeinen Anwendungsfällen im Forschungsumfeld konnte die Energiesynchronisationsplattform auch bei industriellen Partnern erfolgreich eingesetzt werden.

Für die Zukunft ergibt sich weiterer Forschungsbedarf. So stehen die Implementierung sowie Validierung der Unternehmensplattform und marktseitigen Services in der Praxis sowie die Standardisierung der Energiesynchronisationsplattform und des Energieflexibilitätsdatenmodells im Fokus. Die Erarbeitung eines Teilmodells für die Verwaltungsschale auf Basis des Energieflexibilitätsdatenmodells und seine Standardisierung wird angestrebt, und die Umsetzung in weiteren IoT-Plattformen ist geplant. Hinsichtlich der Optimierung sollten weitere algorithmische Ansätze untersucht und verbessert werden.

8 Literatur

BAUER, D., E. ABELE, R. AHRENS, T. BAUERNHANS, G. FRIDGEN, M. JARKE, F. KELLER, R. KELLER, J. PULLMANN, R. REINERS, G. REINHART, D. SCHEL, M. SCHÖPF, P. SCHRAML und P. SIMON, 2017. Flexible IT-platform to Synchronize Energy Demands with Volatile Markets [online]. *Procedia CIRP*, 63, 318–323. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2017.03.088

BAUERNHANS, T., D. BAUER, E. ABERLE, R. AHRENS, L. BANK, M. BRUGGER, E. COLANGELO, H. EIGENBROD, G. FRIDGEN, V.F. GONZALEZ, A. GRIGORJAN, JARKE, M., R. KELLER, R. LODWIG, J. PULLMANN, REINHART, G., M. RÖSCH, A. SAUER, D. SCHEL, A. SCHLERETH, P. SCHOTT, F. SCHULZ, J. SEDLMEIR, P. SEITZ, P. SIMON und T. WEBER, 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. ISBN 9783839614792.

BDEW, 2019. B3S Aggregatoren [online] [Zugriff am: 17. September 2020]. Verfügbar unter: https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20190301_B3S-fuer-Anlagen-zur-Steuerung-und-Buendelung-elektrischer-Leistung.pdf

BSI – BUNDESAMT FÜR SICHERHEIT IN DER INFORMATIONSTECHNIK, 2021. BSI-Kritisverordnung [online] [Zugriff am: 10. März 2022]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/bsi-kritisv/BSI-KritisV.pdf>

BUHL, H.U., S. DUDA, P. SCHOTT, M. WEIBELZAHN, S. WENNINGER, G. FRIDGEN, S.P. MENCI, M. SCHÖPF, C. VAN STIPHOUDT, M. WEIGOLD und M. LINDNER, 2021. Das Energieflexibilitätsdatenmodell der Energiesynchronisationsplattform [online]. Verfügbar unter: doi.org/10.24406/IGCV-N-642370

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. 27001:2017, DIN EN ISO/IEC 27001:2017.

HARDY, N., 1988. The Confused Deputy: (or why capabilities might have been invented). ACM SIGOPS Operating Systems Review, 22(4), 36–38. ACM SIGOPS Operating Systems Review.

KOHNFELDER, L. und P. GARG, 1999. The threats to our products. Microsoft Interface, Microsoft Corporation, 33. Microsoft Interface, Microsoft Corporation.

KOPERNIKUS-PROJEKT SYNERGIE, 2021a. E-Flex Scanner [online]. 26. April 2021 [Zugriff am: 21. November 2021]. Verfügbar unter: <https://synergie-projekt.de/ergebnis/e-flex-scanner>

KOPERNIKUS-PROJEKT SYNERGIE, 2021b. Energieflexibilitätsaudit [online]. 13. September 2021 [Zugriff am: 21. November 2021]. Verfügbar unter: <https://synergie-projekt.de/ergebnis/eflexaudit>

LÜBBECKE, M., A. KOSTER, P. LETMATHE, R. MADLENER, B. PEIS und G. WALTHER, 2016. Operations Research Proceedings 2014. Cham: Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-28695-2.

MAIER, F., H. BELHASSAN, N. KLEMPF, F. KOETTER, E. SIEHLER, D. STETTER und A. WOHLFROM, 2017. Decision Support for Structured Energy Procurement. In: Proceedings of the 6th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems: SCITEPRESS – Science and Technology Publications, S. 77–86. ISBN 978-989-758-241-7.

MCGOVERN, J., S. TYAGI, M.E. STEVENS und S. MATHEW, 2003. Chapter 2 – Service-Oriented Architecture [online]. In: J. McGovern, S. Tyagi, M.E. Stevens und S. Mathew, Hg. Java Web Services Architecture. San Francisco: Morgan Kaufmann, S. 35–63. ISBN 978-1-55860-900-6.

MENCI, S.P., G. FRIDGEN, C. VAN STIPHOUDT, J. SCHILP, J. KÖBERLEIN, T. BAUERNHANS, A. SAUER, A. GRIGORJAN, D. SCHEL, A. SCHLERETH, F. SCHULZ, M. WEIGOLD, M. LINDNER, J. SCHIMMELPFENNIG und C. WINTER, 2021. Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform [online]. Verfügbar unter: doi.org/10.24406/IGCV-N-642369

ROESCH, M., D. BAUER, L. HAUPT, R. KELLER, T. BAUERNHANS, G. FRIDGEN, G. REINHART und A. SAUER, 2019. Harnessing the Full Potential of Industrial Demand-Side Flexibility: An End-to-End Approach Connecting Machines with Markets through Service-Oriented IT Platforms [online]. Applied Sciences, 9(18), 3796. Applied Sciences. Verfügbar unter: [doi:10.3390/app9183796](https://doi.org/10.3390/app9183796)

RONGE, K., A. OEDER, J. SCHIMMELPFENNIG, C. WINTER und R. AHRENS, 2021. IT-Sicherheit für die Energiesynchronisationsplattform [online]. Verfügbar unter: doi.org/10.24406/IGCV-N-642372

SCHEL, D., D. BAUER, F.G. VASQUEZ, F. SCHULZ und T. BAUERNHANS, 2018. IT Platform for Energy Demand Synchronization Among Manufacturing Companies [online]. Procedia CIRP, 72, 826–831. ISSN 22128271. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.procir.2018.03.237](https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.237)

SCHILP, J., L. BANK, J. KÖBERLEIN, T. BAUERNHANS, A. SAUER, C. KAYMAKCI, H. EIGENBROD, G. FRIDGEN, R. BAHMANI, S.P. MENCI, M. SCHÖPF, C. VAN STIPHOUDT, M. WEIGOLD und M. LINDNER, 2021. Optimierung auf der Energiesynchronisationsplattform [online]. Verfügbar unter: doi.org/10.24406/IGCV-N-642371

SCHOTT, P., J. SEDLMEIR, N. STROBEL, T. WEBER, G. FRIDGEN und E. ABELE, 2019. A Generic Data Model for Describing Flexibility in Power Markets [online]. Energies, 12(10), 1893. Energies. Verfügbar unter: [doi:10.3390/en12101893](https://doi.org/10.3390/en12101893)

SCHOTT, P., R. AHRENS, D. BAUER, F. HERING, R. KELLER, J. PULLMANN, D. SCHEL, J. SCHIMMELPFENNIG, P. SIMON, T. WEBER, E. ABELE, T. BAUERNHANS, G. FRIDGEN, M. JARKE und G. REINHART, 2018. Flexible IT platform for synchronizing energy demands with volatile markets [online]. *it – Information Technology*, 60(3), 155–164. ISSN 1611-2776. Verfügbar unter: doi:10.1515/itit-2018-0001

SHOSTACK, A., 2014. *Threat Modeling: Designing for Security*: Wiley Publishing. ISBN 1118809998.

STRBAC, G., 2008. Demand side management: Benefits and challenges [online]. *Energy Policy*, 36(12), 4419–4426. ISSN 03014215. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.enpol.2008.09.030

TSAI, W.T., X. ZHOU, Y. CHEN, B. XIAO, R.A. PAUL und W. CHU, 2007. Roadmap to a Full Service Broker in Service-Oriented Architecture. In: *IEEE International Conference on e-Business Engineering (ICEBE'07)*, S. 657–660.

VDI 5207, Blatt 1: *Energieflexible Fabrik – Grundlagen*. 2020.

VDI 5207, Blatt 2: *Energieflexible Fabrik – Identifikation und technische Bewertung*. 2021.

WENNINGER, S., L. HANNY, G. KERPEDZIEV, C. JOHNSÉN und V. BÜHNER, 2020. Services der Marktplattform. Steckbriefe [online]. Verfügbar unter: <https://synergie-projekt.de/wp-content/uploads/2020/08/Services-Marktplattform.pdf>

Impressum

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP), Universität Stuttgart
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
Telefon +49 711 970 1241
kopernikus-synergie@eep.uni-stuttgart.de
www.kopernikus-projekte.de
www.synergie-projekt.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.de> abrufbar

ISBN (Printausgabe): 978-3-8396-1778-6

DOI (kostenlose PDF-Version): <https://doi.org/10.24406/publica-258>

Koordination: Sara Gail und Lena Hitzenberger

Gestaltung: PTW, TU Darmstadt

Druck und Weiterverarbeitung: Elanders, Waiblingen

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© Fraunhofer Verlag, 2022

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

verlag@fraunhofer.de

www.verlag.fraunhofer.de

als rechtlich nicht selbständige Einheit der

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung

der angewandten Forschung e.V.

Hansastraße 27 c

80686 München

www.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Zum Inhalt

Energie aus erneuerbaren Ressourcen ist nicht immer beliebig verfügbar. Je nach Jahreszeit und Witterung variiert beispielsweise die durch Photovoltaik oder Windkraft zur Verfügung gestellte Leistung. Durch den kontinuierlichen Ausbau der erneuerbaren Energien wird sich die Volatilität im Energiesystem in Zukunft immer stärker ausprägen.

Die Industrie auf die sich ändernden Versorgungsstrukturen vorzubereiten und anzupassen, ist eine große Herausforderung der nächsten Jahre. Unternehmen müssen zukünftig ihre Prozesse und Betriebsorganisation so gestalten können, dass sich der Energieverbrauch zumindest in Teilen flexibel an das volatile Energieangebot anpassen kann – ein Paradigmenwechsel weg vom kontinuierlichen und rein nachfragegetrie-

benen Energieverbrauch hin zum anpassbaren, energieflexiblen Betrieb. Neben der Entwicklung von Technologien, Konzepten und Maßnahmen zur energetischen Flexibilisierung von industriellen Prozessen liegt ein zweiter Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten auf der Entwicklung einer durchgängigen IT-Infrastruktur, mit der Unternehmen und Energieanbieter in Zukunft Energieflexibilität bestmöglich einsetzen können.

Dieses Nachschlagewerk zeigt die Herausforderungen und Rahmenbedingungen von energieflexiblen Fabriken sowie Managementsysteme und Technologien für deren Realisierung. Es baut auf den wichtigsten Ergebnissen der Forschung im Rahmen der zweiten Phase des Kopernikus-Projekts SynErgie auf.



© Fraunhofer IPA/Rainer Bez

Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer

Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP), Universität Stuttgart und Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA



© Björn Seitz-kontender.Fotografie

Prof. Dr. Hans Ulrich Buhl

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



© alexlevay

Prof. Alexander Mitsos, Ph.D.

Aachener Verfahrenstechnik, RWTH Aachen University und IEK-10 (Energy Systems Engineering), Forschungszentrum Jülich



© PTW/S. Scheibner

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold,

Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität Darmstadt

ISBN 978-3-8396-1778-6



9 783839 617786

© Titelbild: Schott AG

Fraunhofer Verlag