

Diskussionspapier

KONZEPT DER ENERGIE- SYNCHRONISATIONS- PLATTFORM

KOPERNIKUS
SynErgie **PROJEKTE**
Die Zukunft unserer Energie

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Konzept der Energiesynchronisationsplattform

Diskussionspapier V3

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

Stand September 2020

DOI: <https://doi.org/10.24406/igcv-n-602416>

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



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

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

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

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de

Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)²

Universitätsstr. 12
86159 Augsburg
www.fim-rc.de

Technische Universität Darmstadt

Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)

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

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS

Nordostpark 84
90411 Nürnberg
www.iis.fraunhofer.de

Software AG

Uhlandstraße 12
64297 Darmstadt
softwareag.com

Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT

Schloss Birlinghoven
53754 Sankt Augustin
www.fit.fraunhofer.de

² Das Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT sind eng mit der Professur für Wirtschaftsingenieurwesen an der Universität Augsburg, der Professur für Digitale Wertschöpfungsnetzes an der Hochschule Augsburg sowie dem Lehrstuhl für Digital Financial Services (SnT – Interdisciplinary Center for Security, Reliability and Trust) an der Universität Luxemburg verknüpft und werden im Rahmen von SynErgie inhaltlich als FIM/FIT zusammengefasst.

AUTOREN

Redaktion:

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

Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Lukas Bank, Martin Brugger, Aljoscha Hieronymus, Jana Köberlein, Stefan Roth

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

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

Dennis Bauer, Can Kaymakci, Daniel Schel, Andreas Schlereth

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

Prof. Dr. Gilbert Fridgen, Prof. Dr. Hans Ulrich Buhl

Caroline Bojung, Paul Schott, Martin Weibelzahl, Simon Wenninger

Technische Universität Darmstadt

Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

Martin Lindner

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS

Karlheinz Ronge

Andreas Oeder

Software AG

Jens Schimmelpfennig

Christian Winter

Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT

Prof. Dr. Matthias Jarke

Raphael Ahrens

VORWORT UND DANKSAGUNG

Das vorliegende Diskussionspapier in der dritten Auflage dokumentiert den Arbeitsstand des Clusters III – Informations- und Kommunikationstechnik im Kopernikus-Projekt SynErgie im September 2020³. Das Diskussionspapier soll zur Abstimmung und Diskussion der Konzepte anregen, deren Ergebnisse wiederum in die Weiterentwicklung dieser Konzepte einfließen.

Die einzelnen Abschnitte des Diskussionspapiers wurden von folgenden Ansprechpartnern koordiniert:

- | | |
|---|---|
| 1 Einleitung | Dennis Bauer, dennis.bauer@ipa.fraunhofer.de |
| 2 Schichten der Energiesynchronisationsplattform | |
| 2.1 Business Layer | Jana Köberlein, jana.koeberlein@igcv.fraunhofer.de |
| 2.2 Functional Layer | Simon Wenninger, simon.wenninger@fim-rc.de |
| 2.3 Process Layer | Jana Köberlein, jana.koeberlein@igcv.fraunhofer.de |
| 2.4 Information Layer | Simon Wenninger, simon.wenninger@fim-rc.de |
| 2.5 Component Layer | Andreas Schlereth, andreas.schlereth@ipa.fraunhofer.de |
| 3 Anwendungsbeispiele | Martin Lindner, m.lindner@ptw.tu-darmstadt.de |
| 4 Perspektiven der Energiesynchronisationsplattform | |
| 4.1 Security | Andreas Oeder, andreas.oeder@iis.fraunhofer.de |
| 4.2 Governance | Aljoscha Hieronymus, aljoscha.hieronymus@igcv.fraunhofer.de |
| 5 Fazit und Ausblick | Dennis Bauer, dennis.bauer@ipa.fraunhofer.de |

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

³ Das Diskussionspapier basiert auf den vorherigen Auflagen sowie insbesondere auch auf Bauernhansl et al. 2019.

Des Weiteren bedanken sich die Autoren bei allen Kolleginnen und Kollegen aus dem SynErgie-Projektconsortium, die mit Ideen und kritischen Anmerkungen zur Entstehung der in diesem Diskussionspapier dargestellten Konzepte beigetragen haben. Insbesondere bedanken sich die Autoren auch bei den an dieser Auflage des Diskussionspapiers nicht mehr beteiligten Autoren der vorherigen Auflagen:

Volker Bühner, Eduardo Colangelo, Hartmut Eigenbrod, Arthur Grigorjan, Fabian Hering, Robert Keller, Benjamin Meyer, Lena Pfeilsticker, Jaroslav Pullmann, Christian Schmidt, Fabian Schulz, Philipp Seitz, Peter Simon und Thomas Weber

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



<https://kopernikus-projekte.de>



<https://synergie-projekt.de>

ZUSAMMENFASSUNG

Einordnung und Motivation

Um den Risiken und Folgen des Klimawandels zu begegnen, ist insbesondere auch die Transformation zu einer nachhaltigen Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien notwendig. Die zunehmende Nutzung von Strom aus erneuerbaren Quellen führt jedoch aufgrund der Wetterabhängigkeit von Wind und Sonne zu einem zunehmend volatileren Stromangebot. Dies stellt eine Herausforderung für die Balance zwischen Stromangebot und -nachfrage im Stromnetz dar. In der Vergangenheit wurden Veränderungen in der Stromnachfrage durch die Steuerung der Stromerzeugung in konventionellen Kraftwerken ausgeglichen. Aufgrund der Prognoseunsicherheit und der wenig beeinflussbaren Natur erneuerbarer Energien stellt dieser Mechanismus auf der Stromerzeugungsseite keine ausreichende Option mehr dar und erhöht den Bedarf an Flexibilität. Um die notwendige Flexibilität im System bereitzustellen, stehen vier Optionen bereit: Flexibilität durch den Ausbau des Stromnetzes, Flexibilität durch Speicherung, Flexibilität durch Sektorenkopplung und Flexibilität durch Nachfrageflexibilität (Demand Response). Da die ersteren durch mangelnde soziale Akzeptanz, hohe Kosten und/oder langsame Fortschritte gekennzeichnet sind, stellt Nachfrageflexibilität eine wettbewerbsfähige Flexibilitätsoption dar. Insbesondere energieintensive Industrieprozesse beinhalten ein hohes Flexibilitätspotenzial, um mittels Demand-Response, diesen Schwankungen zu begegnen.

Das Kopernikus-Projekt SynErgie betrachtet technische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Aspekte industrieller Nachfrageflexibilität und erarbeitet Technologien und Lösungen, um den Energiebedarf der deutschen Industrie effektiv mit dem volatilen Energieangebot zu synchronisieren. Die Informations- und Kommunikationstechnik nimmt hierbei eine Schlüsselrolle zur Verbindung der Produktion und Produktionsinfrastruktur mit dem Markt- und Stromsystem ein. Mit der Energiesynchronisationsplattform wollen die Forscher gemeinsam mit der Industrie ein branchenübergreifendes Plattformökosystem aufbauen, mit welchem der gesamte Prozess des Energieflexibilitätshandels von der Maschine bis zum Energiemarkt automatisiert und standardisiert wird. Der Fokus liegt hier auf Services zur Flexibilisierung der energieintensiven Industrie und der Flexibilitätsvermarktung. Die Energiesynchronisationsplattform sowie die modular darauf aufbauenden Services ermöglichen der Industrie eine aktive Teilnahme mit möglichst niedrigen Eintrittsbarrieren an den Energiemärkten – einerseits durch eine akkuratere und schnellere Bedarfsplanung (Konsumentenrolle), andererseits durch das Anbieten von Energieflexibilitätspotenzial (Anbieterrolle).

Das vorliegende Diskussionspapier in der dritten Auflage dokumentiert den Arbeitsstand des Clusters III – Informations- und Kommunikationstechnik im Kopernikus-Projekt SynErgie im September 2020. Das Diskussionspapier soll zur Abstimmung und Diskussion der Konzepte anregen, deren Ergebnisse wiederum in die Weiterentwicklung dieser Konzepte einfließen. Im Projekt entsteht eine Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform als Rahmen für die Entwicklung von Systemen und Lösungen für den automatisierten Handel von Energieflexibilität. Sie definiert Mindestanforderungen und dient als Basis für die Ableitung konkreter IT-Systemarchitekturen. Sie unterstützt Unternehmen dabei, eine entsprechende unternehmensseitige IT-Architektur zu implementieren und vorhandene Systeme und Anlagen zu integrieren. Auch marktseitig bildet die Referenzarchitektur den erarbeiteten Status quo ab, welcher unter anderem auch Anforderungen für die Teilnahme an der Plattform und Services von Drittanbietern zur

Flexibilitätsbewertung und -vermarktung enthält. In regelmäßigen Abständen wird der aktuelle Status der Entwicklung der Referenzarchitektur im Diskussionspapier dokumentiert.

Das Konzept der Energiesynchronisationsplattform

Bei der Energiesynchronisationsplattform selbst handelt es sich nicht um eine physische Plattform. Sie beschreibt vielmehr als übergeordnetes Konzept die Zusammenarbeit mehrerer Unternehmensplattformen und einer zentralen Marktplattform und bildet den gesamten Prozess des informationstechnisch automatisierten Energieflexibilitätshandels von der Maschine bis zum Energiemarkt ab. Sie umfasst Rahmenbedingungen, Schnittstellen, Datenmodelle, Stakeholder und Sicherheitsaspekte.

Die Unternehmensplattform als ein Teil der Energiesynchronisationsplattform stellt das modulare, serviceorientierte, sichere und nach außen gekapselte informations- und kommunikationstechnische System innerhalb eines Unternehmens dar. Sie ist der Befähiger für Unternehmen zum automatisierten Energieflexibilitätshandel über eine standardisierte Schnittstelle zu auf der Marktplattform verfügbaren Angeboten. Eine Unternehmensplattform bietet in einer service-orientierten IT-Infrastruktur die notwendigen Funktionalitäten für die informationstechnische Anbindung und die Ansteuerung von energieflexiblen Produktionsprozessen und -infrastruktur und somit für die Bereitstellung von Energieflexibilität. In der Unternehmensplattform finden einerseits Aufnahme, Aggregation, Analyse und Optimierung von Prozess- und Produktionsdaten statt sowie andererseits die energiesynchrone Steuerung und Regelung der Systeme, Anlagen und Komponenten. Die Unternehmensplattform ermöglicht damit einen energieflexiblen Ablauf der Produktion.

Demgegenüber steht als Intermediär eine mit allen Unternehmensplattformen über eine uniforme Schnittstelle kommunizierende Marktplattform. Die Marktplattform ist eine Meta-Plattform für den Energieflexibilitätshandel, die es ermöglicht, verschiedene Energieflexibilitätsmärkte und Services mithilfe einer Service-Broker-Architektur anzubinden und zu vermitteln. Sie ermöglicht den Unternehmen so den Zugriff auf eine Vielzahl existierender und zukünftiger Services sowie weitere Plattformen. Damit Unternehmen Flexibilität vermarkten können, werden über die Marktplattform verschiedene Services bereitgestellt und ausgeführt. Diese unterstützen die Unternehmen in verschiedenen Aspekten der Flexibilitätsbereitstellung, der Flexibilitätsbewertung und des Flexibilitätshandels. Hierbei ist hervorzuheben, dass die Marktplattform einen integrierenden Charakter aufweist und somit nicht als Konkurrenz zu bereits bestehenden Lösungen und Märkten zu sehen ist, d.h. sie stellt eine Meta-Plattform dar.

Die Energiesynchronisationsplattform spricht eine Vielzahl an Stakeholdern verschiedener Domänen an und unterstützt diese bei der Interaktion während des automatisierten Energieflexibilitätshandels. Die identifizierten Akteure der Unternehmens- und Marktplattform lassen sich den Bereichen Endkunde bzw. Plattformteilnehmer, Plattformbetreiber und Serviceanbieter zuordnen. Die Energiesynchronisationsplattform unterstützt die Teilnehmer in den Phasen der Markterschließung und Vertragsbindung, der Bedarfserhebung, Planung und Prognose sowie der Abrechnungsphase.

Es ist ein durchgängiges Konzept einschließlich des Daten- und Informationsflusses von der Maschine bis zu den Energiemärkten notwendig um den standardisierten Energieflexibilitätshandel über die Energiesynchronisationsplattform abzubilden. Hierzu wurden die Interaktion, die zwischen Unternehmensplattform und Marktplattform für einen standardisierten Handel von Nachfrageflexibilität notwendig sind, in einer Prozesslandkarte

abgebildet und die Kernprozesse mithilfe der Business Process Modelling Notation (BPMN) dargestellt. Die Prozesslandkarte bildet alle Prozesse ab, welche notwendig sind, um den Bedarf an Flexibilität (Kundenanforderung) durch deren zuverlässige Bereitstellung (Kundenzufriedenheit) zu erfüllen. Einige der Prozesse betreffen einzelne Teilplattformen, also Unternehmensplattform oder Marktplattform, wohingegen sich andere Prozesse über die ganze Energiesynchronisationsplattform erstrecken. Die Kernprozesse der Energiesynchronisationsplattform reichen von der Identifikation der Energieflexibilität über ihre Bewertung bis zu ihrer Erbringung und erfüllen somit das Ziel, Angebot und Nachfrage zu synchronisieren.

Das im Rahmen von SynErgie entwickelte Energieflexibilitätsdatenmodell dient zur generischen und standardisierten Beschreibung sowie Modellierung von Energieflexibilität. Das Datenmodell ermöglicht eine (teil-)automatisierte informationstechnische Verarbeitung unterschiedlichster Flexibilität. Finales Ziel ist es, ein umfassendes Datenmodell zu entwickeln, um Flexibilität in realistischer Komplexität in einem Flexibilitätsraum und konkrete Flexibilitätsmaßnahmen abzubilden. Das Datenmodell ist somit die zentrale Grundlage für alle darauf operierenden Services. Ausgehend davon können Modelle für spezielle Anwendungsfälle, beispielsweise zur Optimierung, abgeleitet werden, die nur einen Teil der Informationen des zentralen Datenmodells beinhalten. Hierbei ist es von großer Bedeutung, dass die abgeleiteten Modelle ineinander überführbar sein müssen. Nur so ist die Interoperabilität der Unternehmensplattform und der Marktplattform gewährleistet.

Zur Validierung der entwickelten Konzepte und Lösungen und der technischen Machbarkeit des automatisierten und standardisierten Energieflexibilitätshandels, werden Unternehmensplattform und Marktplattform im Rahmen von Demonstratoren eingesetzt. Hierzu sind sowohl Demonstratoren im Forschungsumfeld vorgezogen, als auch im industriellen Umfeld. Darüber hinaus wird die Energiesynchronisationsplattform in Form einer Demonstrationsplattform mit innovativen regionalen Marktmechanismen in einem Testbetrieb in der Modellregion Augsburg unter Beteiligung der ansässigen Unternehmen, Netzbetreiber und Lieferanten getestet. Die Demonstratoren werden im vorliegenden Diskussionspapier in Form von Steckbriefen beschrieben.

IT-Sicherheit muss bei allen Konzeptions- und Umsetzungsschritten eines Systems in adäquatem Maß bedacht werden sowie bei allen logischen und physischen Bestandteilen des Systems entsprechend implementiert und im operativen Betrieb aufrechterhalten werden. Eine umfassende Sicherheitsbetrachtung liegt zum jetzigen Zeitpunkt nicht vor, jedoch wird im Projektverlauf kontinuierlich am Prozess der Absicherung der Energiesynchronisationsplattform weitergearbeitet. Die Anforderungen an die IT-Sicherheit der Energiesynchronisationsplattform sind aus zwei Blickwinkeln zu betrachten. Einerseits die Sicherheitsanforderungen, die sich aus dem industriellen Umfeld, also der Produktion, ergeben und andererseits die Anforderungen, welche aus einer potenziellen Einstufung der Energiesynchronisationsplattform oder Teilen davon als Kritische Infrastruktur (KRITIS) resultieren könnten. Es muss in Betracht gezogen werden, dass die Energiesynchronisationsplattform oder zumindest Teile davon als KRITIS einzustufen sind. Dies gilt insbesondere dann, wenn die über die Plattform direkt beeinflussbaren Leistungen bestimmte Grenzen überschreiten. Daher sollte sichergestellt werden, dass die Energiesynchronisationsplattform für den Fall einer entsprechenden Einstufung grundsätzlich die sich daraus ergebenden Anforderungen erfüllen kann.

Zur Entwicklung der Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform werden zwei Umgebungen genutzt. In der Modellierungsumgebung wird unter Nutzung des „The Open Group Architecture Frameworks“ (TOGAF) der jeweils

aktuelle Stand der Referenzarchitektur abgebildet. Alle weiteren Änderungen durchlaufen vor Einpflegen einen Entscheidungsprozess in der Archivierungsumgebung, in welcher sie vom Gremium diskutiert und abgestimmt werden. Alle abgestimmten Änderungsvorhaben werden inklusive Diskussion in einem Architecture Decision Log (ADL) festgehalten, um die Nachvollziehbarkeit und Transparenz des Entwicklungsprozesses zu gewährleisten.

Fazit und Ausblick

Das vorliegende Diskussionspapier beschreibt mit der Referenzarchitektur für die Energiesynchronisationsplattform einen Rahmen für die Entwicklung von Systemen und Lösungen für den automatisierten Handel von Energieflexibilität. Die Referenzarchitektur dient als Basis für die Ableitung konkreter IT-Systemarchitekturen und unterstützt Unternehmen dabei, eine entsprechende Architektur der Unternehmensplattform zu implementieren und vorhandene Systeme und Anlagen zu integrieren. Auf Seiten der Marktplattform bildet die Referenzarchitektur den erarbeiteten Status quo ab, welcher die Integration verschiedener Märkte und Services in der Meta-Plattform aufzeigt.

Das Diskussionspapier soll Sie, liebe Leserinnen und Leser, zur Diskussion der Konzepte anregen, deren Ergebnisse wiederum in die Weiterentwicklung der Referenzarchitektur einfließen können. Auf Basis dieser Diskussionen sollen die Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform mit ihren Konzepten der Unternehmensplattform und Marktplattform weiter verfeinert werden. Querschnittsthemen wie das Energieflexibilitätsdatenmodell oder das Sicherheitskonzept der Plattformen werden weiterhin thematisiert und laufend aktualisiert. Darauf aufbauend wird auch die prototypische Umsetzung der Plattformen und zugehörigen Services anhand der Demonstratoren, insbesondere in der Modellregion Augsburg, weiter vorangetrieben und bis 2022 praktisch evaluiert.

Die daraus generierten Erkenntnisse werden genutzt, um der modularen Energiesynchronisationsplattform perspektivisch weitere Energieträger und Funktionalitäten hinzuzufügen und sie damit zu einem der wichtigsten IT-Werkzeug zur Energiewende weiterzuentwickeln. Die Plattform ermöglicht den teilnehmenden Unternehmen anschließend eine aktive Partizipation am Energiemarkt: einerseits durch eine akkuratere Bedarfsplanung (Konsumentenrolle), andererseits durch Angebot von Energieflexibilitätspotenzialen (Anbieterrolle). Diese Rollen können je nach Gegebenheiten flexibel gewechselt werden, um die industrielle Produktion an die zunehmend volatilen Energiemärkte zu adaptieren.

INHALTSVERZEICHNIS

Abkürzungsverzeichnis	XII
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Einordnung und Motivation	1
1.2 Das Projekt SynErgie	3
1.3 Ziele und Vision der Energiesynchronisationsplattform.....	4
1.4 Struktur der Referenzarchitektur und Aufbau des Diskussionspapiers	6
2 Schichten der Energiesynchronisationsplattform	8
2.1 Business Layer	8
2.1.1 Aufbau und Betreibermodell.....	8
2.1.2 Stakeholder der Energiesynchronisationsplattform	9
2.1.3 Interaktion der Stakeholder über die Energiesynchronisationsplattform.....	11
2.1.4 Business Case für Plattformnutzer	12
2.2 Functional Layer	14
2.2.1 Unternehmensplattform	14
2.2.2 Marktplattform	16
2.3 Process Layer.....	18
2.3.1 Prozesslandkarte der Energiesynchronisationsplattform	18
2.3.2 Kernprozesse der Energiesynchronisationsplattform.....	19
2.4 Information Layer	24
2.4.1 Energieflexibilitätsdatenmodell	24
2.5 Component Layer	29
2.5.1 Unternehmensplattform	29
2.5.2 Marktplattform	35
2.5.3 Datenaustausch zwischen den Komponenten.....	40
3 Anwendungsbeispiele	42
3.1 Anwendungsbeispiel Energieflexibilitätsdatenmodell	42
3.2 Demonstratoren	46
4 Perspektiven der Energiesynchronisationsplattform	50
4.1 Security	50
4.1.1 Sicherheitsperspektive im Architekturmodell.....	50
4.1.2 Anforderungen an die Sicherheit - Regulatorische Vorgaben und Branchenstandards	57

4.1.3	Schutzziele der Energiesynchronisationsplattform	59
4.2	Governance	62
4.2.1	Referenzarchitektur unter Nutzung des Frameworks TOGAF	62
4.2.2	Referenzarchitekturentwicklungsprozess mittels Architecture Decision Log	64
5	Fazit und Ausblick.....	66
	Literaturverzeichnis	67

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABAC	Attribute-based access control
ABB	Architecture Building Block
ADL	Architecture Decision Log
ADR	Architecture Decision Record
API	Application Programming Interface
BPMN	Business Process Modelling Notation
CORBA	Common Object Request Broker Architecture
CPS	Cyber-physical Systems
DMZ	Demilitarisierte Zone
DR	Demand Response
EFDM	Energieflexibilitätsdatenmodell
EFM	Energieflexibilitätsmaßnahme
EMaaS	Energie-Management-as-a-Service
ePPS	Energieorientierte Produktionsplanung und -steuerung
ESP	Energiesynchronisationsplattform
FTF	Fahrerlose Transportfahrzeuge
IaaS	Infrastructure as a Service
IAM	Identity and Access Management
ISV	Independent Service Vendor
KRITIS	Kritische Infrastruktur
MES	Manufacturing Execution System
MIBS	Marktinformationsbeschaffungsservice
MP	Marktplattform
MSB	Manufacturing Service Bus
PaaS	Platform as a Service
PKI	Public Key Infrastructure
RBAC	Role-based access control
REST	Representation-State-Transfer-Paradigma
SaaS	Software as a Service
SBB	Solution Building Block
SIEM	Security Information and Event Management
SOA	Serviceorientierte Architektur
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerungen
TOGAF	The Open Group Architecture Framework
TPM	Trusted Platform Module
UDDI	Universal Description, Discovery and Integration
UP	Unternehmensplattform

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Struktur des Kopernikus-Projekts SynErgie	3
Abbildung 2: Ziele und Vision der Energiesynchronisationsplattform	5
Abbildung 3: Aufbau der Referenzarchitektur für die Energiesynchronisationsplattform	7
Abbildung 4: Konzept der Energiesynchronisationsplattform	9
Abbildung 5: Energieflexibilitätsmaßnahmen auf den Ebenen der Automatisierungspyramide	14
Abbildung 6: Mögliche Betriebskonzepte der Unternehmensplattform	15
Abbildung 7: Prozesslandkarte der Energiesynchronisationsplattform	18
Abbildung 8: Prozess Flexibilität identifizieren	20
Abbildung 9: Teilprozess Informationen beschaffen	21
Abbildung 10: Prozess Flexibilität bewerten	22
Abbildung 11: Prozess Flexibilität anbieten und erbringen	23
Abbildung 12: Klassen des Energieflexibilitätsdatenmodells	24
Abbildung 13: Architektur der Unternehmensplattform	29
Abbildung 14: Architektur des Manufacturing Service Bus	30
Abbildung 15: Architektur des Smarten Konnektors	31
Abbildung 16: Übergeordnetes Zusammenspiel von Marktplattform, Unternehmensplattform und Service Providern	36
Abbildung 17: Architektur der Marktplattform	36
Abbildung 18: Nutzeroberfläche der SynErgie -Marktplattform (Browser-Ansicht)	38
Abbildung 19: Systemaufbau des Referenzbeispiels „Produktionsinfrastruktur“	42
Abbildung 20: Optimierte Anlagenfahrweise in Abhängigkeit eines exemplarischen Strompreisverlaufs	45
Abbildung 21: Steckbrief Forschungsdemonstrator Kühlhausmodell	46
Abbildung 22: Steckbrief Forschungsdemonstrator ETA-Fabrik	47
Abbildung 23: Steckbrief Forschungsdemonstrator Befähigung und Integration energieflexibler Anlagen	47
Abbildung 24: Steckbrief Industriedemonstrator Aluminium-Elektrolyse	48
Abbildung 25: Steckbrief Industriedemonstrator Papierindustrie	48
Abbildung 26: Steckbrief Industriedemonstrator Schmelzofenverbund	49
Abbildung 27: Steckbrief Testbetrieb in der Modellregion	49
Abbildung 28: TOGAF - Architecture Development Method	63
Abbildung 29: Referenzarchitekturentwicklungsprozess	65

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Kennzahlen der Klasse "flexible Last" des Energieflexibilitätsdatenmodells.....	25
Tabelle 2: Kennzahlen der Klasse "Energiespeicher" des Energieflexibilitätsdatenmodells.....	26
Tabelle 3: Kennzahlen der Klasse "Abhängigkeit" des Energieflexibilitätsdatenmodells.....	27
Tabelle 4: Kennzahlen der Klasse "Energieflexibilitätsmaßnahme" des Energieflexibilitätsdatenmodells.....	28
Tabelle 5: Referenzservices der Unternehmensplattform	33
Tabelle 6: Referenzservices der Marktplattform	39
Tabelle 7: Modellierung des Kältespeichers mithilfe der Klasse "Energiespeicher"	43
Tabelle 8: Modellierung des Wärmespeichers mithilfe der Klasse "Energiespeicher"	44
Tabelle 9: Modellierung der Wärmepumpe mithilfe der Klasse "flexible Last"	44

1 EINLEITUNG

1.1 Einordnung und Motivation

Die Eindämmung des Klimawandels ist zweifellos eine der größten Herausforderungen der Menschheit (United Nations 2015). Die Auswirkungen der globalen Erwärmung sind beispielsweise durch die globale Zunahme der extremen Wetterereignisse bereits deutlich spürbar (Mann et al. 2017). Der Klimawandel wird nicht nur irreversible Schäden an unserer Umwelt verursachen, sondern auch große finanzielle Auswirkungen auf die Weltwirtschaft haben. So wird eine globale Erwärmung von 1,5 Grad Celsius bis 2060 voraussichtlich zu einem Schaden von 72 Billionen US-Dollar führen (Channel et al.). Dies führt zu wachsender Aufmerksamkeit für Klimaschutz und übt Druck auf politische und wirtschaftliche Entscheidungsträger in aller Welt aus, ihre Anstrengungen für den Klimaschutz zu intensivieren. Diese Anstrengungen umfassen insbesondere auch Maßnahmen für einen nachhaltigen Energiesektor, welcher heute noch etwa ein Drittel zu den globalen Emissionen beiträgt (International Energy Agency 2019). Als Folge dieser Maßnahmen hat sich der Anteil erneuerbarer Energien in Europa in den letzten zwanzig Jahren mehr als verdoppelt. Dennoch liegt weiterhin ein langer Weg vor uns, denn 2019 hatten erneuerbare Energien noch einen relativ geringen Anteil von etwa 32 Prozent am Bruttostromverbrauch in der Europäischen Union (eurostat 2020; Redl et al. 2020). Mit einem Anteil von 40 Prozent war der Anteil erneuerbarer Energien am europäischen Bruttostromverbrauch im ersten Halbjahr 2020 jedoch erstmals größer als der fossiler Energieträger (Jones und Moore 2020).

Deutschland war eines der ersten Industrieländer, das eine ehrgeizige Energiewende eingeleitet hat (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2010). Die Bundesregierung plant, die Energieversorgung bis 2050 nahezu vollständig zu dekarbonisieren. Damit einher geht die Transformation zu einer Stromversorgung auf Basis von erneuerbaren Energien bis etwa 2050 bei gleichzeitiger Wahrung der Versorgungssicherheit (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2016). Im Jahr 2019 stammen rund 42 Prozent des Bruttostromverbrauchs in Deutschland aus erneuerbaren Quellen (Umweltbundesamt 2020). Davon werden bereits jetzt zwei Drittel durch Wind- und Sonnenenergie beigesteuert, die zukünftig noch weiter ausgebaut werden und daher für die Erreichung der Nachhaltigkeitsziele von entscheidender Bedeutung sind. Die Stromerzeugung aus diesen Quellen ist jedoch maßgeblich von den Wetterbedingungen abhängig und schwankt erheblich. Da erneuerbare Energien, insbesondere Wind- und Sonnenenergie, im Gegensatz zu konventionellen Kraftwerken nur gering bis nicht regelbar sind, stellt diese volatile Stromeinspeisung eine Herausforderung für die Balance zwischen Stromangebot und -nachfrage im Stromnetz dar. Um dem erhöhten Anteil von Wind- und Sonnenenergie gerecht zu werden, unternehmen die Netzbetreiber große Anstrengungen, um die Stabilität des Stromnetzes zu gewährleisten, indem sie Reserven vorhalten und diese bei einem geringen Stromangebot durch Wind und Sonne vorübergehend aktivieren oder bei einer Überlast Kraftwerke abschalten. Zudem werden zusätzlich immer noch beachtliche Mengen der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Rahmen von Einspeisemanagement-Maßnahmen abgeregelt (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen 2020). Die Kosten für solche Maßnahmen sind in den letzten Jahren massiv angestiegen (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen 2020).

In der Vergangenheit wurden somit Veränderungen in der Stromnachfrage durch die Steuerung der Stromerzeugung in konventionellen Kraftwerken ausgeglichen (Papaefthymiou et al. 2018). Aufgrund der Prognoseunsicherheit und der

wenig beeinflussbaren Natur erneuerbarer Energien stellt dieser Mechanismus auf der Stromerzeugungsseite keine ausreichende Option mehr dar und erhöht den Bedarf an Flexibilität. Diese Entwicklung wird von Papaefthymiou et al. (2018) als "Flexibilitätslücke" beschrieben. Im Allgemeinen stehen vier Optionen zur Verfügung, um die notwendige Flexibilität im System bereitzustellen (Lund et al. 2015; Müller und Möst 2018):

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

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

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

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

- die Untersuchung der technischen Flexibilisierungsmöglichkeit von branchenspezifischen Schlüsselproduktionsprozessen der produzierenden Industrie,
- die Betrachtung der technischen Flexibilisierungsmöglichkeit der branchenübergreifenden Produktionsinfrastruktur,

- die Erforschung einer durchgängigen Verbindung zwischen Maschine und Strommarkt sowie deren Befähigung zur automatisierten Entscheidungsfindung über Informations- und Kommunikationstechnik,
- die Analyse und Neugestaltung der regulatorischen Rahmenbedingungen des Markt- und Stromsystems zur Schaffung von wirtschaftlichen Anreizen für industrielles Demand Response,
- die Bestimmung der Höhe des Flexibilitätspotenzials sowie
- die Untersuchung ökonomischer, ökologischer und gesellschaftlicher Auswirkungen innerhalb der energieflexiblen Modellregion Augsburg.

1.2 Das Projekt SynErgie

Das Projekt SynErgie ist Teil der Kopernikus-Projekte, einer der größten deutschen Initiativen im Themenfeld der Energiewende. In einem interdisziplinären Konsortium aus Wissenschaft, Industrie und Zivilgesellschaft werden Technologien und Lösungen erarbeitet, um den Energiebedarf der deutschen Industrie effektiv mit dem volatilen Energieangebot zu synchronisieren (Sauer et al. 2019a). Die vorab genannten technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Aspekte für DR betrachtet das Projekt SynErgie in einer analogen Struktur (siehe Abbildung 1), wobei die Informations- und Kommunikationstechnik eine Schlüsselrolle zur Verbindung der Produktion und Produktionsinfrastruktur mit dem Markt- und Stromsystem einnimmt. Hierdurch können insbesondere im Bereich des industriellen DR Informationsflüsse auch über Unternehmensgrenzen hinweg definiert und aufgebaut werden. Die klassische Informations- und Kommunikationstechnik in Unternehmen wird also erweitert (Körner et al. 2019), um das Zusammenspiel diverser Optimierungsservices zu koordinieren (Seitz et al. 2019). Darauf aufbauend wird die Automatisierung und Standardisierung (Schott et al. 2019) des gesamten Prozesses zur Energieflexibilitätsvermarktung möglich (Bauernhansl et al. 2019). Um der Bedeutung logistischer Kennzahlen für produzierende Unternehmen gerecht zu werden, ist es des Weiteren essenziell, Energieflexibilität in die Produktionsplanung und -steuerung und damit die logistischen Zielgrößen zu integrieren (Pfeilsticker et al. 2019).

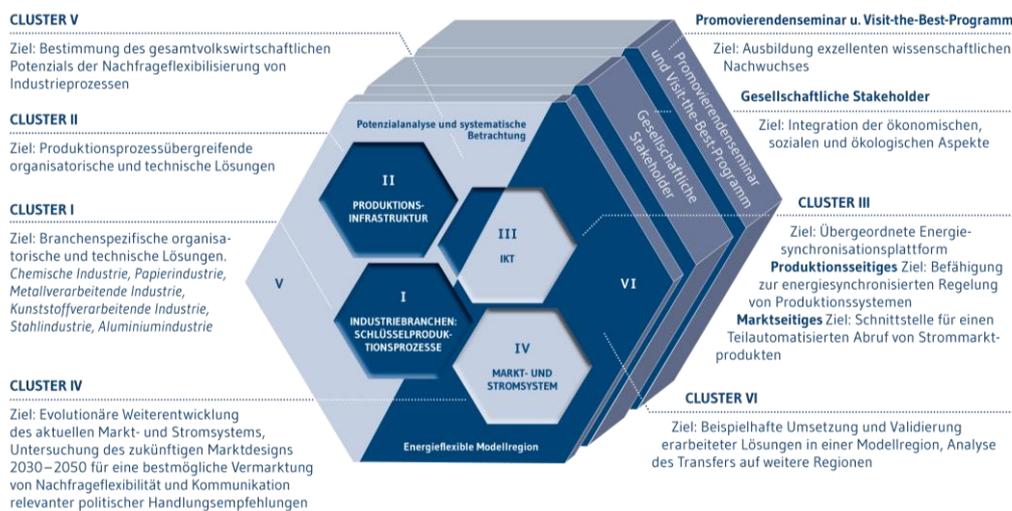


ABBILDUNG 1: STRUKTUR DES KOPERNIKUS-PROJEKTS SYNERGIE

1.3 Ziele und Vision der Energiesynchronisationsplattform

Das Ziel der Energiesynchronisationsplattform (ESP) ist es, durch den Aufbau eines Plattformökosystems den gesamten Prozess des Energieflexibilitätshandels von der Maschine bis zum Energiemarkt zu automatisieren und zu standardisieren. Hierfür ist insbesondere auch die Integration von Produktionsplanung und -steuerung und DR in produzierenden Unternehmen notwendig. Die Vision der ESP sieht deshalb vor, eine branchenübergreifende Plattform zum Energieflexibilitätshandel in Deutschland aufzubauen und damit »die« zentrale Energieflexibilitätsplattform⁴ zu werden (siehe Abbildung 2). Der Fokus liegt hier auf Services zur Flexibilisierung der energieintensiven Industrie und der Flexibilitätsvermarktung. Die ESP sowie die modular darauf aufbauenden Services ermöglichen der Industrie eine aktive Teilnahme mit möglichst niedrigen Eintrittsbarrieren an den Energiemärkten – einerseits durch eine akkuratere und schnellere Bedarfsplanung (Konsumentenrolle), andererseits durch das Anbieten von Energieflexibilitätspotenzial (Anbieterrolle). Die ESP ermöglicht damit eine ganzheitliche Betrachtung des Stromsystems, um im Sinne von automatisiertem DR eine möglichst effektive und effiziente Synchronisation von Stromangebot und -nachfrage für die Industrie zu ermöglichen.

Bei der ESP selbst handelt es sich nicht um eine physische Plattform. Sie beschreibt vielmehr als übergeordnetes Konzept die Zusammenarbeit zwischen den Teilplattformen Unternehmensplattform (UP) und Marktplattform (MP), was Rahmenbedingungen, Schnittstellen, Datenmodelle, Stakeholder⁵ und Sicherheitsaspekte umfasst und den gesamten Prozess des automatisierten Energieflexibilitätshandels von der Maschine bis zum Energiemarkt abbildet. Abhängig von den Gegebenheiten können die Rollen der Unternehmen jederzeit flexibel angepasst werden (Bauernhansl et al. 2019; Schott et al. 2018; Bauer et al. 2017a). Die beschriebenen Eigenschaften stellen einen deutlich höheren Funktionsumfang und ein höheres Informationsangebot dar, als aktuell auf bestehenden Plattformen implementiert (Rösch et al. 2019a).

In einem ersten Schritt wurde für die ESP ein durchgängiges Konzept einschließlich des Daten- und Informationsflusses von der Maschine bis zum Energiemarkt entwickelt. Hierfür war insbesondere die Identifikation und Entwicklung von Schnittstellen sowie die Definition eines Datenmodells für Energieflexibilität (siehe Abschnitt 2.4) erforderlich. Den Kern der ESP stellen Services dar (siehe Abschnitt 2.2), die Daten verarbeiten, aggregieren, miteinander austauschen und Energieflexibilität bewerten und bereitstellen. Das Konzept der ESP sieht dabei Erweiterungsmöglichkeiten für verschiedene Energieträger vor, auch wenn der Fokus eindeutig auf elektrischer Energie liegt. Um den Mehrwert der automatisiert gehandelten Energieflexibilität für Industrieunternehmen sowie Teilnehmer der Energiemärkte aufzuzeigen, werden verschiedene Demonstratoren konzipiert, entwickelt und umgesetzt. Dies umfasst Demonstratoren im Forschungsumfeld sowie, gemeinsam mit produzierenden Unternehmen, Netzbetreibern und Stromversorgern, Demonstratoren im industriellen Umfeld und der energieflexiblen Modellregion Augsburg (Roth et al. 2020). Neben der Automatisierung sorgt das Konzept der ESP durch eine einheitliche Schnittstelle zwischen produzierenden Unternehmen und Märkten außerdem für eine Reduktion von Abhängigkeiten, da keine spezifischen Schnittstellen für einzelne Handelspartner aufgebaut werden müssen. Zudem erleichtern einheitliche Schnittstellen Serviceanbietern, ihr Angebot auf den Plattformen zu platzieren.

⁴ Zentrale Plattform ist an dieser Stelle im Sinne einer Meta-Plattform zu verstehen, welche bestehende Angebote integriert und nicht ablöst. Siehe hierzu auch Abschnitt 2.2.2.

⁵ Die ESP spricht eine Vielzahl an Stakeholdern verschiedener Domänen an. Siehe hierzu auch Abschnitt 2.1.2.

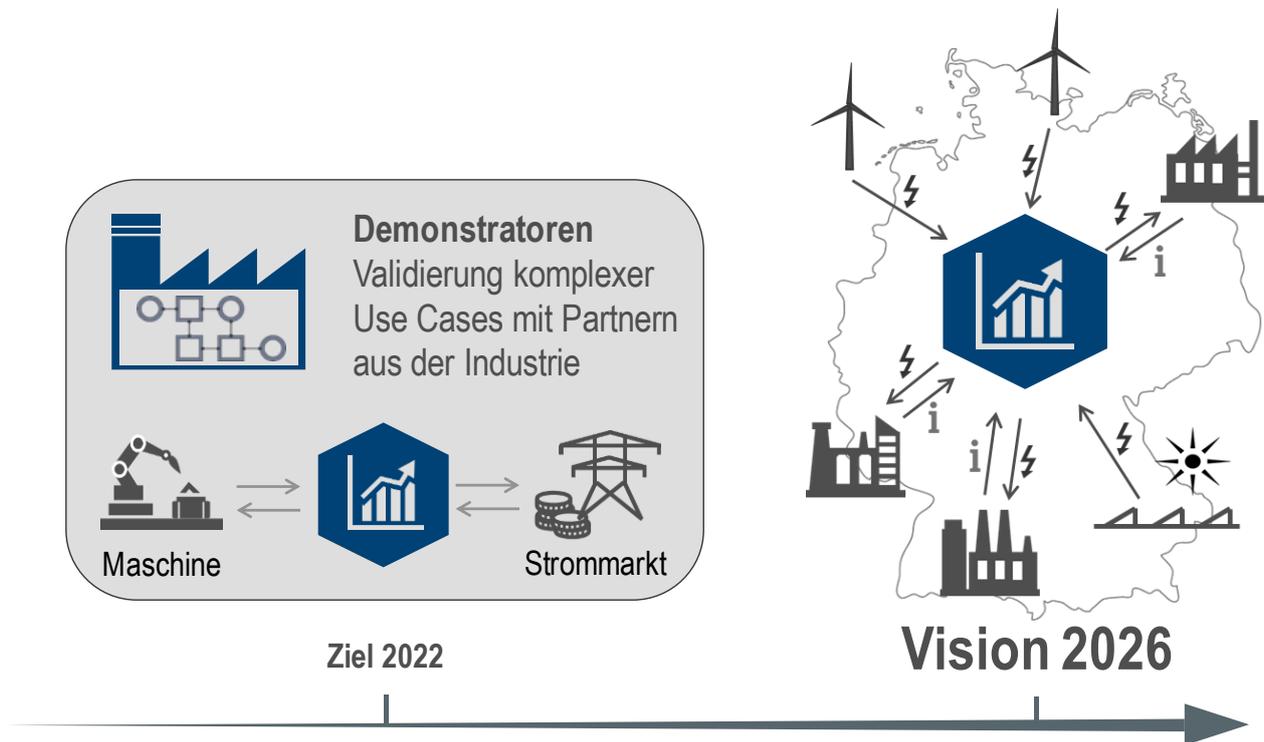


ABBILDUNG 2: ZIELE UND VISION DER ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM

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

1.4 Struktur der Referenzarchitektur und Aufbau des Diskussionspapiers

Im Projekt entsteht aufbauend auf dem Konzept der ESP eine Referenzarchitektur als Rahmen für die Entwicklung von Systemen und Lösungen für den automatisierten Handel von Energieflexibilität. Sie definiert Mindestanforderungen und dient als Basis für die Ableitung konkreter IT-Systemarchitekturen. Sie unterstützt Unternehmen dabei, eine entsprechende unternehmensseitige IT-Architektur zu implementieren und vorhandene Systeme und Anlagen zu integrieren. Auch marktseitig bildet die Referenzarchitektur den erarbeiteten Status quo ab, welcher unter anderem auch Anforderungen für die Teilnahme an der Plattform und Services von Drittanbietern zur Flexibilitätsbewertung und -vermarktung enthält. Für Entwickler dient die Referenzarchitektur als Vorlage, auf deren Basis spezifische Anforderungen implementiert werden können. In regelmäßigen Abständen wird der aktuelle Status der Entwicklung der Referenzarchitektur im Diskussionspapier dokumentiert.

Basierend auf bestehenden Standards für das Software Engineering und IT-Systeme (ISO/IEC/IEEE 42010:2011) sowie in Anlehnung an Referenzarchitekturmodelle aus dem Umfeld der Industrie 4.0 (siehe insbesondere Referenzarchitekturmodell der Industrial Data Spaces Association (Otto et al. 2019), Reference Architecture Model Industrie 4.0 (DIN SPEC 91345:2016-04), Smart Grid Architecture Model (Smart Grid Coordination Group 2012)), gliedert sich die Referenzarchitektur der ESP in fünf Schichten, welche die Anforderungen und Blickwinkel verschiedener Stakeholder auf unterschiedlichen Ebenen abbilden:

- Business Layer (Geschäftsschicht): definiert Stakeholder, deren Aktivitäten und Interaktion untereinander und beschreibt ökonomische Aspekte des Systems; sie kann verwendet werden, um regulatorische und wirtschaftliche Strukturen und Geschäftsmodelle der beteiligten Stakeholder abzubilden
- Functional Layer (Funktionsschicht): definiert die funktionalen Anforderungen an den automatisierten Energieflexibilitätshandel und daraus abzuleitende konkrete Merkmale; sie beschreibt Funktionen und Dienste aus Sicht der IT-Architektur
- Process Layer (Prozessschicht): beschreibt die Interaktionen, die zwischen den verschiedenen Komponenten der ESP stattfinden und bildet so die dynamischen Aspekte der Referenzarchitektur ab
- Information Layer (Informationsschicht): beschreibt die Informationen, die zwischen Funktionen, Diensten und Komponenten ausgetauscht werden; enthält Informationsobjekte und zugrundeliegende Datenmodelle
- Component Layer (Komponentenschicht): umfasst die Zerlegung der logischen Softwarekomponenten unter Berücksichtigung von Aspekten wie Integration, Konfiguration, Bereitstellung und Erweiterbarkeit dieser Komponenten und die physikalische Verteilung der beteiligten Komponenten

Diese fünf Schichten werden um die Darstellung von Anwendungsbeispielen erweitert, welche zur Veranschaulichung der Architektur dienen. Anhand eines Beispiels wird die Modellierung von Energieflexibilität in einem standardisierten Datenmodell beschrieben. Zudem werden Demonstratoren aus dem Forschungs- und Industrieumfeld zur Validierung der entwickelten Konzepte und Lösungen sowie der technischen Machbarkeit des automatisierten und standardisierten Energieflexibilitätshandels dargestellt.

Zusätzlich umfasst die ESP-Referenzarchitektur in Anlehnung an das Referenzarchitekturmodell der International Data Spaces (Otto et al. 2019) zwei Perspektiven - Sicherheit und Governance -, welche über alle fünf Schichten hinweg implementiert werden müssen (siehe Abbildung 3):

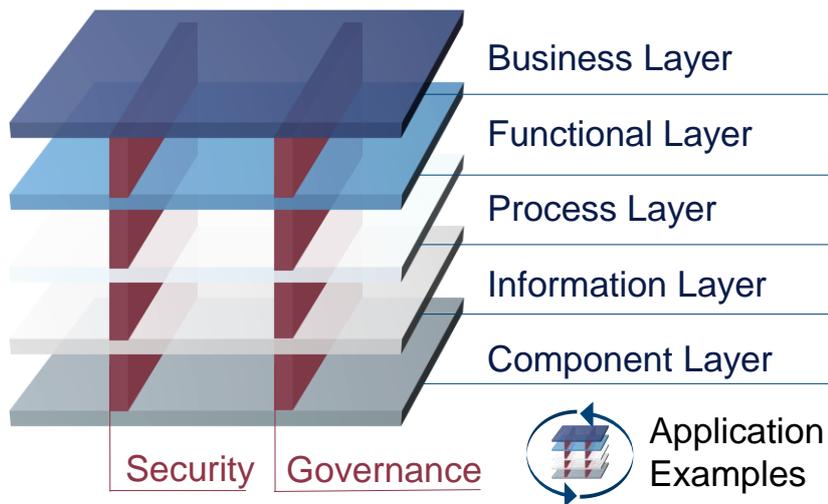


ABBILDUNG 3: AUFBAU DER REFERENZARCHITEKTUR FÜR DIE ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM

Der Aufbau des vorliegenden Diskussionspapiers folgt folgender Gliederung. Kapitel 2 beschreibt zuerst die Schichten, bevor in Kapitel 3 Anwendungsbeispiele der Referenzarchitektur dargestellt werden. Kapitel 4 umfasst die Perspektiven der Referenzarchitektur. Das Diskussionspapier schließt mit einem Fazit und Ausblick in Kapitel 5 ab.

2 SCHICHTEN DER ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM

2.1 Business Layer

Im Business Layer der ESP-Referenzarchitektur werden der grundlegende Aufbau der ESP und die Betreibermodelle der IT-Plattformen UP und MP definiert. Des Weiteren werden die Stakeholder der ESP und deren Interaktionen über die ESP festgelegt. Auf dieser Basis können innovative Geschäftsmodelle und digitale Services für die Plattformnutzer entwickelt werden. Im Business Layer werden Anforderungen an UPs und MP spezifiziert, welche durch die Funktionalitäten des Functional Layer erfüllt werden sollen.

2.1.1 Aufbau und Betreibermodell

Die ESP beschreibt als übergeordnetes Konzept das Zusammenspiel mehrerer UPs und einer zentralen MP (siehe Abbildung 4) und bildet den gesamten Prozess des informationstechnisch automatisierten Energieflexibilitätshandels von der Maschine bis zum Energiemarkt ab. Sie umfasst Rahmenbedingungen, Schnittstellen, Datenmodelle, Stakeholder und Sicherheitsaspekte.

Eine UP stellt das modulare, service-orientierte, sichere und nach außen gekapselte informations- und kommunikationstechnische System innerhalb eines Unternehmens dar (Schel et al. 2018a). Sie ist der Befähiger für Unternehmen zum automatisierten Energieflexibilitätshandel über eine standardisierte Schnittstelle zu auf der MP verfügbaren Angeboten (Schott et al. 2018). Eine UP bietet in einer service-orientierten IT-Infrastruktur die notwendigen Funktionalitäten für die informationstechnische Anbindung und die Ansteuerung von energieflexiblen Produktionsprozessen und -infrastruktur und somit für die Bereitstellung von Energieflexibilität.

Demgegenüber steht als Intermediär eine mit allen UPs über eine uniforme Schnittstelle kommunizierende MP. Die MP ist eine Meta-Plattform für den Energieflexibilitätshandel, die es ermöglicht, verschiedene Energieflexibilitätsmärkte und Services mithilfe einer Service-Broker-Architektur anzubinden und zu vermitteln. Sie ermöglicht den Unternehmen so den Zugriff auf eine Vielzahl existierender und zukünftiger Services sowie weitere Plattformen. Damit Unternehmen Flexibilität vermarkten können, werden über die MP verschiedene Services bereitgestellt und ausgeführt. Diese unterstützen die Unternehmen in verschiedenen Aspekten der Flexibilitätsbereitstellung, der Flexibilitätsbewertung und des Flexibilitätshandels.

Die Aufteilung der ESP in zwei logische Plattfortmtypen ist notwendig, um deren spezifisches Domänenwissen und die Technologien und Methoden sicher zu kapseln, ohne den Betrieb und die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems zu beeinträchtigen (Bauer et al. 2017a; Schott et al. 2018) sowie das Zusammenspiel einer Vielzahl an UPs mit einer zentralen MP abzubilden. Die ESP stellt dabei den übergeordneten Rahmen für die Zusammenarbeit der UPs und der MP dar. In diesem globalen Rahmen werden Stakeholder, technische Schnittstellen, Datenflüsse und Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Interaktion und Integration der eigentlichen Softwareplattformen, namentlich der UP und MP, definiert.

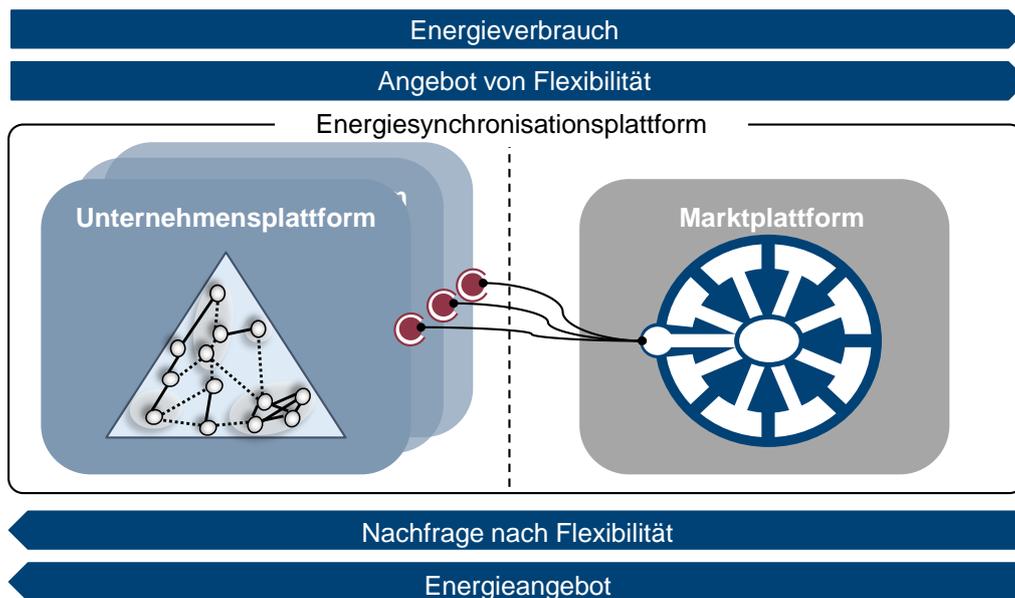


ABBILDUNG 4: KONZEPT DER ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM

links: Die UP mit dem Zusammenspiel verschiedener Services unterschiedlicher Planungsebenen für den energieflexiblen Ablauf der Produktion, rechts: die MP als Servicevermittler zur Anbindung verschiedener Energieflexibilitätsmärkte und Services
 Quelle: Rösch et al. (2019a)

Betreiber der UPs sind die Unternehmen selbst oder Dienstleister, wobei auch hybride Formen möglich sind. In Anlehnung an die Arten des Cloud Computing ist ein privates (Plattform wird privat im Unternehmen betrieben), hybrides (die UP eines Standorts bzw. einer Business Unit sind einer unternehmensweiten UP untergeordnet) oder öffentliches (UP wird durch einen Dienstleister öffentlich betrieben, wobei die Daten der einzelnen Unternehmen sicher gekapselt sind) Betreibermodell vorgesehen. Hinsichtlich der MP soll eine kooperative Organisationsform des Betreibers angestrebt werden, um die Unabhängigkeit von allen Stakeholdern der ESP sicherzustellen und Interessenkonflikte zu vermeiden. Auch ein staatlicher Betrieb der MP, beispielsweise durch die Bundesnetzagentur, ist denkbar. Da es im Gegensatz zur UP nur eine zentrale MP gibt, ist der Betrieb der beiden Plattformentypen entkoppelt. Die MP wird von dem/den Marktplattformbetreibern selbst betrieben.

2.1.2 Stakeholder der Energiesynchronisationsplattform

Die ESP spricht eine Vielzahl an Stakeholdern verschiedener Domänen an und unterstützt diese bei der Interaktion während dem automatisierten Energieflexibilitätshandel. Die identifizierten Rollen und deren Interessengruppen können unterschiedlichen Bereichen zugeordnet werden:

Rollen im Kontext der UP:

- Endkunde (End-User): Diese beziehen Services/Apps unterschiedlicher Hersteller über die Plattform mit dem Ziel, eine passende Unterstützung ihrer Geschäftsprozesse abzubilden. Im vorliegenden Kontext sind dies produzierende Unternehmen, die ihrerseits Energieflexibilität bereitstellen können. Die energieflexible Produktion erfordert innerhalb des Unternehmens Akteure auf strategischer bis hin zur operativen Ebene, wobei insbesondere folgende direkte Stakeholder der UP zu berücksichtigen sind (VDI-Richtlinie 5207 Blatt 1): das Energiemanagement, durch welches Energieflexibilitätspotenziale identifiziert, koordiniert und

verwaltet werden. Die Produktionsplanung und -steuerung für die Planung und Umsetzung der Energieflexibilität im operativen Betrieb und die Produktion, da eine Umsetzung von Energieflexibilität, vor allem in nicht automatisierten Produktionsbereichen, zusätzlich durch Tätigkeiten von Produktionsmitarbeitern (Produktionsleiter, Meister oder Facharbeiter) ausgeführt wird.

- Plattformbetreiber (Platform Operator): Dieser stellt den Betrieb der Plattform zur Bereitstellung von Services sicher sowie die Grundfunktionalitäten zur Serviceautomatisierung und -orchestrierung. Außerdem wahrt er die Integrität der Plattform (Governance) und gewährleistet die Funktionstüchtigkeit sowie Sicherheit der Dienste. Darüber hinaus dient er als erster Ansprechpartner gegenüber den Endkunden (First Level Support). Diese Rolle kann von den IT-Abteilung produzierender Unternehmen oder IT-Dienstleistern eingenommen werden. Während erstere die UP zur Eigennutzung betreibt (Private Plattform; siehe Abbildung 6 in Abschnitt 2.2.1), beschreibt letzteres ein Unternehmen, welches die UP nicht zur Eigennutzung, sondern für andere Unternehmen betreibt (Öffentliche Plattform).
- Serviceanbieter (Independent Service Vendor (ISV)): Diese entwickeln Service- und Datenleistungen bzw. Software und stellen diese bereit, um den Funktionsumfang der UP zu erweitern. Diese Leistungen können auf Basis eigener und/oder vorhandener Services anderer ISV beruhen. Als Serviceanbieter können verschiedene Stakeholder auftreten: IT-Abteilungen produzierender Unternehmen, Softwareanbieter, Dienstleister (Berater, Integrator) und Hardwarehersteller/ -ausstatter (Anlagen, Sensoren, Aktoren).

Rollen im Kontext der MP:

- Plattformbetreiber (Platform Operator): Hinsichtlich der MP sind mehrere Betreibervarianten denkbar. Ziel des Betreibermodells ist es, die Unabhängigkeit von allen Stakeholdern der ESP sicherzustellen und Interessenkonflikte zu vermeiden. Neben einem marktwirtschaftlichen Betreiber ist auch ein staatlicher Betrieb der MP, beispielsweise durch die Bundesnetzagentur, möglich. Zusätzlich könnte in Förderphase III der Betrieb einer neutralen Plattform auf Basis von Distributed-Ledger-Technologien untersucht werden, um die MP unabhängig von klassischen Betreiberkonstellationen zu betreiben.
- Plattformteilnehmer: Diese sind natürliche bzw. juristische Personen mit Zugangsberechtigung zu Services der Plattform. Der angebotene Funktionsumfang richtet sich nach der Nutzerrolle der Teilnehmer. Dieser Gruppe werden Akteure zugeordnet, die aktiv an der Vermarktung von Energie beteiligt sind. Ihre Rollen werden u. a. durch Regelwerke für den derzeitigen deutschen (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) 2019) und europäischen (ENTSO-E 2020) Energiemarkt sowie den Energiemarkt der Zukunft spezifiziert (Bertsch et al. 2017). Zusätzlich ist die Gruppe der Aggregatoren zu nennen. Diese akkumulieren die durch Verbraucher zur Verfügung gestellte Flexibilität, sodass auch kleineren Flexibilitätsanbietern Zugang zu Märkten ermöglicht wird. Ihre Bereitstellung und Abrechnung ist vertraglich geregelt und wird durch Dienste der MP unterstützt. Aggregatoren gleichen die Ausfallrisiken einzelner Anbieter aus, wodurch Flexibilitätsanbieter von der Komplexität und den Risiken des Markts unberührt bleiben.
- Serviceanbieter (Independent Service Vendor (ISV)): Diese entwickeln Service- und Datenleistungen bzw. Software analog einem App-Entwickler bei einem Appstore und stellen diese bereit, um den Angebotsumfang der MP zu erweitern. Diese Leistungen können auf Basis eigener und/oder vorhandener Services anderer ISV beruhen.

Weitere Stakeholder:

Der Transport der elektrischen Energie, der von einem breiten Spektrum an Stromerzeugern stammt, erfolgt durch Übertragungsnetzbetreiber, die Verteilung durch Verteilnetzbetreiber und die Bilanzierung durch Bilanzkreisverantwortlichen. Übertragungsnetzbetreiber sorgen dabei u. a. für die Stabilität der (über)regionalen Stromnetze und nutzen die angebotene Flexibilität, um Abweichungen in ihrem Netzbereich auszugleichen und so die Netzfrequenz stabil zu halten. Energiedienstleister bieten ergänzende Dienstleistungen zur Bereitstellung und Vermarktung von Energie und Flexibilität. Dazu gehören die Montage, die (Fern)Wartung und der Betrieb von Messanlagen, Demand-Response-Mechanismen und Informationsdienste (z. B. als Messstellenbetreiber).

2.1.3 Interaktion der Stakeholder über die Energiesynchronisationsplattform

Die Verwendung der ESP durch die einzelnen Stakeholder wird in Anlehnung an die Phasen des Marktkoordinierungsmechanismus (USEF Foundation 2015) skizziert. Dieser definiert, ausgehend vom Design aktueller Energiemärkte, zusätzliche Betriebsmodi und Prozesse, in denen Marktteilnehmer durch koordinierte Interaktionen Flexibilität abfragen und zur Stabilisierung des Energienetzes beitragen können.

In der initialen Phase der Markterschließung und Vertragsbindung unterstützt die MP ihre Teilnehmer bei der Servicevermittlung für das Anbieten, Nachfragen und Bereitstellen von Energieflexibilität. Die Verträge können eine langfristige bzw. kurzfristige Ad-hoc-Bindung beim Geschäftsabschluss abbilden und somit den Handel mit Energieflexibilität dynamisch und bedarfsorientiert unterstützen.

In der Phase der Bedarfserhebung, Planung und Prognose nutzen produzierende Unternehmen die Infrastruktur der UP, um prozessabhängige Verbrauchsdaten zu erheben (siehe Smarter Konnektor in Abschnitt 2.5.1.1), zu integrieren (siehe Manufacturing Service Bus in Abschnitt 2.5.1.1) und Lastpläne und weitere Prognosen zu generieren (siehe Services in Abschnitt 2.5.1.2). Hierzu wird im ersten Schritt (teilweise händisch) die Energieflexibilität (siehe Abschnitt 2.4) aufgenommen und auf dem Smarten Konnektor beschrieben. Im Energieflexibilitätsmanagementservice werden anschließend die einzelnen Energieflexibilitäten auf Unternehmensebene zusammengefasst. Durch Optimierungsservices für die Produktionsplanung und -steuerung kann der Einsatz von Energieflexibilität produktionsseitig optimiert werden. Mithilfe des Energieflexibilitätsmanagementservice kann über die Schnittstelle zur MP Energieflexibilität, unterstützt durch Services auf der MP, bewertet und über Services von Energiedienstleistern vermarktet werden. Diese Services auf der MP ermöglichen es beispielsweise, dass ein Aggregator einem Unternehmen verschiedene Einsatzmöglichkeiten für vorher definierte Energieflexibilität vorschlägt. Wird dabei eine passende Zuordnung zu Angebot und Nachfrage gefunden, erfolgt ein Informationssignal an die UP. Über die einzelnen Ebenen wird die umzusetzende Energieflexibilität bekannt gegeben und mithilfe des Smarten Konnektors in Form von Steuersignalen auf Maschinenebene umgesetzt.

Die MP unterstützt in der Abrechnungsphase, indem sie Transaktionen und monetäre Forderungen zwischen den Services nachvollziehbar macht (Clearing), u. A. basierend auf expliziten Vertrags- und Preismodellen. In weiteren Ausbaustufen kann die MP zwecks automatischer Abrechnung an Zahlungssysteme angeschlossen werden. Die Zahlungsabwicklung kann beispielsweise über ein von der Bundesanstalt für Finanzdienstleistungsaufsicht zugelassenes Zahlungsinstitut erfolgen.

2.1.4 Business Case für Plattformnutzer

Übergeordnetes Ziel der ESP ist es, den gesamten Prozess des Energieflexibilitätshandels von der Maschine oder Anlage bis zum Energiemarkt und somit die Nutzung industrieller Nachfrageflexibilität als Option zur Bereitstellung der im Energiesystem notwendigen Flexibilität zu automatisieren und standardisieren (siehe Abschnitt 1.3).

Für Unternehmen eröffnet sich durch den Einsatz von Energieflexibilität (unterstützt durch die ESP) ein neues Geschäftsmodell. Unternehmen können durch die Umsetzung von Energieflexibilität sowohl Einsparungen durch die Reduzierung der Strombeschaffungskosten und/oder der Netzentgelte sowie weiterer Umlagen erzielen als auch Erlöse generieren (siehe Abschnitt 1.3). Einsparungen können dabei erzielt werden durch:

- eine Reaktion auf volatile Energiepreise
- eine Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils durch die direkte Nutzung eigen- oder lokal erzeugten (erneuerbaren) Stroms und
- die Vermeidung von Lastspitzen (Peak Shaving).

Zudem können durch das Anbieten von Energieflexibilität für Dritte (bspw. als Systemdienstleistung) Erlöse für das Vorhalten und ggf. den tatsächlichen Abruf der Flexibilität generiert werden (Haupt et al. 2020; VDI-Richtlinie 5207 Blatt 1).

Demgegenüber entstehen durch den Aufbau und Betrieb einer energieflexiblen Fabrik Kosten sowohl bei der Befähigung eines Produktionssystems zur Energieflexibilität als auch bei der Vorhaltung und Nutzung von Energieflexibilität im operativen Betrieb. Durch geeignete Gestaltungsmaßnahmen kann das Energieflexibilitätspotenzial eines Produktionssystems erhöht werden. Die wesentlichen bei der Befähigung zur Energieflexibilität anfallenden Aufwände umfassen Investitionen, Zinsen, Kosten für Fremdleistungen und Personalkosten. Im operativen Betrieb können sowohl das Vorhalten und die Nutzung von Energieflexibilität, als auch die Teilnahme an Märkten Kosten nach sich ziehen (Haupt et al. 2020; VDI-Richtlinie 5207 Blatt 1). Dies resultiert insbesondere aus den möglichen Wechselwirkungen zu logistischen Zielgrößen wie beispielsweise dem Einhalten von Lieferterminen (Pfeilsticker et al. 2019; Rösch et al. 2019b) Wesentliche Kostenfaktoren hierbei können unter anderem Personalkosten aufgrund einer Erhöhung des Arbeitsaufwandes, erhöhte laufende Maschinenkosten durch eine möglicherweise reduzierte Lebensdauer von Anlagen oder Verschleißerscheinungen, Lagerkosten oder Verzugskosten umfassen (Haupt et al. 2020; VDI-Richtlinie 5207 Blatt 1).

Services auf der UP und MP unterstützen Unternehmen dabei, den wirtschaftlichen Einsatz von Flexibilität zu optimieren. Für die effiziente Nutzung von Energieflexibilität ist eine Optimierung auf verschiedenen Ebenen, abhängig von Planungshorizonten, zeitlicher Auflösung und maximal zulässigen Laufzeiten notwendig. Die Modularität der ESP erlaubt es Unternehmen, je nach Rahmenbedingungen und Anforderungen des betrachteten Zielprozesses oder der Infrastruktur, einzelne Ebenen der Optimierung flexibel zu implementieren (Seitz et al. 2019; Rösch et al. 2019a). Durch die Integration von Flexibilität sowie die Standardisierung von Informationsflüssen und Schnittstellen schafft die ESP weitgehende Transparenz für die Vermarktung von Energieflexibilität und ermöglicht einen einfachen Zugang der Flexibilitätsanbieter zu neuen Services und Vermarktungsmöglichkeiten. Unternehmen selbst oder unabhängige Softwareanbieter können zudem unabhängig vom Plattformbetreiber neue innovative Services entwickeln und diese über die ESP anderen Teilnehmern zur Verfügung stellen. Die ESP verhindert durch die standardisierte Kommunikation

langfristige Vendor-Lock-In-Effekte, wodurch hohe Kosten beim Anbieterwechsel vermieden werden. Die Reduktion von Hemmnissen für die Teilnahme an Flexibilitätsmärkten und den Wechsel von Serviceanbietern ermöglicht den flexiblen Zugang zu einer Vielzahl an Services verschiedener Anbieter und fördert somit den Wettbewerb. Für Serviceanbieter bietet die ESP hingegen einen einfachen und transparenten Zugang zu Kunden und zudem eine Minimierung von Risiken durch einen diversifizierten und breiten Kundenstamm. Unternehmensseitig ermöglicht die Architektur der ESP die Integration bestehender IT-Systeme und proprietärer Services, welche verschiedene von Energieflexibilität unabhängige Funktionen der Unternehmensplanung und -steuerung erfüllen. Diese können gegebenenfalls durch die Erweiterung ihrer Funktionalitäten um die Zielgröße Energie(-flexibilität), die Erweiterung einzelner Komponenten und die Nutzung von offenen Protokollen und Schnittstellen für den automatisierten Flexibilitätshandel im Sinne einer Anbindung an die MP befähigt werden. Eine standardisierte Schnittstelle zwischen UP und MP ersetzt zusätzliche spezifische Schnittstellen zwischen Unternehmen und Serviceanbietern und reduziert somit den Implementierungsaufwand und die Komplexität von Informationssystemen für den Handel mit Energieflexibilität (Rösch et al. 2019a). Darüber hinaus kann die Auseinandersetzung mit Energieflexibilität die abteilungsübergreifende Zusammenarbeit und somit die Organisationsstruktur im Unternehmen stärken. Prozesse der Flexibilitätsvermarktung betreffen eine Reihe von Stakeholdern, von der technischen Instandhaltung bis zur Produktionsplanung, und fördern so den unternehmensinternen Austausch, wodurch sich Potenziale für Prozessoptimierungen ergeben können. Zuletzt gewinnt auch die ökologische Nachhaltigkeit für produzierende Unternehmen zunehmend an Bedeutung. Durch den Einsatz von Energieflexibilität und die damit einhergehende Verschiebung des Energieverbrauchs in Zeiten mit erhöhtem Aufkommen erneuerbarer Energien, wird deren Integration begünstigt und somit die Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung gesenkt.

2.2 Functional Layer

Im Functional Layer der ESP-Referenzarchitektur werden die grundlegenden Ziele und funktionalen Anforderungen der zwei logischen Plattfortmtypen UP und MP dargestellt und erläutert. Daraus können konkrete Merkmale für die Ausprägungen des Process, Information und Component Layer abgeleitet werden. Die dargestellten Ziele dienen zur Erfüllung der im Business Layer aufgeführten Anforderungen an den automatisierten Energieflexibilitätshandel. Zusätzlich werden im Abschnitt Functional Layer die möglichen Betriebskonzepte der beiden IT-Plattformen detaillierter diskutiert.

2.2.1 Unternehmensplattform

Die UP als ein Teil der ESP (siehe Abschnitt 2.1) stellt das modulare, serviceorientierte, sichere und nach außen gekapselte informations- und kommunikationstechnische System innerhalb eines Unternehmens dar (Schel et al. 2018a). In der UP finden einerseits Aufnahme, Aggregation, Analyse und Optimierung von Prozess- und Produktionsdaten statt sowie andererseits die energiesynchrone Steuerung und Regelung der Systeme, Anlagen und Komponenten. Die UP ermöglicht damit einen energieflexiblen Ablauf der Produktion (Schel et al. 2018a). Hierzu werden die EFM im Unternehmen über einen Service aggregiert, über die Schnittstelle zur MP an den Energiemärkten platziert und für verschiedene Services bereitgestellt.

Wenngleich sich die Automatisierungspyramide zukünftig eventuell auflösen wird und ihre Funktionalitäten vollständig über einzelne Services abgedeckt werden (Bauer et al. 2017b), ist sie heute noch in den meisten Unternehmen in ähnlicher Form vorzufinden. Für den automatisierten Energieflexibilitätshandel ist somit eine Öffnung und Erweiterung der Automatisierungspyramide in Richtung der Energiemärkte vorzusehen (Körner et al. 2019). In Abbildung 5 sind die einzelnen Flexibilitätsmaßnahmen in der Automatisierungspyramide klassifiziert, sie können aber auch als einzelne Funktionalitäten von Services gesehen werden.

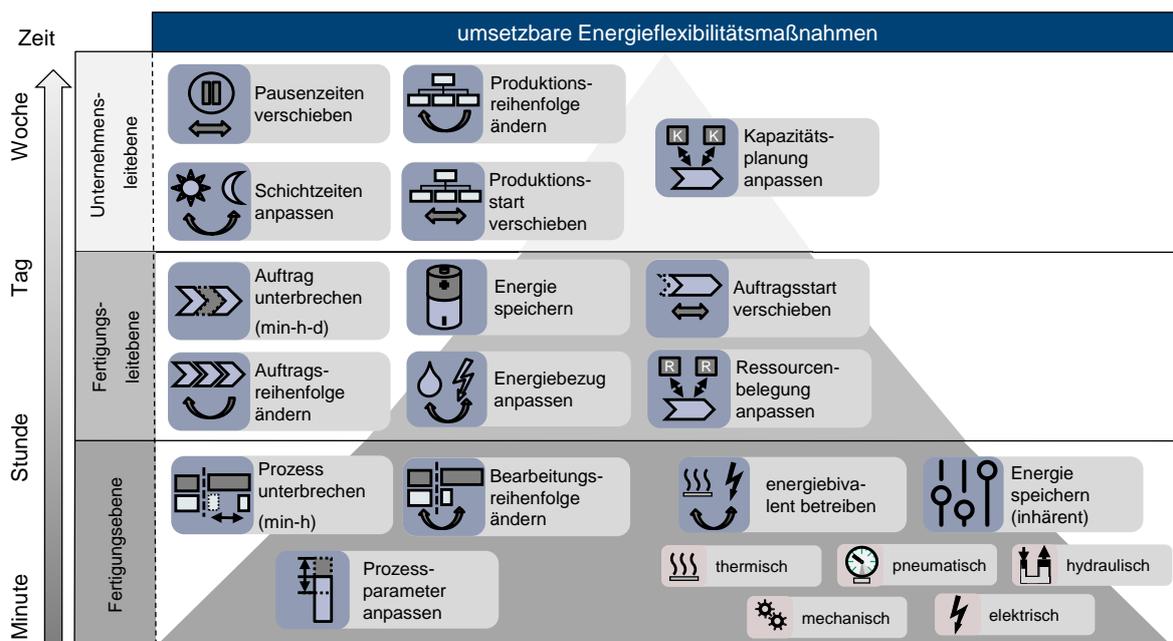


ABBILDUNG 5: ENERGIEFLEXIBILITÄTSMABNAHMEN AUF DEN EBENEN DER AUTOMATISIERUNGSPYRAMIDE

Quelle: (Rösch et al. 2017; VDI-Richtlinie 5207 Blatt 1)

In Anlehnung an Mell und Grance (2017) sind drei verschiedene Betriebskonzepte für die UP vorgesehen. Diese sind in Abbildung 6 dargestellt. Die private Plattform (als private cloud) als On-Premise-Lösung sieht vor, dass die UP im Unternehmen betrieben wird und hier alle energetisch relevanten Maschinen, Anlagen und IT-Systeme angebunden werden. Für Unternehmensgruppen oder -verbünde ist es möglich, für einzelne Business Units oder Standorte eine eigene UP zu betreiben, der eine unternehmensweite Plattform (Private Plattform) oder die Plattform eines Dienstleisters übergeordnet ist (als hybrid cloud). Im dritten möglichen Fall wird die UP durch einen Dienstleister öffentlich betrieben (als public cloud). Zu dieser Plattform können sich mehrere Unternehmen verbinden, wobei die Daten für jedes Unternehmen sicher gekapselt werden. Je nach Anforderungen, Größe und vorhandener technischer Ausstattung kann jedes Unternehmen individuell das passende Betriebskonzept auswählen. Beispielsweise ist es für kleinere Unternehmen sinnvoll, eine öffentliche Plattform zu wählen, um deren vorhandene IT-Infrastruktur und Rechenzentren zu nutzen.

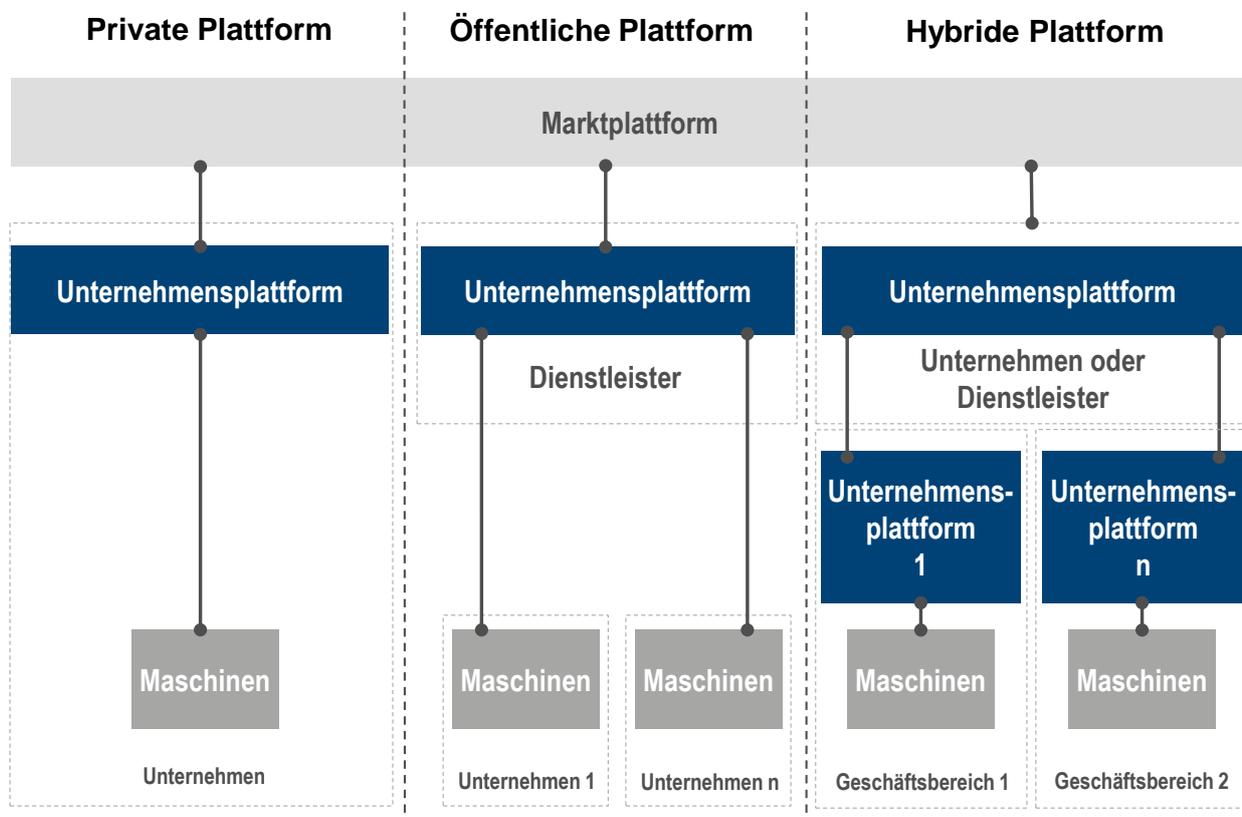


ABBILDUNG 6: MÖGLICHE BETRIEBSKONZEPTE DER UNTERNEHMENSPLATTFORM

Zusammenfassend sollen folgende zentrale Anforderungen durch die UP erfüllt werden:

- Die UP dient als Entwicklungs-, Vertriebs- und Betriebsplattform für Services mit Fokus auf energetischer Optimierung unter Flexibilitätsaspekten sowie Energiemanagement-as-a-Service (EMaaS).
- Die Skalierung über unterschiedliche Betriebskonzepte soll die unterschiedlichen Bedürfnisse der Unternehmen bedienen.
- Die Integration von Energie-, Prozess- und Betriebsdaten von Anlagen und Maschinen soll durch die Anbindung der Anlagen mittels Smarter Konnektoren vereinfacht werden.

- Services unterschiedlicher Anbieter sollen über eine Integrations- bzw. Abstraktionsschicht orchestriert und mit Anlagen und Maschinen integriert werden.
- Die Anbindung an die MP soll notwendig sein, um einen reibungslosen bidirektionalen Datenaustausch zwischen der UP und die von der MP vermittelten Services zu gewährleisten, um damit einen automatisierten Energieflexibilitätshandel zu ermöglichen.

2.2.2 **Marktplattform**

Bereits heute vermarkten Unternehmen ihre Flexibilität auf unterschiedlichen Märkten und verwenden dazu verschiedene, oft individuelle Services. Um dieses komplexe System transparenter sowie effizienter zu gestalten und damit den Grundstein für die automatisierte Flexibilitätsvermarktung zu legen, integriert die zentrale MP die drei Gruppen Flexibilitätsbereitsteller (Unternehmen), Flexibilitätsmärkte und unterstützende Services. Die MP ist als digitaler Marktplatz konzipiert, d. h., dass sich das Funktions- und Serviceangebot nachfrageabhängig über die Zeit ändert. Dadurch passen sich Funktionen und Services dynamisch an sich ändernde Rahmenbedingungen, Regulatorik und die kundenseitige Nachfrage an, womit zum einen der Wettbewerb unter den Serviceanbietern, zum anderen der damit verbundene Mehrwert einer zentralen Vermittlungsplattform steigt.

Im Gegensatz zur Vielzahl an UPs gibt es nur eine MP, an die alle UPs angebunden sind. Um das bestehende Angebot an Services und Märkten für alle Unternehmen unter möglichst geringem Aufwand nutzbar zu machen und die Attraktivität für neue Teilnehmer zu erhöhen, sollen diese auf der MP gebündelt werden. Hierbei ist hervorzuheben, dass die MP einen integrierenden Charakter aufweist und somit nicht als Konkurrenz zu bereits bestehenden Lösungen und Märkten zu sehen ist, d.h. sie stellt eine Meta-Plattform dar. Die Integration der drei relevanten Gruppen gelingt durch die Entwicklung einer einheitlichen Kommunikation, etwa durch die Beschreibung von Flexibilität in Form eines übergreifenden Energieflexibilitätsdatenmodells (siehe Abschnitt 2.4) oder die Bereitstellung von einheitlichen Schnittstellen zu verschiedenen Services. Die im ersten Schritt vorgesehenen Services, welche die MP vermittelt, umfassen unter anderem Prognosen von Preiszeitreihen, ein Tool für den optimierten Einsatz von Flexibilität, einen lokalen Flexibilitätsmarkt sowie die Anbindung eines Aggregators.

Durch die Einbindung vieler bestehender Lösungen sowie die Möglichkeit der kontinuierlichen Anbindung neuer Märkte und Services wird der Wettbewerb gefördert, da die entstehende Vergleichbarkeit der Angebote für mehr Markttransparenz sorgt. Gleichzeitig wird durch die oben beschriebene Standardisierung der Wechsel zwischen Serviceanbietern erleichtert. So können etwa zukünftig die heute zum Teil sehr individualisierten Lösungen mit Dienstleistern und der daraus resultierende Vendor-Lock-In vermieden werden, was sinkende Transaktionskosten zur Folge hat und die Gefahr von hohen Wechselkosten durch individuelle Anpassungen beim Wechsel des Aggregators minimiert.

Darüber hinaus wurde in enger Abstimmung mit den Verantwortlichen der UP ein Optimierungsservice entwickelt, der die durch den Einsatz von Flexibilität erzielbaren Erträge an verschiedenen Flexibilitätsmärkten anhand aktueller oder prognostizierter Preiszeitreihen maximiert. Dieses sog. Flexibilitätseinsatzplanungstool ermöglicht es Unternehmen, die Potenzialanalyse sowie die Flexibilitätseinsatzplanung unabhängig von Aggregatoren durchzuführen. Dieses Beispiel zeigt, dass verschiedene von der MP vermittelte Services miteinander interagieren können müssen, sodass beispielsweise der Optimierungsservice auf die Preisprognosen eines anderen Service zugreift, was durch die Service-Broker-Architektur der MP ermöglicht wird. Dadurch wird eine neue Anlaufstelle für innovative Energiedienstleistungen

bereitgestellt und freier Wettbewerb zwischen den Anbietern von Services geschaffen (Schott et al. 2018; Bauer et al. 2017a).

Als weiterer Aspekt ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den Stromverbrauchs- und Energiekostendaten eines Unternehmens um sensible Informationen handelt, weshalb für die MP Sicherheitsstandards eingehalten werden müssen (siehe Abschnitt 4.1).

Zusammenfassend sollen folgende zentrale Anforderungen durch die MP erfüllt werden:

- Im Zentrum der Marktplattform und der angebundenen Services steht die Vermittlung des standardisierten Handels von Flexibilität.
- Über die MP bieten Unternehmen ihre Flexibilität auf verschiedenen Märkten an. Es erfolgt kein Flexibilitätsclearing durch die MP.
- Zur Flexibilitätsoptimierung und -bewertung können über die Plattform spezialisierte Services bezogen werden.
- Die MP vermittelt dezentral Service- und Datenleistungen zwischen Anbietern und Nutzern.
- Die MP muss eine Vielzahl miteinander kombinierbarer Anwendungsfälle abbilden können.
- Die MP bietet geeignete Sicherheitsmechanismen für ihre Teilnehmer, sowohl in Bezug auf Zugriffsrechte innerhalb der Plattform als auch durch Angriffe von außen.

2.3 Process Layer

Der Process Layer beschreibt die Interaktionen zwischen UP und MP, welche für den standardisierten Handel von Energieflexibilität notwendig sind. Im Folgenden werden die Prozesslandkarte der ESP sowie die Kernprozesse beschrieben. Die Prozesse werden mit Hilfe der Business Process Modelling Notation (BPMN) dargestellt.

2.3.1 Prozesslandkarte der Energiesynchronisationsplattform

Im Projekt wurden MP- und UP- spezifische Prozesse identifiziert und mit Hilfe von BPMN modelliert. Auf Basis dessen wurde die Prozesslandkarte der ESP entworfen (in Anlehnung an Rösch et al. (2019a)), siehe Abbildung 7.

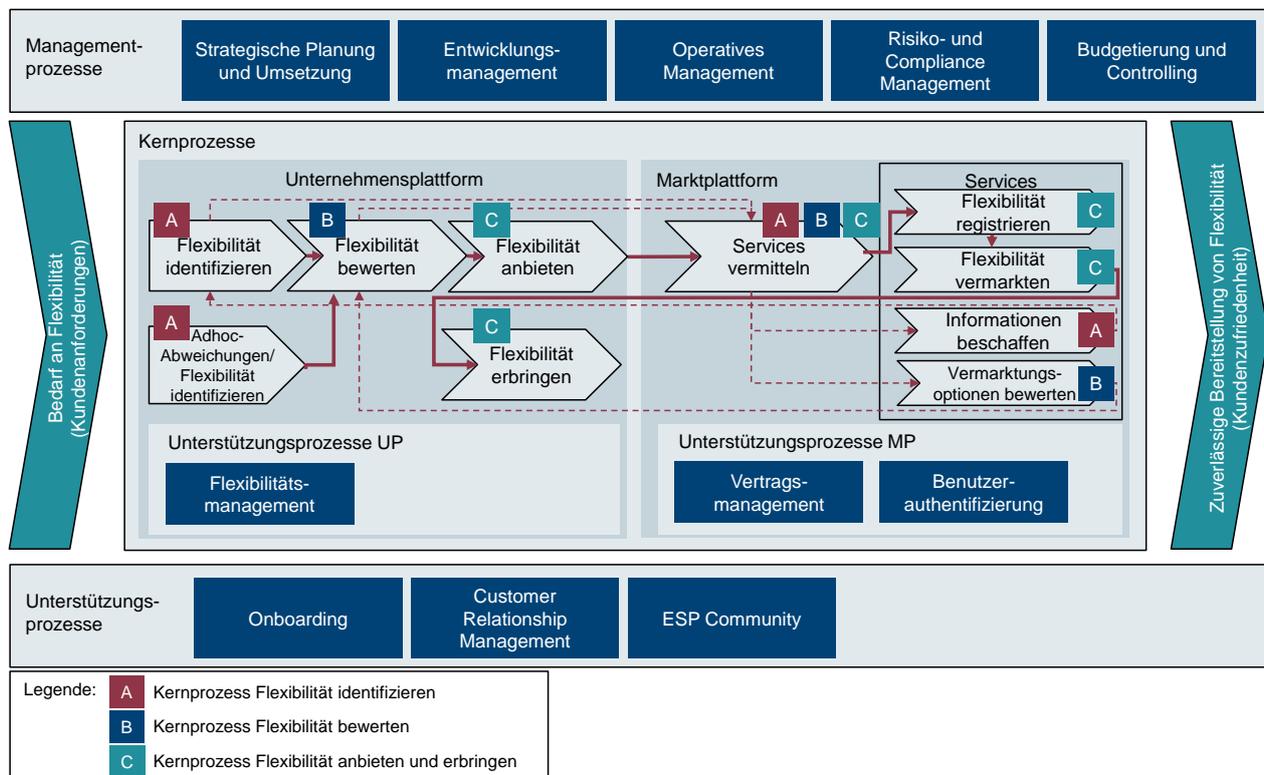


ABBILDUNG 7: PROZESSLANDKARTE DER ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM

Die Prozesslandkarte bildet alle Prozesse ab, welche notwendig sind, um den Bedarf an Flexibilität (Kundenanforderung) durch deren zuverlässige Bereitstellung (Kundenzufriedenheit) zu erfüllen. Einige der Prozesse betreffen einzelne Teilplattformen, also UP oder MP, wohingegen sich andere Prozesse über die ganze ESP erstrecken. Die Prozesse können außerdem unterteilt werden in (Porter 1985):

- Kernprozesse: Kernprozesse schaffen einen Mehrwert für den Kunden und reichen auf der ESP von der Identifikation der Energieflexibilität bis zu ihrer Erbringung und erfüllen somit das Ziel, Angebot und Nachfrage zu synchronisieren. Ein Zusammenspiel der Teilplattformen MP und UP ist notwendig, um dieses Ziel zu erfüllen.
- Unterstützungsprozesse: Diese Prozesse sind notwendig, um das erfolgreiche Zusammenspiel der beiden Teilplattformen zu gewährleisten. Die Unterstützungsprozesse können in drei Ebenen unterteilt werden:

- übergreifende Unterstützungsprozesse, welche sich auf die plattformübergreifende Kommunikation und Optimierung zwischen den Plattformen und gegenüber Dritten fokussieren. Plattformübergreifender Unterstützungsprozess ist beispielsweise das Onboarding der Plattformteilnehmer. Die ESP-Community ist ein ergänzender Service, in dem die ESP-Teilnehmer über eine Art Forum bewährte Praktiken und Wissen austauschen können.
- MP- und UP- spezifische Unterstützungsprozesse, welche nicht mit der jeweils anderen Plattform interagieren und die Funktion der Teilplattformen gewährleisten.
- Managementprozesse: Managementprozesse setzen den Rahmen für Kern- und Unterstützungsprozesse, indem sie eine Strategie festlegen, Entwicklungsprozesse etablieren, ein zuverlässiges Qualitäts- sowie Risiko- und Compliance-Management gewährleisten und einen finanziellen Rahmen in Form von Budgetierung und Controlling für die ESP bereitstellen.

2.3.2 Kernprozesse der Energiesynchronisationsplattform

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Kernprozesse der ESP von der Identifikation der Energieflexibilität bis zu ihrer Erbringung mit Fokus auf das Zusammenspiel zwischen UP und MP beschrieben. Sie starten und enden auf der UP und nutzen das Funktions- und Serviceangebot der MP zur Unterstützung der Unternehmen bei der Flexibilitätsidentifizierung, der Flexibilitätsbewertung oder dem Flexibilitätshandel (siehe Abbildung 7). Kernprozesse erfüllen das übergeordnete Ziel der ESP, Angebot und Nachfrage zu synchronisieren. Je nach gewünschtem Ergebnis können diese ganz oder teilweise durchlaufen werden.

- A. Flexibilität identifizieren: Dieser Kernprozess der UP bildet die Grundlage zur späteren Vermarktung von Flexibilität. Der Prozess umfasst außerdem die Teilprozesse „Services vermitteln“ und „Informationen beschaffen“. Da auch der Teilprozess „Informationen beschaffen“ durch das Zusammenspiel aus UP und MP gekennzeichnet ist, wird dieser ebenfalls im Folgenden beschrieben. Dieser Prozess dient der Informationsbeschaffung über Services auf der MP, z. B. Strompreisprognosen.
- B. Flexibilität bewerten: In diesem Kernprozess werden alle notwendigen Informationen ausgetauscht, um Services zur Bewertung von Flexibilität zu nutzen. Der Prozess umfasst außerdem die Teilprozesse „Services vermitteln“ und „Vermarktungsoptionen bewerten“.
- C. Flexibilität anbieten und erbringen: Hierbei werden alle notwendigen Informationen ausgetauscht, um Flexibilität vermarkten zu können. Der Prozess umfasst außerdem die Teilprozesse „Services vermitteln“, „Flexibilität registrieren“ und „Flexibilität vermarkten“.

A. Flexibilität identifizieren:

Die nachfolgenden Erläuterungen basieren auf der Annahme, dass die möglichen EFM der betrachteten Produktionsprozesse bereits identifiziert sind. Der Prozess zur Identifikation von Flexibilität dient daher ihrer IT-seitigen Abbildung (siehe Abbildung 8):

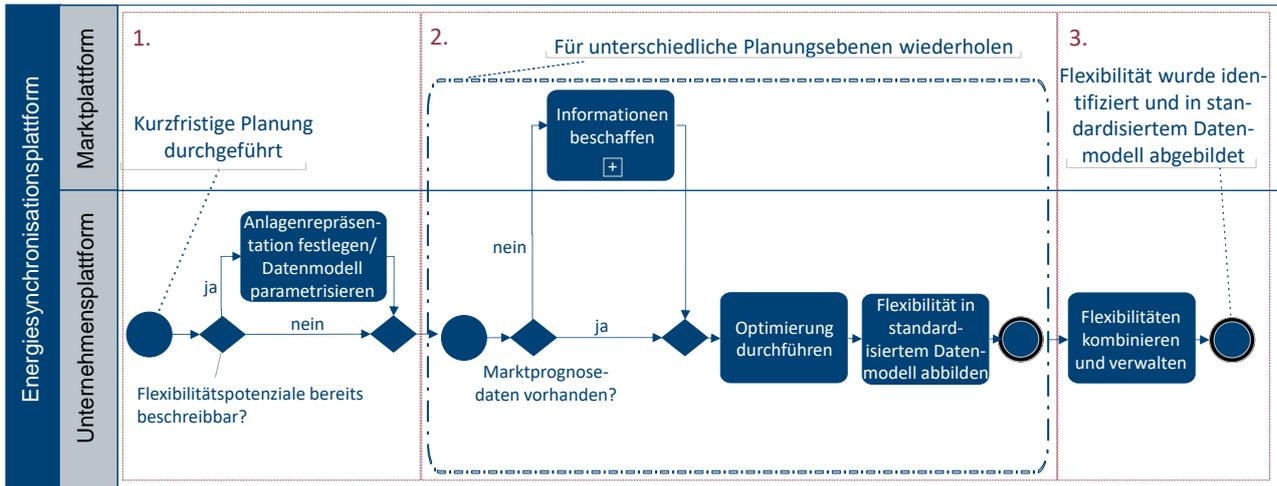


ABBILDUNG 8: PROZESS FLEXIBILITÄT IDENTIFIZIEREN

1. Die Anlagenrepräsentation wird hinterlegt, indem die Flexibilität in einem standardisierten Datenmodell abgebildet wird (Befüllung aus Steuerungsvariablen; Steuerungsbefehle zur Umsetzung festlegen) (siehe Abschnitt 2.4). Auch bereits identifizierte anlagenunabhängige Flexibilitätspotenziale können als Eingangsparameter für nachfolgende Optimierungen in einem standardisierten Datenmodell abgebildet werden.
2. Um volatile Strommärkte als Chance für die Vermarktung von Flexibilität nutzen zu können, bedarf es einer Integration der Steuergröße Energie. Dies hat eine weitreichende Änderung aller Ebenen zur Folge, da Produktionsdaten und -parameter auf prognostizierte Preise der Energiemärkte optimiert werden müssen, um dynamisch auf die schwankenden Preise des volatilen Strommarkts der Zukunft reagieren zu können. Eine zentrale Optimierung aller Prozesse eines Unternehmens ist zwar anzustreben, erscheint aber vor dem Hintergrund der hohen Komplexität häufig nicht möglich. Aus diesem Grund wird innerhalb der UP eine flexible und verteilte Architektur der Services präferiert (Schel et al. 2018a). Je nach Vermarktungsstrategie und Art der wesentlichen Verbraucher bieten sich dabei Optimierungen für unterschiedliche Produktionsebenen im Zusammenspiel mit unterschiedlichen Energiemärkten an. Im einfachsten Fall verläuft eine Energiemarktoptimierung über bereits identifizierte Flexibilitätspotenziale mithilfe von Services auf der MP (siehe Kernprozess „Flexibilität bewerten“). Für unternehmensspezifische Analysen der EFM im Kontext der jeweiligen Ebene der Automatisierungspyramide stellen Services auf der UP Lösungen bereit, die individuell eingesetzt und kombiniert werden können. Energieflexibilität wird auf der Feldebene maschinennah in Form von Steuerungsgrößen der entsprechenden Anlagen formuliert, wohingegen auf Ebene der Produktionssteuerung Aufträge und deren logistische Handhabung im Fokus stehen. Der Abstraktionsgrad sowie der zeitliche Horizont von EFM steigen mit jeder Stufe der Automatisierungspyramide an. Services auf der UP können sich je nach Art und Größe der Verbraucher sowie Vermarktungsstrategie der Unternehmen und vorhandener IT-Infrastruktur ergänzen oder nebeneinander existieren. Sie orientieren sich sinnvollerweise

an der bereits bestehenden Automatisierungspyramide. Die einzelnen Ebenen werden dabei um eine energiemarktorientierte Optimierung erweitert. Services nutzen also jeweils die Optimierungsergebnisse der nächsthöheren Produktionsebene. Ein MES-Optimierer (Manufacturing Execution System) liefert beispielsweise auf Basis von Strompreisprognosen, die über eine von der MP vermittelten Service bezogen werden, einen energieorientierten Produktionsplan und identifiziert Potenziale für Verschiebungen von Aufträgen. Diese Informationen werden als Randbedingungen für einen maschinennahen Optimierer genutzt, um weitere EFM an der Maschine zu identifizieren. Verbleibende EFM, die unter anderem durch sehr dynamische und kurzfristige Veränderungen des Energiemarkts gekennzeichnet sein können, werden zur Umsetzung und Vermarktung direkt an die von der MP vermittelten Zielservices gemeldet.

- Die endgültige Beschreibung der Flexibilität setzt sich zusammen aus der Vorauffüllung der Anlagenrepräsentation und des Datenmodells sowie Ergänzungen und Veränderungen aus übergeordneten Services zur Optimierung. Hierzu wird die durch die einzelnen Services identifizierte Flexibilität in Form der ausgefüllten Datenmodelle kombiniert (aggregiert) und zentral verwaltet.

Bei kurzfristigen Abweichungen von der geplanten Produktion („Adhoc-Abweichungen“) wird der Prozess „Flexibilität identifizieren“ erneut durchlaufen, um auf Basis der veränderten Ausgangssituation Flexibilität zur Vermarktung zu identifizieren. Dieser unterscheidet sich lediglich durch das Startereignis ausgelöst durch die kurzfristige Abweichung.

Teilprozess „Informationen beschaffen“

Über die von der MP vermittelten Services können für UP-Services Informationen unterschiedlicher Art (siehe Abschnitt 2.4) bereitgestellt werden, die auf der UP zur Erfüllung spezifischer Funktionalitäten genutzt werden können. Für den von der MP vermittelten Service, der einem Unternehmen Informationen liefert, muss eine Konfigurationsdatei zur Verfügung gestellt werden. Diese definiert beispielsweise eine REST-API-Schnittstelle (Representation-State-Transfer-Paradigma, Application Programming Interface) und legt fest, wie Anfragen und deren Antworten aussehen. Die Konfigurationsdatei wird im entsprechenden Service auf der UP eingelesen und über eine Middleware dem anfragenden Service zur Verfügung gestellt. Folgende Schritte sind zur Beschaffung von Informationen notwendig (siehe Abbildung 9):

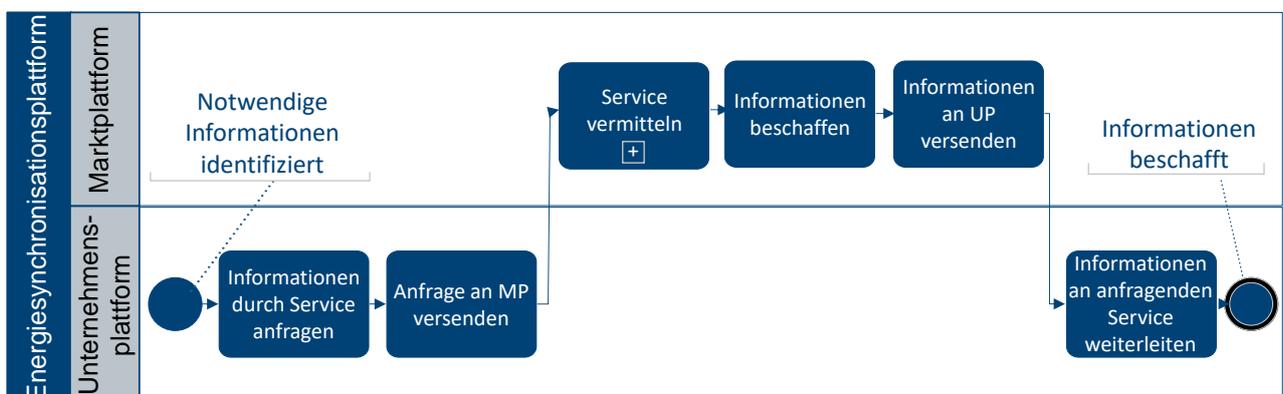


ABBILDUNG 9: TEILPROZESS INFORMATIONEN BESCHAFFEN

- Informationen werden über eine Middleware durch einen entsprechenden unternehmensseitigen Service zur Informationsbeschaffung angefragt.

2. Dieser leitet die Anfrage unter Nutzung der Konfigurationsdatei an die MP weiter.
3. Über den Service Broker auf der MP wird die Anfrage an den Zielservice vermittelt.
4. Die Beschaffung der angefragten Informationen erfolgt über den vermittelten Zielservice, welcher die Anfrage bearbeitet.
5. Der entsprechende Zielservice sendet die bearbeitete Anfrage an den Absender der UP samt der angefragten Information zurück.
6. Dieser leitet die Anfrage über eine Middleware an den anfragenden Service weiter.

B. Flexibilität bewerten

Zur Bewertung von Energieflexibilität gilt erneut die Voraussetzung der vorgelagerten Identifikation von Energieflexibilität. Nachfolgend werden die zusätzlichen Informationsflüsse der Bewertung beschrieben (siehe Abbildung 10):

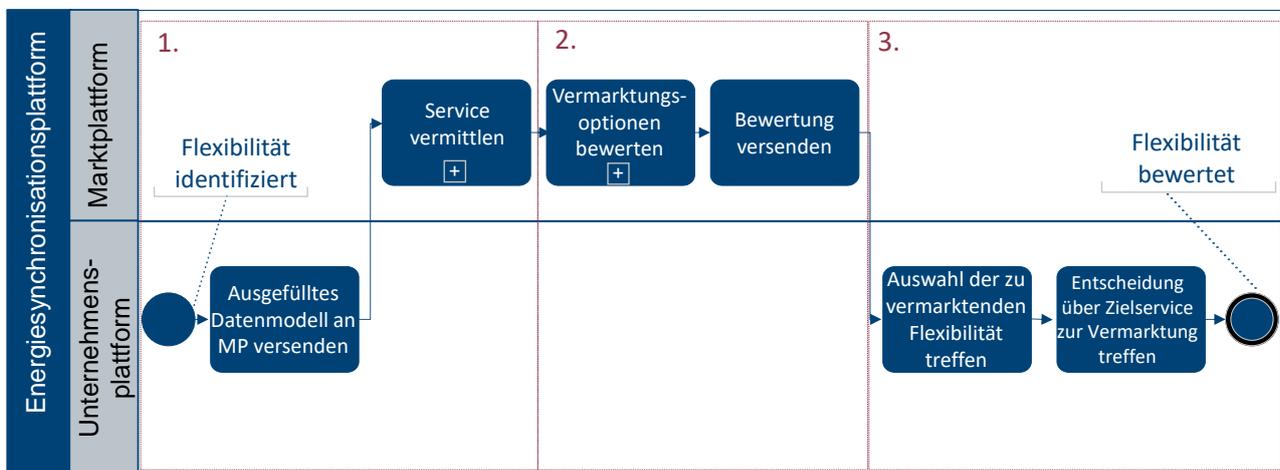


ABBILDUNG 10: PROZESS FLEXIBILITÄT BEWERTEN

1. Die zu bewertende Flexibilität wird als Flexibilitätsraum an einen Service zur Bewertung über den Service Broker der MP an einen Service der MP vermittelt.
2. Bewertung mit Services der MP: Die Bewertung der Vermarktungsmöglichkeiten des Flexibilitätsraums erfolgt durch einen Service oder eine Kooperation von Services der MP (z.B. dem Flexibilitätseinsatzplanungstool, siehe Abschnitt 2.5.2.2). Der Service zur Bewertung sendet das Ergebnis in Form der bewerteten (optimalen) Flexibilitätsmaßnahme an den Service zur Verwaltung auf der UP.
3. Der Service zur Verwaltung der Flexibilitätsmaßnahmen und -räume stellt das Ergebnis dar, und lässt die Flexibilitätsmaßnahme in einen eventuellen Vermarktungsprozess einfließen. Die Entscheidung, welche Flexibilität an welchen Märkten und damit welchem Zielservice über die MP vermarktet werden soll, wird entweder manuell über eine grafische Oberfläche, z.B. von einem Energiemanager oder Produktionsleiter, oder automatisiert per API getroffen.

C. Flexibilität anbieten und erbringen

Die nachfolgenden Erläuterungen basieren auf der Annahme, dass die EFM der betrachteten Prozesse bereits bewertet sind und die Entscheidung über den Zielservice zur Vermarktung auf der MP bereits getroffen wurde. Ist dies erfolgt, sind folgende Schritte für die Vermarktung und Erbringung von Energieflexibilität notwendig (siehe Abbildung 11):

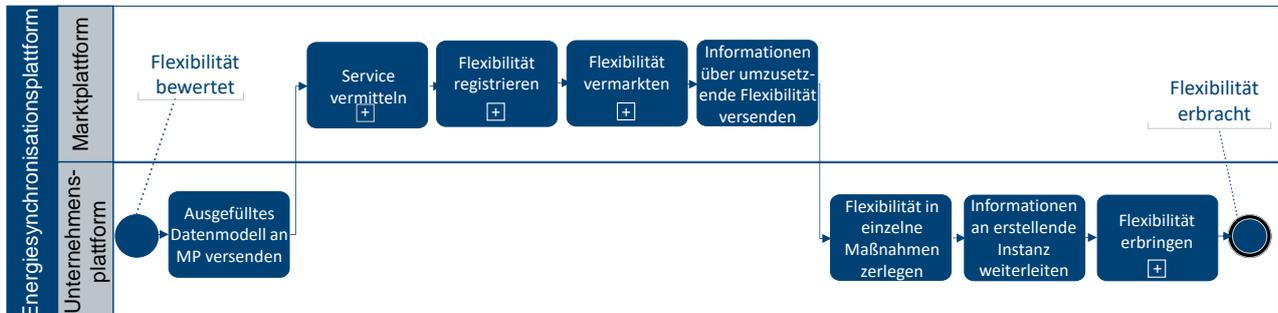


ABBILDUNG 11: PROZESS FLEXIBILITÄT ANBIETEN UND ERBRINGEN

1. Die zu vermarktende Flexibilität wird in Form einer Flexibilitätsmaßnahme an die MP versendet.
2. Über den Service Broker wird diese an den Zielservice auf der MP vermittelt, welche den nächsten Kernprozess „Flexibilität vermarkten“ anstößt.
3. Die Flexibilität wird in einem Service zur Vermarktung (z.B. Aggregatorflexibilitätshandel) registriert.
4. Die Vermarktung der Flexibilität läuft über einen oder mehrere Services der MP ab.
5. Die umzusetzende Flexibilitätsmaßnahme wird vom Service zur Vermarktung an den Service zur Verwaltung auf der UP gesendet.
6. Es wird geprüft, ob es sich bei der umzusetzenden Flexibilitätsmaßnahme um eine Kombination von Flexibilitätsmaßnahmen handelt. Falls ja, wird dieses in die Datenmodelle der einzelnen Maßnahmen aufgeteilt.
7. Die einzelnen Flexibilitätsmaßnahmen werden an deren erstellende Instanzen weitergeleitet.
8. Der Prozess wird mit der Erbringung der Flexibilität abgeschlossen. Beispielsweise verarbeitet der Smarte Konnektor die umzusetzende Flexibilitätsmaßnahme zum Umsetzungsdatum zu Steuersignalen und übermittelt diese an die SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung). Dadurch wird der Prozess angepasst und die Flexibilität umgesetzt. Zusätzlich müssen auf der UP Prozesse wie beispielsweise eine Fahrplanaktualisierung für den Bilanzkreisverantwortlichen angestoßen werden, um den vorgeschriebenen Richtlinien des Bilanzkreismanagements nachzukommen.

2.4 Information Layer

Der Information Layer beschreibt die Informationen, die zwischen Funktionen, Diensten und Komponenten zur Erfüllung der im Process Layer aufgezeigten Prozesse ausgetauscht werden. Mit dem Information Layer werden zugrundeliegende Informationsobjekte und Datenmodelle definiert. Im Folgenden wird das Energieflexibilitätsdatenmodell (EFDM) als zentrales Kommunikationselement beschrieben.

2.4.1 Energieflexibilitätsdatenmodell

Das im Rahmen von SynErgie entwickelte EFDM dient zur generischen und standardisierten Beschreibung sowie Modellierung von Energieflexibilität (Schott et al. 2019). Das Datenmodell ermöglicht eine (teil-)automatisierte informationstechnische Verarbeitung unterschiedlichster Flexibilitäten. Finales Ziel ist es, ein umfassendes Datenmodell zu entwickeln, um Flexibilität in realistischer Komplexität in einem Flexibilitätsraum und konkrete Flexibilitätsmaßnahmen abzubilden. Das Datenmodell ist somit die zentrale Grundlage für alle darauf operierenden Services. Ausgehend davon können Modelle für spezielle Anwendungsfälle, beispielsweise zur Optimierung, abgeleitet werden, die nur einen Teil der Informationen des zentralen Datenmodells beinhalten. Hierbei ist es von großer Bedeutung, dass die abgeleiteten Modelle ineinander überführbar sein müssen. Nur so ist die Interoperabilität der UP und der MP gewährleistet. Die Verknüpfung zu den einzelnen Anlagen ermöglicht der Smarte Konnektor (siehe Abschnitt 2.5.1). Zusätzlich ermöglicht eine Transformationskomponente aufseiten der MP eine Überführung des SynErgie-EFDMs in proprietäre Datenmodelle von Service Providern oder Aggregatoren und ermöglicht damit die durchgängige bilaterale Kommunikation von Energieflexibilität von der Maschine bis zum Zielservice. Eine einfache, allgemeine Übersicht über die verwendeten Klassen im EFDM gibt Abbildung 12, mit jeweils einer einfachen Beschreibung. Für ausführliche Beschreibungen und Definitionen sei auf Schott et al. (2019) verwiesen.

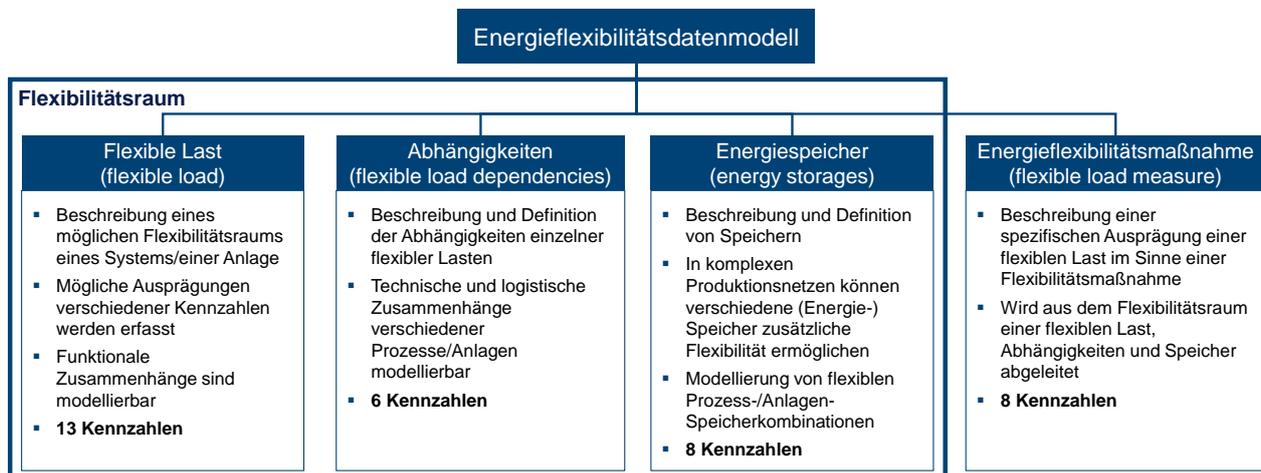


ABBILDUNG 12: KLASSEN DES ENERGIEFLEXIBILITÄTSDATENMODELLS

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

beschrieben. Neben den drei genannten Klassen zur Beschreibung des Flexibilitätsraums eines Systems, gibt es im EFDM auch die Klasse „Energieflexibilitätsmaßnahme“, die eine konkrete Leistungsänderung des Systems innerhalb seines Flexibilitätsraums beschreibt. Eine flexible Last modelliert ein technisches System oder das Zusammenspiel verschiedener technischer Systeme, die das Potenzial haben, eine Leistungsänderung hervorzubringen. Ob es sich bei dem technischen System um einen Erzeuger oder Verbraucher von Leistung handelt, ist dabei irrelevant. Bei der Definition einer flexiblen Last werden lediglich Beschränkungen der Leistungserbringung bzw. der energetischen Freiheitsgrade an sich berücksichtigt. Abhängigkeiten zu anderen flexiblen Lasten oder zu Energiespeichern werden nicht in der flexiblen Last modelliert. In Tabelle 1 sind die zur Beschreibung der Klasse „flexible Last“ relevanten Kennzahlen sowie ihrer Ausprägungen und Definitionen aufgeführt.

TABELLE 1: KENNZAHLEN DER KLASSE "FLEXIBLE LAST" DES ENERGIEFLEXIBILITÄTSDATENMODELLS

Kennzahl	Variable	Format	Einheit	Erläuterung
Energieflexibilitäts-ID	ID	String	–	
Reaktionsdauer	t_{tot}	$2^{\mathbb{R}_0^+}$	s	Die Zeit zwischen dem Abruf und dem Beginn der Leistungsänderung.
Gültigkeit	T_G	$2^{\mathcal{H}} \times \{ 'start', 'total', 'end' \}$	s	Die drei Referenzen („start“, „total“ und „end“) definieren, welche Teile der Gesamtzeit der zugehörigen flexiblen Maßnahme in der Gültigkeit liegen müssen.
Leistungszustände	P	$2^{\mathbb{R}}$	kW	Die Leistungen, mit denen die flexible Last während jeder der (Anzahl der Veränderungen + 1) Halteperioden laufen kann. Ein positives Vorzeichen bedeutet, dass die flexible Last einen Anstieg des Stromverbrauchs verursacht, negative Leistungszustände stellen einen Rückgang des Verbrauchs dar.
Halteperiode	t_H	$2^{\mathbb{R}}$	s	Die Länge der Zeiträume, in denen die flexible Last in ihren Leistungszuständen läuft. Jede Halteperiode ist die Zeit mit konstantem Leistungszustand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Modulationen.
Abrufhäufigkeit	N_A	$2^{\mathbb{N}}$	-	Die zulässige Anzahl der Nutzungen der flexiblen Leistung im Planungshorizont.
Anzahl an Veränderungen (des Leistungszustands)	N_{Mod}	$2^{\mathbb{N}}$	-	Die Anzahl der zulässigen Leistungszustandsänderungen innerhalb einer Nutzung einer flexiblen Last, wobei die beiden Modulationen, die der anfänglichen Aktivierung und der endgültigen Deaktivierung entsprechen, nicht berücksichtigt werden.
Leistungsgradient Aktivierung	∇P_{Akt}	$2^{\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}}$	kW · s ⁻¹	Der Gradient, mit dem die Leistungskurve bei der anfänglichen Aktivierung ihre Leistung ändern kann. Wenn der Leistungszustand zunimmt, hat der Aktivierungsgradient ein positives Vorzeichen.
Leistungsgradient Veränderungen (des Leistungszustands)	∇P_{Mod}	$2^{\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}}$	kW · s ⁻¹	Analog zum Aktivierungsgradienten für die Modulationsperioden.
Leistungsgradient Deaktivierung	∇P_{Dea}	$2^{\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}}$	kW · s ⁻¹	Analog zum Aktivierungsgradienten für die endgültige Deaktivierungsperiode.

Regenerationsdauer	t_{Reg}	$2^{\mathbb{R}_0^+}$	s	Die Zeit, für die nach Beendigung der Deaktivierung einer Maßnahme aus der flexiblen Last keine (andere) Maßnahme derselben flexiblen Last aktiviert werden darf.
Kosten	c	$2^{\mathbb{R}}$	€	Die mit der Nutzung der flexiblen Last verbundenen Kosten, Stromkosten ausgenommen.
Standort und Spannungsebene	$S; U_L$	String; $2^{\mathbb{N}}$	- ; kV	Der Standort, an dem die flexible Last erbracht wird, und die Spannungsebene, an der sie ans Netz angeschlossen ist.

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

TABELLE 2: KENNZAHLEN DER KLASSE "ENERGIESPEICHER" DES ENERGIEFLEXIBILITÄTSDATENMODELLS

Kennzahl	Variable	Format	Einheit	Erläuterung
Speicher-ID	ID	String	–	Die ID des Speichers, zur Identifikation und Zuordnung innerhalb eines IT-Systems in einem Unternehmen.
Nutzbare Speicherkapazität	$E_{Speicher}$	$2^{\mathbb{R}}$	kWh	Gewöhnlich gegeben durch ein Intervall, dessen untere Grenze des Speicherenergiegehalts nie unterschritten und dessen obere Grenze des Energiegehalts nie überschritten werden darf.
Anfangsenergiegehalt inkl. Zeitpunkt	E_{t_0}	$\mathbb{R} \times \mathcal{H}$	(kWh, s)	Energieinhalt des Speichers zum gegebenen Zeitpunkt.
Zielenergiegehalt inkl. Zeitpunkt	E_{Ziel}	$2^{\mathbb{R}} \times \mathcal{H}$	(kWh, s)	Der Energieinhalt, den der Speicher zum Zeitpunkt des Zeitstempels aufweisen muss (der im Planungshorizont enthalten sein muss).
Energieverluste	$E_{Verlust}$	[0,1]	$\% \cdot s^{-1}$	Anteil des Energieinhalts, der in jedem Zeitraum verloren geht, z.B. durch Austausch mit der Umwelt.
Versorgungssysteme	S_V	$(string \times 2^{\mathbb{R}})^n$	(kW, –)	Eine Reihe von flexiblen Lasten, die den Speicher versorgen. Bei jedem Versorgungssystem gibt es einen zusätzlichen Parameter, die Umwandlungseffizienz. Es gilt zu beachten, dass der Umwandlungswirkungsgrad von den Kennzahlen der zugehörigen flexiblen Last des

				Versorgungssystemen abhängen kann.
Nichtbeeinflussbarer Energiebedarf	E_B	$Abb(\mathcal{H}; \mathbb{R})$	(s \mapsto kW)	Ein nicht beeinflussbarer Energiebedarf, der während der Produktion bedient werden muss.
Kosten	c	$Abb(Abb(\mathcal{H}; \mathbb{R}); \mathbb{R})$	((s \mapsto kW) \mapsto €)	Kosten im Zusammenhang mit der Nutzung des Speichers, die nur vom (zeitabhängigen) Energieinhalt des Speichers abhängen.

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

TABELLE 3: KENNZAHLEN DER KLASSE "ABHÄNGIGKEIT" DES ENERGIEFLEXIBILITÄTSDATENMODELLS

Kennzahl	Variable	Format	Einheit	Erläuterung
Trigger-Energieflexibilität	ID_{Tri}	String	–	Die ID der flexiblen Last, die die Abhängigkeit auslöst.
Ziel-Energieflexibilität	ID_{Tar}	String	–	Die ID der flexiblen Last, die von der auslösenden flexiblen Last betroffen ist.
Logische Verknüpfung	Typ_{Log}	{'implies', 'excludes'}	–	Gibt an, ob eine Verwendung der Trigger-Energieflexibilität erfordert, dass auch die Ziel-Energieflexibilität verwendet wird („implies“/„impliziert“) oder verhindert, dass die Ziel-Energieflexibilität verwendet werden kann („excludes“/„ausschließt“).
Zeitliche Verknüpfung	Typ_{Zeit}	{'start', 'total', 'end'} ²	–	Die Anteile („start/Start“, „total/Gesamt“, „end/Ende“) der auslösenden Trigger-Energieflexibilität (erste Komponente) und der Ziel-Energieflexibilität (zweite Komponente), die von der Abhängigkeit betroffen sind.
Anwendungsdauer	t_A	$2^{\mathbb{R}}$	s	Der Zeitraum, für den nach Verwendung der Trigger-Energieflexibilität die Ziel-Energieflexibilität mindestens einmal („implies/impliziert“) oder gar nicht („excludes/ausschließt“) aktiviert werden muss. Dabei ist die jeweilige zeitliche Verknüpfung zu berücksichtigen.
Anwendungsbedingungen	A_c	$(2^{\mathbb{R}} \times 2^{\mathbb{R}})^n$	–	Zusätzliche Bedingungen, die so erfüllt sein müssen, dass die Abhängigkeit als erfüllt gilt. Mit anderen Worten, eine Aktivierung der Trigger-Energieflexibilität impliziert eine zugehörige Aktivierung der Ziel-Energieflexibilität in einer Konfiguration (Maßnahme), so dass die Anwendungsbedingungen erfüllt sind.

Neben den drei Klassen „flexible Last“, „Energiespeicher“ und „Abhängigkeiten“ zur Beschreibung des Flexibilitätsraumes beschreibt eine **EFM** eine bewusste Aktion zur Durchführung eines definierten Zustandswechsels in einem Produktionssystem, und die damit verbundenen Wechselwirkungen im Produktionssystem (VDI-Richtlinie 5207 Blatt 1; Schott et al. 2019). Dies geht mit einer konkreten Leistungsänderung innerhalb des Flexibilitätsraums einher, weist selbst keine Freiheitsgrade mehr auf und ist zeitlich terminiert. Tabelle 4 zeigt die einzelnen Kennzahlen zur Beschreibung konkreter EFM's.

TABELLE 4: KENNZAHLEN DER KLASSE "ENERGIEFLEXIBILITÄTSMAßNAHME" DES ENERGIEFLEXIBILITÄTSDATENMODELLS

Kennzahl	Variable	Format	Einheit	Erläuterung
Energieflexibilitäts-ID	ID	String	—	Die ID der Flexibilitätsmaßnahme.
Reaktionsdauer	t_{tot}	\mathbb{R}_0^+	s	Die Zeit zwischen dem Abruf und dem Beginn einer Flexibilitätsmaßnahme. Diese Kennzahl ist für die korrekte und rechtzeitige Ausführung von Flexibilitätsabrufen von Bedeutung.
Startzeitpunkt	t_0	\mathcal{H}	s	Der Zeitpunkt, zudem die Flexibilitätsmaßnahme gestartet/abgerufen wird.
Leistungszustände	P	\mathbb{R}^m	kW	Die Leistungen, mit denen die Flexibilitätsmaßnahme während jeder der (Anzahl der Veränderungen + 1) Halteperioden läuft. Ein positives Vorzeichen bedeutet, dass die flexible Last einen Anstieg des Stromverbrauchs verursacht, negative Leistungszustände stellen einen Rückgang des Verbrauchs dar.
Haltedauer	t_H	\mathbb{R}^m	s	Die Länge der Zeiträume, in denen die flexible Leistung in ihren Leistungszuständen läuft. Jede Halteperiode ist die Zeit mit konstantem Leistungszustand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Modulationen, einschließlich Aktivierung und Deaktivierung.
Anzahl an Veränderungen (des Leistungszustands)	N_{Mod}	\mathbb{N}	-	Die Anzahl der Leistungszustandsänderungen innerhalb einer Nutzung der Flexibilitätsmaßnahme, wobei die beiden Modulationen, die der anfänglichen Aktivierung und der endgültigen Deaktivierung entsprechen, nicht berücksichtigt werden.
Leistungsgradienten	∇P	$\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}^{m+1}$	kW · s ⁻¹	Die Leistungsgradienten, die bei Änderungen von Leistungszuständen zu berücksichtigen sind. Wenn der Leistungszustand zunimmt, hat der Leistungsgradient ein positives Vorzeichen.
Kosten	c	\mathbb{R}	€	Die mit der Nutzung der Flexibilitätsmaßnahme verbundenen Kosten, Stromkosten ausgenommen.

2.5 Component Layer

Der Component Layer beschreibt die notwendigen Komponenten für den Betrieb sowohl der UP als auch der MP. Auf der UP und MP werden hierzu der Aufbau und die einzelnen Komponenten für den Betrieb der eigentlichen Plattform vorgestellt. Außerdem erfolgt eine ausführliche Beschreibung der essenziellen Integrationskomponenten wie dem Manufacturing-Service-Bus (MSB) für die Integration von IT-Systemen oder dem Smarten Konnektor für die Integration von Maschinen, aber auch der zusätzlichen Servicekomponenten.

2.5.1 Unternehmensplattform

2.5.1.1 Aufbau der UP

Die UP besteht aus der zugrundeliegenden Infrastruktur und Basiskomponenten (Stock et al. 2014; Schel et al. 2018a), welche in diesem Abschnitt beschrieben werden. Wie in Abbildung 13 dargestellt, bauen darauf die Services auf.

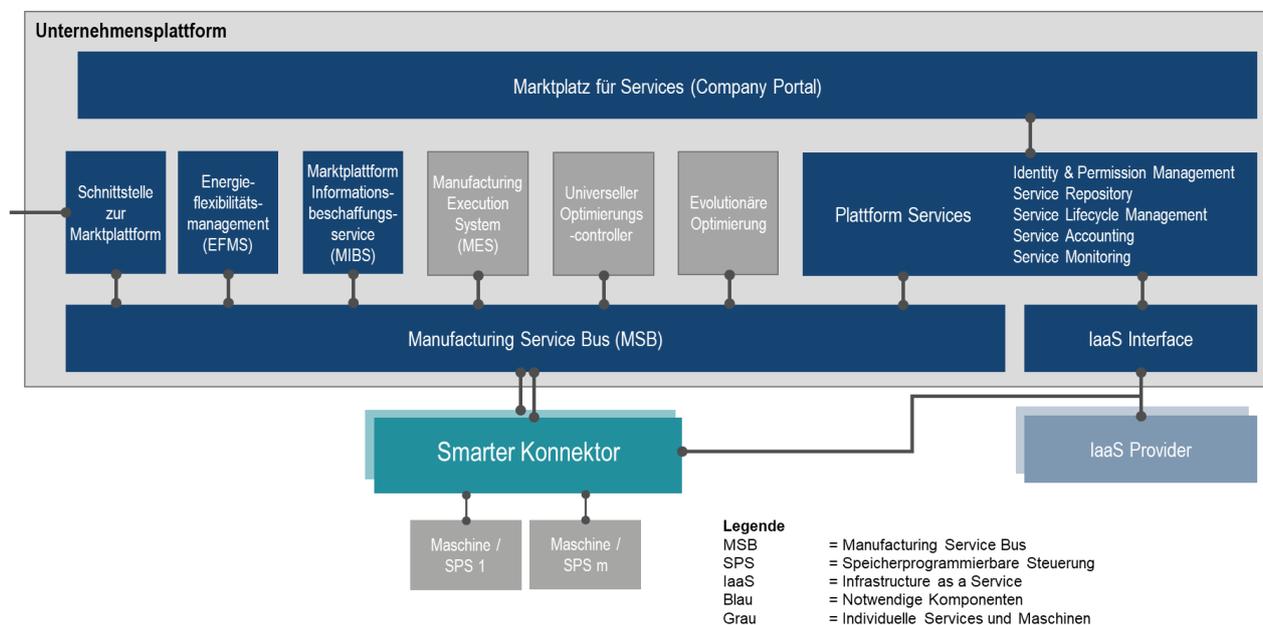


ABBILDUNG 13: ARCHITEKTUR DER UNTERNEHMENSPLATTFORM

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

Die **Plattform Services** ermöglichen das automatisierte Bereitstellen der über den Marktplatz ausgewählten Services sowie das Erzeugen der für die Bereitstellung notwendigen Automatisierungsroutinen. Sie sind somit ein Teil der Schicht »Platform as a Service« (PaaS) der UP, auf deren Basis »Software as a Service« (SaaS) realisiert wird. Diese Plattform Services sind nach ihrem Funktionsumfang wie folgt in mehrere Module aufgeteilt (Schel et al. 2018a):

- Identity & Permission Management: verwaltet Benutzer und Organisationen sowie das damit verbundene Rollen- und Rechtemodell

- Service Repository: verwaltet die verfügbaren Services mit ihrer fachlichen und technischen Beschreibung für eine automatisierte Instanziierung
- Service Lifecycle Management: verwaltet den Lebenszyklus einer Service-Instanz
- Service Accounting: stellt sicher, dass genutzte Leistungen eines Service abgerechnet werden können
- Service Monitoring: überwacht die Einhaltung der vereinbarten Service Level Agreements hinsichtlich der Verfügbarkeit von Services, aber auch der Servicequalität

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

Der **Manufacturing Service Bus (MSB)** ist eine einheitliche Integrationsschicht für alle Sensoren, Aktoren, Maschinen, Anlagen, IT-Systeme und Services im Unternehmen. Die allgemeine Architektur des MSB ist in Abbildung 14 dargestellt. Mittels sogenannter Integration Flows kann definiert werden, welche Daten und Informationen an welche angemeldeten Komponenten weitergeleitet werden. Zur herstellerunabhängigen Integration werden offene Schnittstellen und Standards genutzt. Diese umfassen einerseits industrielle Kommunikationsprotokolle (OPC UA, ROS etc.), andererseits Protokolle aus der Informationstechnik (REST, Websocket, MQTT etc.). Durch den modularen Aufbau können weitere Standards durch die Abstraktionsschicht namens Broker aufwandsarm integriert werden.

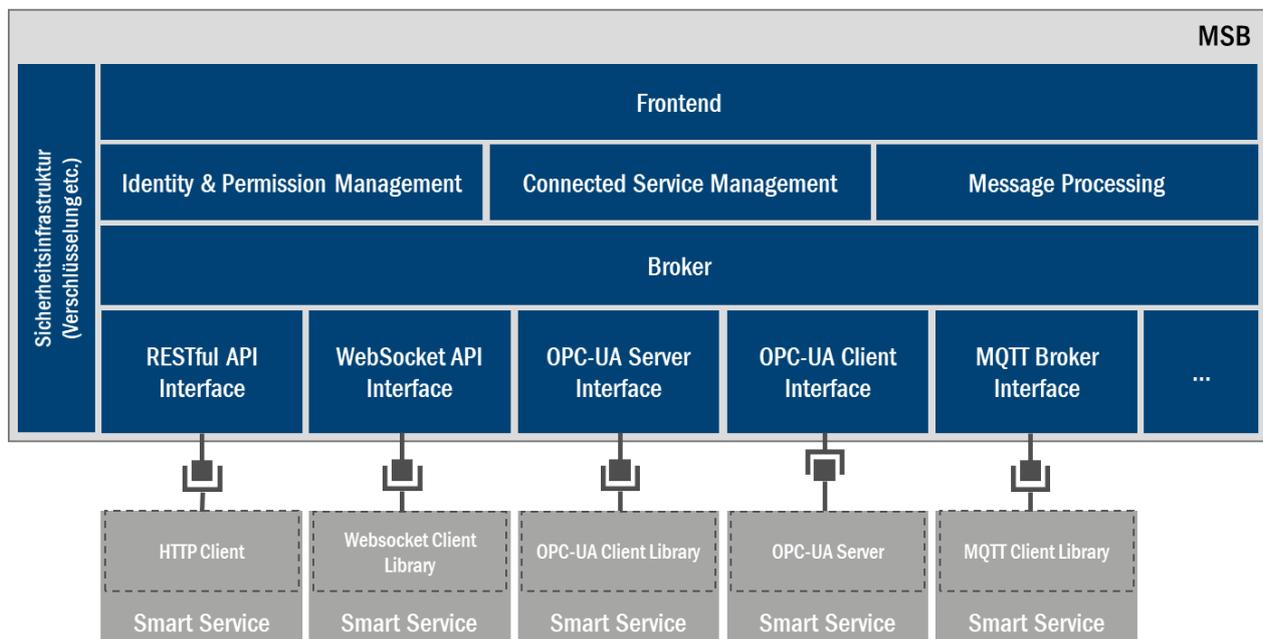


ABBILDUNG 14: ARCHITEKTUR DES MANUFACTURING SERVICE BUS

Die Benutzerdaten sowie die Berechtigungen der Benutzer, Organisationen und Dienste werden durch das Identity and Permission Management verwaltet. Eine weitere Komponente des MSB ist das Connected Service Management, eine Art Repository für registrierte Anwendungen und Maschinen. Das Connected Service Management stellt die rudimentäre Variante eines Digitalen Zwillings dar, da es nur eine Selbstbeschreibung einer Maschine in ihrem aktuellen Zustand bietet. Diese Informationen werden im Frontend-Modul verwendet, einer webbasierten Benutzerschnittstelle, um mittels einer grafischen Oberfläche die Komponenten zu integrieren. Die o.g. Integration Flows werden später durch

das Modul Message Processing verwaltet und verarbeitet. Eine detaillierte Beschreibung des MSB ist (Schel et al. 2018b) zu entnehmen.

Der **Smarte Konnektor** ist eine Softwareschnittstelle, die es ermöglicht, Steuerungsdaten mit IT-Systemen und Cloud-Komponenten zu verbinden und damit Steuerungs- und Energiedaten aus unterschiedlichen Quellen zu integrieren (siehe Abbildung 15). Hierzu werden Kommunikationsprotokolle, SPS und Netzwerkprotokolle möglichst echtzeitnah übersetzt. Während auf der SPS bereits heute in Millisekunden (Zykluszeit), und damit echtzeitnah, abgebildet werden kann, stellt insbesondere die Kommunikation mit Cloud-Applikationen noch eine Herausforderung dar. Mittelfristige technische Lösungsansätze hierfür bietet beispielsweise das Time-Sensitive Networking, das garantierte Antwortzeiten ermöglicht und auch mit weiteren Standards wie OPC UA kombiniert werden kann (TTTECH 2020).

Die Implementierung des Smarten Konnektors ermöglicht die Integration unterschiedlicher Steuerungsprotokolle und stellt eine gemeinsame Schnittstelle für übergeordnete Services zur Verfügung. Durch den modularen Aufbau des Smarten Konnektors können Services und neue SPS-Protokolle aufwandsarm eingebunden werden. Auf diese Weise kann die herstellerunabhängige Anbindung unterschiedlicher Anlagen erfolgen. Für die Erweiterung von Brownfield-Anlagen kann der Smarte Konnektor mittels gesonderter Hardware in den bestehenden Schaltschrank integriert werden. Eine Installation auf einer virtuellen Maschine ist ebenfalls möglich. Auch im Greenfield können diese Varianten neben der direkten Einbindung des Smarten Konnektors während der Planungs- und Realisierungsphase genutzt werden. Die Möglichkeit, Services in den Smarten Konnektor zu integrieren, legt den Grundstein für Edge Computing und den Wandel von der Automatisierungspyramide zu vernetzten und verteilten Systemen (VDI/VDE 2013). Bei Anlagen mit klassischen Hierarchien stellt der Smarte Konnektor eine einheitliche Verbindung zwischen bestehenden Automatisierungskomponenten und einer Cloud zur Verfügung, sodass Restriktionen und Anforderungen der verschiedenen Ebenen erfasst und berücksichtigt werden können.

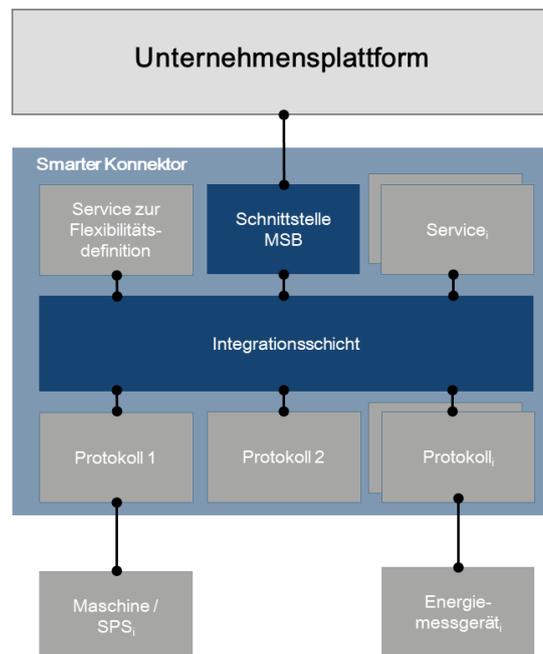


ABBILDUNG 15: ARCHITEKTUR DES SMARTEN KONNEKTORS

Services und Apps sind die grundlegenden Bausteine von Cloud-Applikationen, die als Teil von definierten Integration Flows über den MSB mit anderen Services und Apps interagieren können. Insgesamt lassen sich fünf Typen von Services und Apps auf der UP unterscheiden (Bauer et al. 2017b), die je nach Ausgestaltung als Micro Services ausgeführt werden können (Götz et al. 2018) und Ansätze des maschinellen Lernens beinhalten können (Salza et al. 2017).

- Integration Services dienen der Anbindung von Maschinen, Anlagen und IT-Systemen an den Manufacturing Services Bus. Sie laufen üblicherweise direkt auf der SPS, einer Maschine oder auf Hardware mit den Funktionalitäten des Smarten Konnektors.
- Cyber-physical Systems Services (CPS Services) stellen eine Kombination aus intelligenter Software mit Sensoren und Aktoren dar und dienen zur Abbildung hochflexibler Prozesskomponenten. Diese Services laufen üblicherweise direkt auf der Hardware des cyber-physischen Systems.
- Als Backend Services werden jene Services bezeichnet, die klar definierte und beschriebene Funktionen ohne grafische Benutzeroberfläche anbieten (z. B. Datenbanken) und üblicherweise auf Plattformen ausgeführt werden.
- Web Apps bauen auf Backend Services auf und sind betriebssystemunabhängige Anwendungen im Browser, die eine Kombination aus einem oder mehreren Backend Services mit einer grafischen Benutzeroberfläche umfassen (z. B. Dashboards oder Services aus dem folgenden Abschnitt 2.5.1.2). Web Apps werden üblicherweise auf Plattformen ausgeführt.
- Unter Native Apps werden betriebssystemspezifische Anwendungen verstanden, die ebenfalls eine Kombination aus einem oder mehreren Backend Services mit einer grafischen Benutzeroberfläche darstellen, jedoch oftmals hardwarenahe Szenarien abbilden (z. B. Datenerfassung mittels Sensorik). Entsprechend werden diese Native Apps direkt auf den jeweiligen dezentralen Geräten ausgeführt.

Der **Energieflexibilitätsmanagementservice** (EFMS) ist ein grundlegender Service der UP und hat die Aufgabe, die im Unternehmen vorhandene Energieflexibilität zu verwalten und deren Realisierung zu orchestrieren. Hierzu reichen alle erstellenden Instanzen (Smarter Konnektor, Optimierungsservices etc.) von Energieflexibilitätsdatenmodellen diese an den EFMS weiter. Der EFMS verwaltet diese und fungiert als Broker, der den Erzeuger einer Energieflexibilität speichert und bei einer Umsetzung den Erzeuger zur Realisierung der Energieflexibilität auffordert.

Der **Marktinformationsbeschaffungsservice** (MIBS) ermöglicht die Beschaffung von Informationen aus Services der MP zur Nutzung auf der UP. Diverse Dienste, die sich auf der UP befinden, benötigen Informationen von der MP. Ein Beispiel hierfür sind Optimierungsdienste, die Informationen zur Strompreisentwicklung o.Ä. benötigen. Um eine einheitliche Schnittstelle für die Informationen aus den marktseitigen Services (z.B. Regelleistungsmärkte, Strombörse und Prognosedienste für Märkte und Netze) anzubieten, ist dieser Service auf der UP nötig, der alle Anfragen an die jeweiligen Services auf der MP weiterleitet. Dazu wird dieser Service möglichst dynamisch mit neuen Schnittstellen erweiterbar sein.

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

mit der Schnittstelle zur MP. Der EFMS nutzt hierbei die Schnittstelle zur Kommunikation von EFDMS. (Schel et al. 2018a).

2.5.1.2 Referenzservices der UP

Neben den bereits beschriebenen Plattform Services, die zum grundlegenden Betrieb der UP notwendig sind, werden die Funktionalitäten zum automatisierten Energieflexibilitätshandel über verschiedene Services abgebildet, die je nach Unternehmen und Anwendungsfall individuell ausgestaltet sein können. Grundsätzlich adressieren die Services eine oder mehrere Ebenen der traditionellen Automatisierungspyramide (DIN EN 62264:2011) und damit auch deren umsetzbare EFM (siehe Abbildung 5). Diese Services werden nachfolgend in tabellarischer Form vorgestellt (siehe Tabelle 5). Detaillierte Steckbriefe zu den einzelnen Services sind zukünftig auf der [SynErgie Webseite](#) zu finden.

TABELLE 5: REFERENZSERVICES DER UNTERNEHMENSPLATTFORM

Service	Beschreibung
Energieflexibilitätsmanagement (EFMS)	Das übergeordnete Ziel des EFMS ist es, die im Unternehmen vorhandene Energieflexibilität zu verwalten und deren Realisierung zu orchestrieren.
Marktplattforminformationsbeschaffungsservice (MIBS)	Der MIBS wurde konzipiert, damit unternehmensplattformseitige Services in Szenarien, in denen jegliche Kommunikation des Service über den MSB fließen muss, dennoch marktplattformseitige Services konsumieren können. In Szenarien, in denen Services nicht nur über den MSB kommunizieren, ist der MIBS optional. Der MIBS ermöglicht somit das Konsumieren von marktplattformseitigen Services (Preisprognosen etc.) auf Seiten der UP.
Universeller Optimierungscontroller	Der universelle Optimierungscontroller koordiniert eingesetzte Optimierungsservices, sofern sich die Ergebnisse der einzelnen Optimierungen beeinflussen und die Optimierungen nicht unabhängig voneinander sind. Je nach Unternehmen kann diese Koordination verschiedene Planungs- und Ausführungsebenen von der Fertigungsebene bis zur Unternehmensleitebene umfassen. Die Ablaufsteuerung und der Datenaustausch zwischen den unterschiedlichen Optimierungsservices erfolgt über den MSB. Darauf aufbauend können durch komplexere Koordination und Kommunikation zwischen Einzeloptimierungen weitere Optimierungen durchgeführt werden. Der universelle Optimierungscontroller ist als eigene Instanz an den EFMS angebunden.
Einbindung ins Manufacturing Execution System (MES)	Das Ziel ist die Konzeption einer Architektur zur Integration von energieorientierten Zielgrößen in bestehende konventionelle MES. Dazu werden entsprechende Daten, z. B. Energieverbrauch und Energiemarktdaten, berücksichtigt. Bei der energieorientierten Steuerung auf Fertigungsebene finden vier MES-relevante Maßnahmen Anwendung (Auftragsstart verschieben, Auftrag unterbrechen, Auftragsreihenfolge ändern und Maschinenbelegung anpassen).
Ebenenunabhängige Evolutionäre Optimierung	Grundlage der evolutionären Optimierung ist die Nutzung der Zusammenhänge zwischen Produktionsparametern und Energieverbrauch.

	<p>Im Rahmen der Optimierung wird eine Vielzahl von Produktionsvarianten generiert, die sich in konkreten Produktionsparametern unterscheiden. Basierend auf evolutionären Prinzipien werden gute Produktionsvarianten verbessert. Die evolutionäre Optimierung kann auf verschiedenen Ebenen der Automatisierungspyramide zum Einsatz kommen. Auf Fertigungsebene wird sie zur optimalen Einstellung von Produktionsparametern verwendet. Steht ein MES nicht zur Verfügung, übernimmt sie die Planung der Produktionsreihenfolge. Bei vorhandenem MES kann die evolutionäre Optimierung unterstützend auf der Fertigungsleitebene wirken.</p>
Produktionsmanagement-Konnektor	<p>Dieser Service ermöglicht die Anbindung von SAP-ERP Systemen an die UP. Mit dem Produktionsmanagement-Konnektor können SAP-ERP Systeme über aktivierte SAP BAPIs an den MSB angebunden werden. Weitere in den MSB integrierte Services können dann direkt über den MSB über sogenannte Integration Flows mit einer SAP-Instanz kommunizieren. Somit können die Daten der Energieflexibilitäten mit der Unternehmens-IT verknüpft werden.</p>
Visuelle Flexibilitätserfassung in Form des Datenmodells	<p>Ziel dieses Service ist es, mit möglichst geringer Anzahl an Abfragen den Informationsgehalt des Flexibilitätspotenzials von einem Fabrikbetreiber zu maximieren, um dieses möglichst realitätsgetreu abschätzen zu können. Dazu wird auch eine Ausfüllhilfe für die Kennzahlen des definierten EFDM in Form einer Web-Applikation erstellt.</p>
Aggregation und Disaggregation von Energieflexibilität	<p>Durch den beschriebenen Service werden einzelne Flexibilitäten kombiniert und kombinierte Flexibilitäten wieder in ihre ursprünglichen Flexibilitäten aufgeteilt. Dies gilt sowohl für Flexibilitätsräume als auch -maßnahmen.</p>
Poolingoptimierung, Systemidentifikation und Nutzenergiebedarfsprognose	<p>Die Poolingoptimierung stellt einen Algorithmus zur systematischen Optimierung von mehreren Anlagen mit separaten EFDMs der Produktionsinfrastruktur mit deutlichem Maschinenbezug dar. Ergänzend dazu werden über eine automatisierte Systemidentifikation datenbasierte Simulationsmodelle von Anlagen der Produktionsinfrastruktur erstellt.</p>
Batterieeinsatzoptimierung	<p>Die Batterieeinsatzoptimierung ermöglicht Energieflexibilität in der Produktion durch die Verwendung von Batterien der elektrisch betriebenen fahrerlosen Transportfahrzeuge (FTF) als Speicher.</p>
Gesamtkostenbasierte Produktionssteuerung	<p>Das übergeordnete Ziel der gesamtkostenbasierten Produktionssteuerung ist die Vergleichbarkeit von logistischen Zielgrößen mit Energiekosten, indem Erstere ebenfalls in monetäre Kosten überführt werden. Auf diese Weise wird eine ganzheitliche Bewertung von Energieflexibilitätsmaßnahmen ermöglicht.</p>
Bewertung von Produktionsrisiken	<p>EFM stellen für die Unternehmen häufig störende Eingriffe in die Produktionsprozesse dar. Um die Industrie zur Flexibilisierung ihrer Lastverläufe technologisch zu befähigen, aber auch um die Akzeptanz der betroffenen Akteure zu steigern, ist eine Bewertung von Risiken notwendig. Das Ziel dieses Service ist die Unterstützung bei der strukturierten und</p>

	teilautomatisierten Identifikation, Kategorisierung und Bewertung von Produktionsrisiken.
Energieorientierte Produktionsplanung und -Steuerung (ePPS)	Mit dem ePPS-Service wird im Hinblick auf den Energieflexibilitätshandel das Ziel verfolgt, einen Service zu entwickeln, der den Planungsprozess von Produktionsaufträgen bei dem Anbieten und Umsetzen von EFM in produzierenden Unternehmen unterstützen soll. Dieser zieht sowohl energetische als auch logistische Zielgrößen in Betracht.
Intelligentes Lastmanagement	Aktuelle Lastmanagementsysteme arbeiten nach statisch parametrisierten Spitzenlastvorgaben. Dynamische Lastvorgaben sowie die Verarbeitung von Prognosen aus Produktion, Energieinfrastruktur und Energiemarkt werden bisher nicht berücksichtigt. Ziel dieses Service ist es deshalb ein neuartiges intelligentes System zum Managen und Schalten von industriellen Lasten zu schaffen.
Automatisierte Detektion des Energieflexibilitätpotenzials für Produktionsanlagen	Das Energieflexibilisierungspotenzial in verketteten Anlagen ist oft nur unzureichend bekannt, da Messungen aufgrund der Anzahl der Komponenten sehr zeit- und kostenintensiv sind. Zudem sind multiple Prozessparameter maschineninhärent geregelt und daher stehen keine energetischen Informationen zur Verfügung. Das übergeordnete Ziel des Service ist es, zu ermöglichen, dass eine automatisierte Detektion der relevanten Komponenten in Maschinen und Anlagen anhand der Leistungsprofilen erfolgt.

2.5.2 Marktplattform

2.5.2.1 Aufbau der MP

Auf der MP wird eine Laufzeitumgebung bereitgestellt, mit der externe Services direkt über die MP vermittelt werden können. Die Services ermöglichen die Vermarktung von Nachfrageflexibilität. Abbildung 16 zeigt das übergeordnete Zusammenspiel von MP, UP und Services. Service Provider jeglicher Art registrieren und veröffentlichen ihren Service auf der MP, welcher von Unternehmen und anderen Interessenten gesucht und angefragt werden kann. Die MP mit der zentralen Komponente des Service Brokers vermittelt zwischen Unternehmen und Serviceanbietern und ermöglicht den Serviceaufruf und dessen Nutzung (Bauer et al. 2017a; Schott et al. 2018).

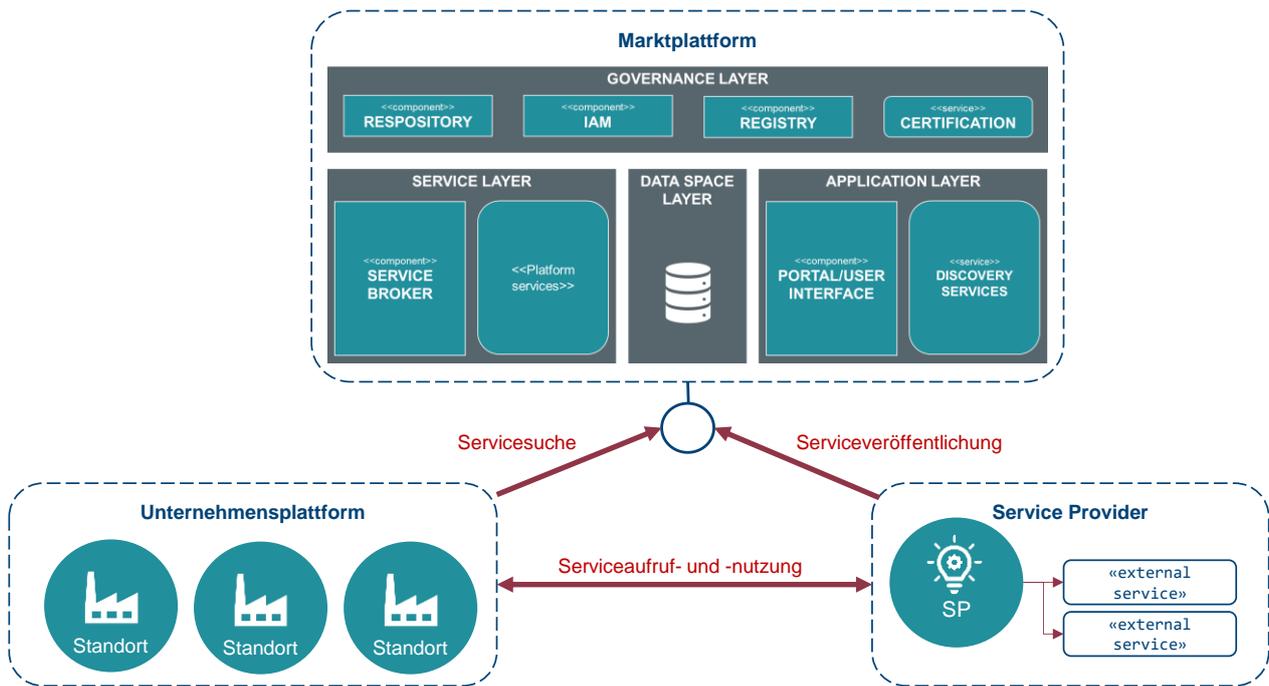


ABBILDUNG 16: ÜBERGEORDNETES ZUSAMMENSPIEL VON MARKTPLATTFORM, UNTERNEHMENSPLATTFORM UND SERVICE PROVIDERN

Um die in Abschnitt 2.2 definierten Funktionen und in Abschnitt 2.3 dargestellten Prozesse abbilden zu können, ist eine entsprechende Architektur der MP notwendig. Innerhalb der MP bündeln vier verschiedene Layer – Governance, Service, Data Space und Application – die einzelnen Komponenten und Services, welche im Folgenden erläutert werden. Eine graphische Übersicht und Zuordnung der Komponenten und Services zu den jeweiligen Layern findet sich in Abbildung 17.

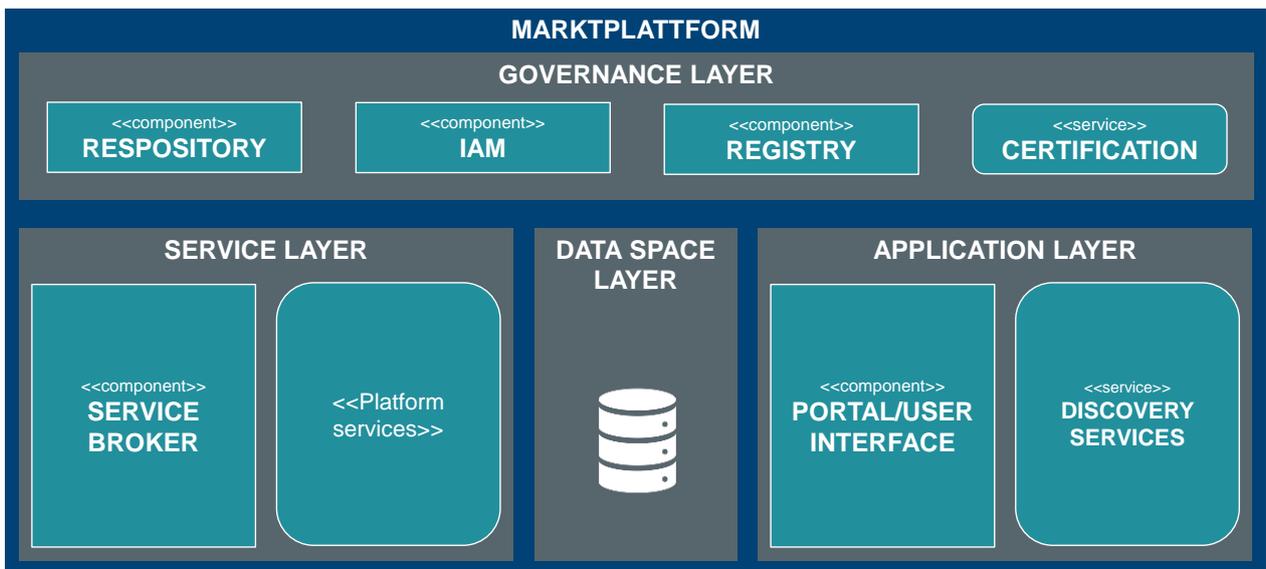


ABBILDUNG 17: ARCHITEKTUR DER MARKTPLATTFORM

Die MP folgt einer Service-Broker-Architektur, welche auf die Referenzarchitektur CORBA (common object request broker architecture) der Object Management Group (OMG) zurückzuführen ist (Object Management Group

(OMG 2020). Die wesentlichen Schwerpunkte liegen dabei auf der Interoperabilität, der Portabilität und der Erweiterbarkeit des Systems. Die verschiedenen Layer, Services und Komponenten ordnen sich dieser Architektur unter.

Mit dem übergeordneten Governance Layer wird sichergestellt, dass die Services und Komponenten innerhalb der MP den definierten Richtlinien und Standards entsprechen, die von den in Abschnitt 2.2 definierten Zielen, Strategien und Vorschriften abhängig sind, um den gewünschten Nutzen (siehe Abschnitt 2.1) zu erbringen. Sicherheits- und Schutzaspekte haben dabei besondere Bedeutung. Der Governance Layer umfasst dabei die Komponenten Repository, Identity and Access Management (IAM) und Registry sowie die Service Certification. Der Service Layer bündelt die Komponenten und Services, welche für die Erfüllung der einzelnen Funktionen und Prozesse relevant sind. Die zentrale Komponente des Service Brokers und Platform Services sind dem Service Layer zugeordnet. Im Data Space Layer werden zentrale Informationen in Datenbanken gespeichert. Der Application Layer dient zur Interaktion mit der UP und ermöglicht den Service-Discovery-Prozess, durch den Unternehmen Services gezielt suchen, Informationen zu Services und Datenformaten einsehen und Bedingungen zur Dienstnutzung abrufen können. Der Application Layer umfasst die Komponente Portal/User Interface und verschiedene Discovery Services.

Die zentrale Komponente der MP ist der Service Broker. Er fungiert als Vermittler zwischen Servicenachfragern und Service Providern, indem er die Rolle der zentralen vermittelnden Instanz zwischen UP und Services einnimmt. Im Zusammenspiel mit den Komponenten Repository und Registry ermittelt er die entsprechenden Zieladressen und kommuniziert sie an den Servicenachfrager/die UP. Protokollierung der vermittelten Services zwischen UP und Service Providern werden einzelne Interaktionen in persistenten Logs abgespeichert. Diese Logs sind bei Bedarf entsprechend abrufbar und können beispielsweise für nachgelagerte Bezahlmodelle verwendet werden. Die operativen Funktionen der MP in Zusammenhang mit der Servicevermittlung werden in Platform Services (Plattformdiensten) zusammengefasst. Sie umfassen Kontroll- und Vertragsdienste, um die Plattform zu überwachen und zu warten, aber auch das Zahlungsmanagement kann hierüber abgebildet werden.

Das **Portal** bzw. **User Interface** stellt auf der MP die Komponenten dar, die es Nutzern erlaubt, mit Hilfe einer graphischen Nutzeroberfläche (siehe Abbildung 18) zu interagieren. Neben Basisfunktionen wie der Registrierung und des Logins bietet es eine Eingabemaske zur Informationsweitergabe an andere Komponenten, API-Dokumentationen von Services, die Möglichkeit zur Durchführung von Testaufrufen, der automatischen Erzeugung von Client-Anwendungen in verschiedenen Programmiersprachen, Community-Funktionalitäten (z.B. Rating) und die Überwachung der angebotenen Dienste. Es ist mit den Plattformdiensten für die Zugangsverwaltung und Authentifizierung sowie mit dem Service Broker für den weiteren Zugang zu Funktionalitäten verbunden. Neben der Möglichkeit des manuellen Service Discoveries über das Portal bieten **Discovery Services** die Möglichkeit, diesen Prozess vollständig zu automatisieren und zu operationalisieren. Discovery Services können beispielsweise über Protokolle wie Universal Description, Discovery and Integration (UDDI) oder JAXR, einer Java API für Registries, abgebildet werden. Mithilfe der Discovery Services kann neben den vielfältigen Automatisierungsmöglichkeiten auf Seiten der UP auch auf der MP der aktive menschliche Eingriff im operativen Betrieb minimiert werden.

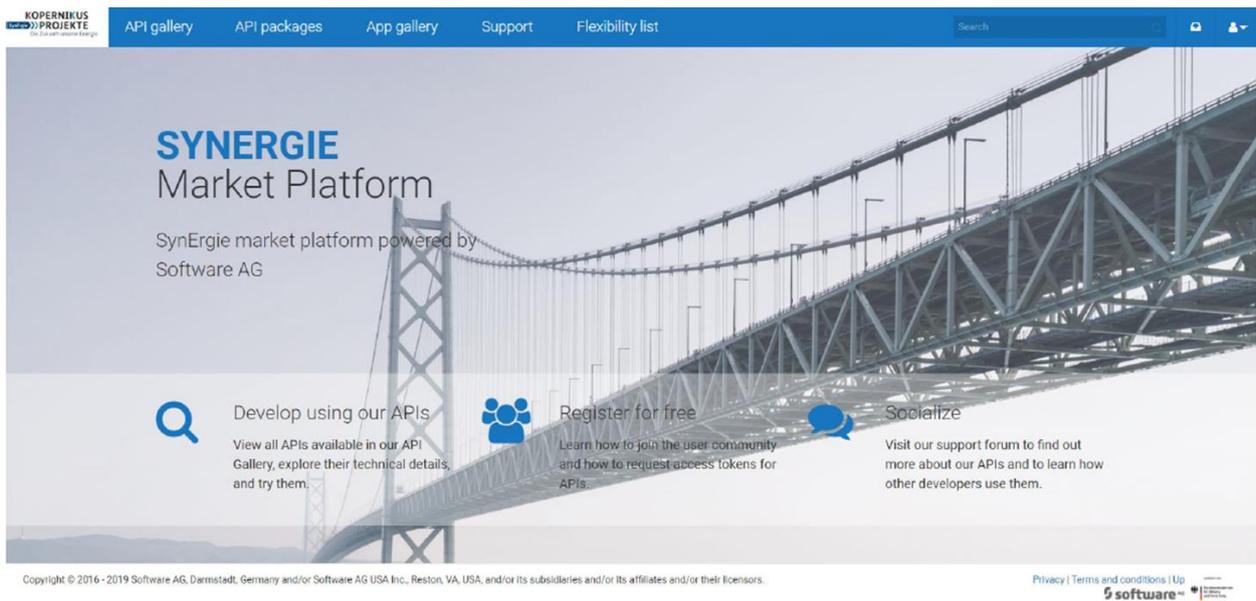


ABBILDUNG 18: NUTZEROBERFLÄCHE DER SYNERGIE –MARKTPLATTFORM (BROWSER-ANSICHT)

Neben unterschiedlichen Services, Komponenten und dem Service Broker sind Datenbanken (Data Spaces) für den Betrieb der MP essenziell, welche im **Data Space Layer** zusammengefasst werden. In den Datenbanken werden zentrale Informationen gespeichert, die von den Services und Komponenten im Sinne der grundlegenden Datenbankoperationen (create, read, update, delete, CRUD) verwendet werden können. Unterschieden wird dabei in einen System Data Space und einen Service Data Space. Der System Data Space umfasst beispielsweise Informationen und Daten über Protokoll-, Benutzer-, Berechtigungs- oder Vertragsdaten. Im Service Data Space sind Daten und Informationen zu Services, die von Dritten angeboten werden.

Die Komponente des **IAM** ermöglicht eine zentrale Verwaltung von Identitäten und Zugriffsrechten auf unterschiedliche Funktionen und Services der MP. Die Authentifizierung und Autorisierung der Teilnehmer der MP, sowohl UPs als auch Service Provider, sind zentrale Aufgaben des IAM. Insbesondere ist es, hierbei die Registrierung neuer Plattformteilnehmer zu nennen, um hohen Sicherheitsstandards zu genügen. Mithilfe einer Zwei-Faktor-Authentifizierung und der Ausstellung von X.509-Zertifikaten zur eindeutigen Identifizierung von Teilnehmern und der TLS-Verschlüsselung der Kommunikation zwischen MP und UP werden die notwendigen Sicherheitsanforderungen umgesetzt. Die Komponente des IAM steht in engem Zusammenhang mit dem Service der **Certification**. Der Service der Certification stellt mit einer zentralen Public-Key-Infrastruktur die genannten Zertifikate für die Plattformteilnehmer aus und bildet damit das Rückgrat für die Zwei-Faktor-Authentifizierung sowie eine sichere Kommunikation.

Zur automatisierten Servicevermittlung sind die beiden Komponenten Registry und Repository essenziell. In der Registry werden alle Artefakte der SOA (Serviceorientierte Architektur) Landschaft (wie bsp. WebServices oder XML Schemas) verwaltet. Die Registry umfasst neben servicerelevanten Informationen auch Angaben zu Organisationen, Usern, Policies und Taxonomien. Die Registry fungiert dabei als Verzeichnis, nicht als Datenbank. Sie beschreibt die Eigenschaften der Artefakte (wie Name, Beschreibung, Ort, Kontaktinformationen, technische Spezifikationen und Daten zum aktuellen Lebenszyklus), die Artefakte selbst sind in einer weiteren Komponente gespeichert: dem Repository. Wird bspw. ein XML-Schema für den Datenaustausch registriert, wird ein Eintrag in der Registry zur Beschreibung des Schemas angelegt, während das Schema-Dokument im Repository abgelegt wird. Die

Funktionsweise der Registry lässt sich mit der eines Telefonbuches vergleichen. In Telefonbüchern sind die Namen in alphabetischer Reihenfolge geordnet und Details zu jeder Person/Organisation sind die zugehörige Anschrift und Telefonnummer. Analog sind in der Registry Informationen zu Artefakten und Services nach einer bestimmten Reihenfolge gelistet und können einfach durchsucht und gefunden werden.

2.5.2.2 Referenzservices der MP

In Anlehnung an das Representation-State-Transfer-Paradigma (REST) (Rautenstrauch und Schulze 2003) und die resultierende Trennung von prozeduralen und ressourcenorientierten Schnittstellen wird auf der MP zwischen der Vermittlung von Services und Daten unterschieden. Services ermöglichen es den Nutzern, mit anderen Teilnehmern und externen Dienstleistern zu interagieren. Sie decken einen breiten Funktionsumfang ab, von der Datenverarbeitung bis hin zum Handel mit Flexibilität und Energieprodukten. Verglichen mit dem uniformen Austausch von Daten können die proprietären Schnittstellen je nach Anbieter stark variieren. Ihr Aufruf kann zu Nebeneffekten führen und Veränderungen in der realen Welt nach sich ziehen. Eine semantische Annotation erleichtert ihre Auffindbarkeit und fördert den freien Wettbewerb zwischen Anbietern von vergleichbaren Services. Der Austausch von Daten lässt sich dank der kleinen Menge an benötigten Operationen über eine standardisierte, einheitliche Schnittstelle erfassen. Im Gegensatz zum Aufruf von Services hat der reine Datenaustausch im Allgemeinen keine unmittelbare Auswirkung auf die reale Welt und lässt sich daher unbegrenzt wiederholen. Beispielsweise können Zeitreihen von Wettervorhersagen oder Börsenpreise, aber auch verfügbare Flexibilitätsmengen in einem bestimmten Netzgebiet angefragt werden. Unternehmen können bei der Vermarktung von Flexibilität eine Vielzahl von unterstützenden Services der MP nutzen. Diese Services werden nachfolgend in tabellarischer Form vorgestellt (siehe Tabelle 6). Detaillierte Steckbriefe zu den einzelnen Services sind zukünftig analog zur UP auf der [SynErgie Webseite](#) zu finden.

TABELLE 6: REFERENZSERVICES DER MARKTPLATTFORM

Service	Beschreibung
Flexibilitätseinsatzplanungstool	Ziel dieses Service ist es, ausgehend von Marktinformationen zu ermitteln, an welchen Strommärkten und mit welchen Produkten mit einer gegebenen Flexibilität in Form eines EFDM sich die größten Erträge/Kosteneinsparungen erzielen lassen.
Strombörse	Der vorliegende Service ermöglicht zur Anbindung der Strombörse an den Service Broker einen Informationsaustausch. Es ist notwendig, dass Optimierungsservices oder Prognoseservice laufend mit Preisinformationen der verschiedenen börsenseitig gehandelten Produkte versorgt werden.
Regelleistungsmärkte	Für einen sinnvollen Betrieb der MP ist neben der Anbindung der Strombörse auch ein Service für Datengewinnung und Handel mit den Regelleistungsmärkten wichtig. Da die Regelleistungsmärkte aktuell ein wichtiges Vermarktungsinstrument für Nachfrageflexibilität sind, kann über die MP auf diese zugegriffen werden. Preisinformationen können gewonnen werden.
Prognosedienste für Märkte und Netze	Das übergeordnete Ziel des Dienstes besteht in der Bereitstellung von Prognosedienstleistungen für Teilnehmer der ESP, die eine Voraussage über den Marktwert verschiedener, auf der Börse handelbarer oder öffentlich

	ausgeschriebener Standardprodukte im Bereich der Flexibilitätsvermarktung benötigen. Weitere Prognosen, wie beispielsweise Wetterdaten, sind möglich.
Aggregatorflexibilitätshandel	Mit dem Service wird das Ziel verfolgt, über einen Aggregator Flexibilität zu vermarkten und damit den direkten Zugang zu Flexibilitätsmärkten auch für Unternehmen, die bisher keinen Zugang besitzen, zu erschließen.
Lokaler Flexibilitätshandel	Mit dem Service wird ein lokaler Flexibilitätsmarkt bereitgestellt, der es Netzbetreibern erlaubt, lokale Netzengpässe zu beseitigen. Unternehmen können ihre Flexibilitäten mittel des EFDM über die MP am lokalen Flexibilitätsmarkt inserieren und vermarkten.
Schnell-Check-Tool	Der Service dient zur Informationsbeschaffung über Energieflexibilität im Allgemeinen, deren Einsatzmöglichkeiten und potenziellen Erlösen oder Kosteneinsparungen bei der Strombeschaffung. Der Service wurde als Einstieg für Unternehmen ohne große Vorkenntnisse im Energiebereich konzipiert, um Möglichkeiten aufzuzeigen und den Einstieg der Nutzung von Energieflexibilität zu erleichtern.

2.5.3 Datenaustausch zwischen den Komponenten

In diesem Abschnitt sollen die grundlegenden Konzepte und Ideen der Kommunikation zwischen den unterschiedlichen Komponenten auf der ESP vorgestellt werden. Dabei kann die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten, Services und externen Anwendungen in folgende Gruppen untergliedert werden:

- Kommunikation der Komponenten innerhalb der Unternehmens- oder Marktplattform
- Kommunikation zwischen den Plattformen
- Kommunikation mit externen Services und Applikationen

Die Kommunikation der Komponenten und Services (z.B. Platform Services) innerhalb der einzelnen Plattformen erfolgt in einem festgelegten Standard, was eine wesentliche Architekturentscheidung ist und sorgfältig ausgewählt werden sollte. Beispielsweise kommunizieren die Basiskomponenten (z.B. Platform Services, Marktplatz für Services) der UP grundlegend über einen Message Broker, der eine standardisierte und anfrageorientierte Kommunikation mithilfe des MQTT Kommunikationsprotokolls der Komponenten ermöglicht.

Für die Kommunikation mit integrierbaren Services und Komponenten außerhalb der eigentlichen UP wird eine Middleware genutzt, die als MSB definiert ist. Die Anbindung von externen Services und Komponenten erfolgt durch das Anmelden der Services an die Middleware. Hierfür können unterschiedlichste Kommunikationsprotokolle wie OPC UA, MQTT, Websocket oder HTTP verwendet werden. Zusätzlich wird für die Kommunikation auf dem MSB das REST als Architekturstil für die Kommunikation von Komponenten und Services genutzt. Mit der Anbindung von etablierten Technologien wie OPC UA ist es auch möglich, physische Objekte bzw. Komponenten wie Maschinen direkt an die UP anzubinden. Sind unterschiedliche Services und Komponenten auf der UP registriert, können diese mithilfe des MSB untereinander kommunizieren und integriert werden. Diesbezüglich sind auch Publish-Subscribe und eventgetriebene Kommunikationsmodelle implementiert, sodass sowohl synchrone als auch asynchrone Kommunikation möglich ist.

Die Kommunikation zwischen den Plattformen erfolgt mittels einer Schnittstellenkomponente, die von der MP bereitgestellt wird. Diese bietet die Möglichkeit, über verschiedene Kommunikationsprotokolle (bspw. HTTPs oder das Nirvana Socket Protocol) eine Verbindung zur MP herzustellen. Hierzu dient ein Adapter, der als Dienst auf der UP betrieben und über den MSB verbunden ist. Mittels des Adapters können beispielsweise Services auf der MP gesucht und bezogen werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung einer bidirektionalen und asynchronen Kommunikation zwischen beiden Plattformen durch einen Websocket. Dieser ist vergleichbar mit den Kommunikationsmöglichkeiten innerhalb der UP.

3 ANWENDUNGSBEISPIELE

Zur Veranschaulichung der Architektur finden sich in den folgenden Abschnitten wichtige Anwendungsbeispiele. Es wird anhand eines Referenzbeispiels in Abschnitt 3.1 die Modellierung von Energieflexibilität mit dem EFDM beschrieben. Zudem werden anhand von Demonstratoren die entwickelten Konzepte und Lösungen sowie die technische Machbarkeit des automatisierten und standardisierten Energieflexibilitätshandels validiert. Diese werden in Abschnitt 3.2 in Form von Steckbriefen beschrieben.

3.1 Anwendungsbeispiel Energieflexibilitätsdatenmodell

Mit dem in Abschnitt 2.4 beschriebenen EFDM kann Energieflexibilität generisch beschrieben und von Services automatisiert weiterverarbeitet werden. Mit dem Datenmodell kann eine Vielzahl an Anwendungsfällen von energetischer Flexibilität modelliert werden. Exemplarisch ist im Folgenden eine beispielhafte Anwendung aus der Produktionsinfrastruktur mittels der relevanten Kennzahlen dargestellt.

Referenzbeispiel Produktionsinfrastruktur

Im Referenzbeispiel der Produktionsinfrastruktur wird ein System, bestehend aus einer Wärmepumpe, einem Kältespeicher, einem Wärmespeicher und jeweils angeschlossenen Verbrauchern betrachtet. Der Systemaufbau ist in Abbildung 19 schematisch dargestellt. Um gleichzeitig sowohl Kälte als auch Wärme für die verschiedenen Verbraucher bereitzustellen, ist die Verwendung einer Wärmepumpe aus versorgungstechnischer Perspektive als ideal anzusehen. Mit Hilfe der beiden thermischen Speicher wird ein energieflexibler Betrieb der Wärmepumpe durch die Entkopplung von Verbrauchern und Erzeuger (Wärmepumpe) ermöglicht. Als Verbraucher auf der Kälteseite dienen in unserem Beispiel die Kühlung eines Prozessleitstandes und auf der Wärmeseite die Warmwasserversorgung einer Reinigungsmaschine.

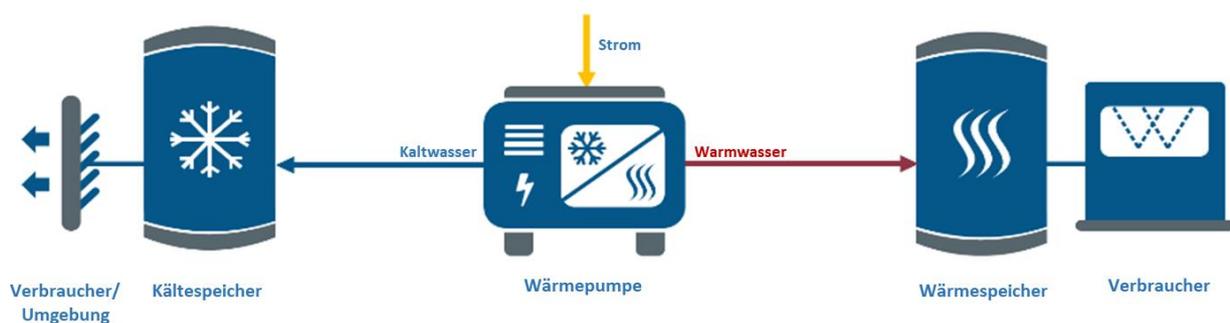


ABBILDUNG 19: SYSTEMAUFBAU DES REFERENZBEISPIELS „PRODUKTIONSINFRASTRUKTUR“

Um den möglichen Flexibilitätsraum der Wärmepumpe für den realen Betrieb mit einem EFDM zu modellieren und zu quantifizieren, müssen die Energiebedarfe der nicht-flexiblen Verbraucher auf Kälte und Wärmeseite vorliegen. Somit kann der Betrieb der Wärmepumpe an die verfügbare thermische Energie der Speicher angepasst werden. Der sich durch die thermischen Speicher ergebende Spielraum für den Wärmepumpenbetrieb stellt den möglichen Flexibilitätsraum des Systems dar. Folglich werden die beiden Speicher jeweils mithilfe der Klasse „Energiespeicher“ und die Wärmepumpe als „flexible Last“ modelliert. Zur Bestimmung des Flexibilitätsraumes ist neben

anlagenspezifischen Daten eine Wärme- und Kältebedarfsprognose der angeschlossenen Verbraucher notwendig. Diese kann auf Erfahrungswerten, Simulationen oder einfachen Hochrechnungen beruhen. Die Wärmebedarfsprognosen werden in das EFDM Kennzahlenset unter E_B der beiden thermischen Speicher eingetragen (siehe Abschnitt 2.4). Für die Speicherkapazität des Wärme- und Kältespeichers werden folgende Berechnungsvorschriften angewandt:

$$E_{\text{Speicher}} = m_{\text{Speicher}} \cdot c_{p_{\text{Speicher}}} \cdot \frac{T_{\text{Speicher}_{\text{maxkritisch}}} - T_{\text{Speicher}_{\text{minkritisch}}}}{3600}$$

$$E_{t0} = m_{\text{Speicher}} \cdot c_{p_{\text{Speicher}}} \cdot \frac{T_{\text{Speicher}} - T_{\text{Luft}}}{3600}$$

$$E_{\text{Ziel}} = m_{\text{Speicher}} \cdot c_{p_{\text{Speicher}}} \cdot \frac{T_{\text{Speicher}_{\text{max}}} - T_{\text{Speicher}_{\text{min}}}}{3600}$$

Hierbei wird durch m_{Speicher} die Masse des Speichermediums (im Beispiel 1000 l Wasser) und mit $c_{p_{\text{Speicher}}}$ die spezifische Wärmekapazität des Mediums beschrieben. Die Temperaturen sind folgendermaßen definiert:

- $T_{\text{Speicher}_{\text{maxkritisch}}}$ bzw. $T_{\text{Speicher}_{\text{minkritisch}}}$ entsprechen der oberen und unteren kritischen Wassertemperatur des Speichers, welche nicht über- bzw. unterschritten werden dürfen.
- E_{t0} als Energieinhalt der thermischen Speicher zu Beginn wird bestimmt durch die Temperaturdifferenz zwischen der aktuellen Speichertemperatur T_{Speicher} und der Umgebungstemperatur T_{Luft} .
- $T_{\text{Speicher}_{\text{max}}}$ und $T_{\text{Speicher}_{\text{min}}}$ definieren die obere und untere Grenze der Speichertemperatur im normalen Produktionsbetrieb.

Weiterhin wird der Energieverlust mit 3 % über einen Zeitraum von einer Stunde angenommen, für S_V die Wärmepumpe als Versorger identifiziert und anhand des zugehörigen Kennfeldes der Wirkungsgrad eingefügt. Bezüglich der Betriebskosten des Speichers wird angenommen, dass diese keine extra Kosten aufweisen, da die Verluste bereits in E_{Verlust} berücksichtigt sind. Die ermittelten Kennzahlen können aus Tabelle 7 bis Tabelle 9 entnommen werden. Die beiden Angaben zum Anfangs- und Zielenergiegehalt der beiden Speicher stellen exemplarische Werte dar. Gleiches gilt für die damit verbundenen Uhrzeiten.

TABELLE 7: MODELLIERUNG DES KÄLTESPEICHERS MITHILFE DER KLASSE "ENERGIESPEICHER"

Kennzahl	Variable	Beispiel	Einheit
Speicher-ID	ID	Kältespeicher	–
Nutzbare Speicherkapazität	E_{Speicher}	[0, 23.22]	kWh
Anfangsenergiegehalt inkl. Zeitpunkt	E_{t0}	(11.00, 08:00)	(kWh, s)
Zielenergiegehalt inkl. Zeitpunkt	E_{Ziel}	(5.81, 12:00)	(kWh, s)
Energieverluste	E_{Verlust}	3/3600	$\% \cdot \text{s}^{-1}$

Versorgungssysteme	S_V	{3.86, „Wärmepumpe“,}	(kW, –)
Nichtbeeinflussbarer Energiebedarf	E_B	[t0: -1.96, t1:-6.32,...]	(s \mapsto kW)
Kosten	c	0	((s \mapsto kW) \mapsto €)

TABELLE 8: MODELLIERUNG DES WÄRMESPEICHERS MITHILFE DER KLASSE "ENERGIESPEICHER"

Kennzahl	Variable	Beispiel	Einheit
Speicher-ID	ID	Wärmespeicher	–
Nutzbare Speicherkapazität	$E_{Speicher}$	[0, 23.22]	kWh
Anfangsenergiegehalt inkl. Zeitpunkt	E_{t0}	(26.2, 08:00)	(kWh, s)
Zielenergiegehalt inkl. Zeitpunkt	E_{Ziel}	(5.81, 12:00)	(kWh, s)
Energieverluste	$E_{Verlust}$	3/3600	% \cdot s ⁻¹
Versorgungssysteme	S_V	{„Wärmepumpe“,2.95}	(kW, –)
Nichtbeeinflussbarer Energiebedarf	E_B	[t0: 1.37, t1:4.43,...]	(s \mapsto kW)
Kosten	c	0	((s \mapsto kW) \mapsto €)

TABELLE 9: MODELLIERUNG DER WÄRMEPUMPE MITHILFE DER KLASSE "FLEXIBLE LAST"

Kennzahl	Variable	Beispiel	Einheit
Energieflexibilitäts-ID	ID	Wärmepumpe	–
Reaktionsdauer	t_{tot}	60	s
Gültigkeit	T_G	[08:00, 12:00]	s
Leistungszustände	P	{{(0, 2.39)}	kW
Haltedauer	t_H	[300, ∞ [s
Abrufhäufigkeit	N_A	[0, ∞]	-
Anzahl an Veränderungen	N_{Mod}	[0, ∞]	-
Leistungsgradient Aktivierung	∇P_{Akt}	2.0	kW \cdot s ⁻¹
Leistungsgradient Veränderungen	∇P_{Mod}	2.0	kW \cdot s ⁻¹
Leistungsgradient Deaktivierung	∇P_{Dea}	2.0	kW \cdot s ⁻¹

Regenerationsdauer	t_{Reg}	1	s
Kosten	c	0	€
Standort und Spannungsebene	$S; U_L$	ETA-Fabrik; 0.230	- ; kV

Zur Modellierung der Wärmepumpe sind die folgenden Variablen aus Messdaten oder den Herstellerangaben zu ermitteln: $t_{tot}, P, \nabla P_{Akt}, \nabla P_{Mod}, \nabla P_{Dea}, t_{Reg}, U_L$. Wobei für $\nabla P_{Akt} = \frac{\Delta P}{\Delta t_{akt}}$ gilt. Die Bestimmung ist äquivalent für die Leistungsgradienten Veränderung und Deaktivierung. Die minimale Haltedauer ist ebenfalls über Analysen des Leistungsverlaufes möglich, wobei diesbezüglich auch die Stellzeit von Ventilen beim Starten der Anlage zu berücksichtigen ist. Die Kosten der Wärmepumpe können basierend auf Erfahrungen und Erkenntnissen aus dem Projektverlauf durch

$$c = \text{Betriebsstunden} \cdot \text{Wartungskosten} + \text{Startvorgänge} \cdot \text{Kosten pro Startvorgang}$$

beschrieben und darauf beruhend im Beispiel mit $c = 4 \text{ €}$ angenommen werden. Mit dem erstellten EFDM kann anschließend mit einem Optimierungsservice auf der UP eine Betriebsstrategieoptimierung erfolgen oder mit dem Flexibilitätseinsatzplanungstool als Service der MP eine marktseitige Optimierung durchgeführt werden. Einen exemplarischen optimierten Verlauf, angepasst an den Strompreis, zeigt Abbildung 20.

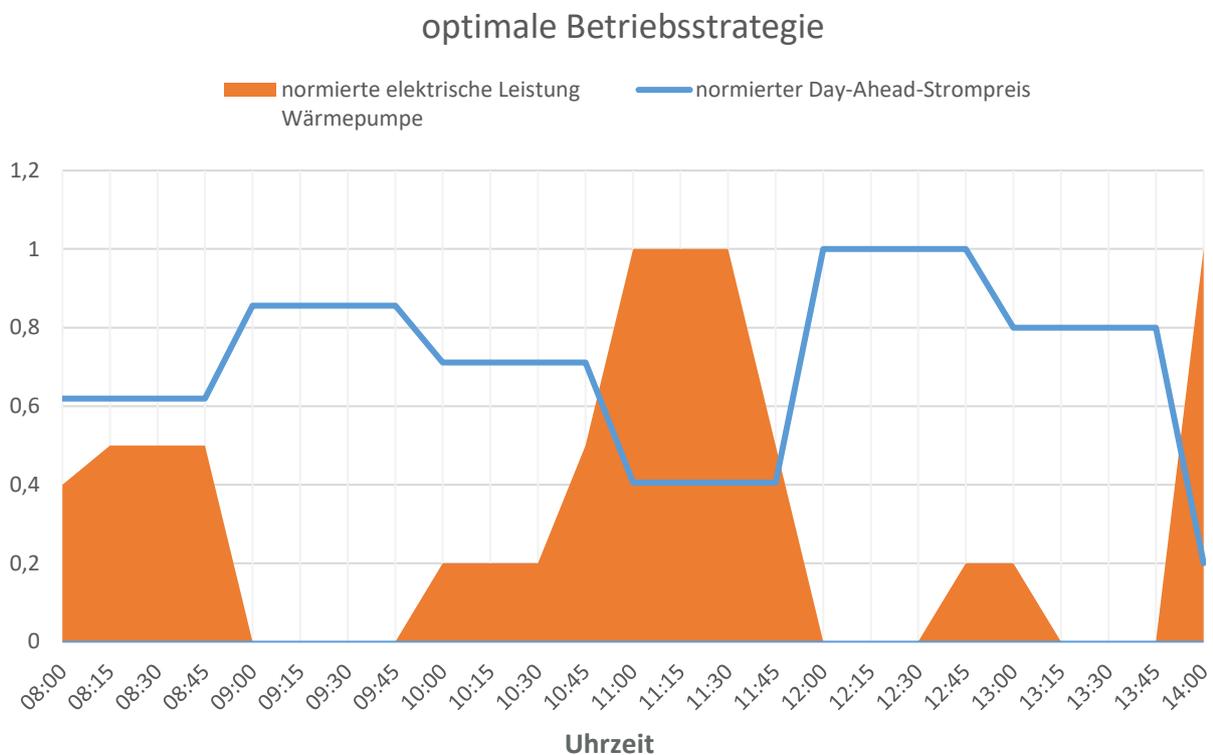


ABBILDUNG 20: OPTIMIERTE ANLAGENFAHRWEISE IN ABHÄNGIGKEIT EINES EXEMPLARISCHEN STROMPREISVERLAUFS

3.2 Demonstratoren

Zur Validierung der entwickelten Konzepte und Lösungen und der technischen Machbarkeit des automatisierten und standardisierten Energieflexibilitätshandels, werden UP und MP im Rahmen von Demonstratoren eingesetzt. Hierzu sind sowohl Demonstratoren im Forschungsumfeld vorgesehen (siehe Kühlhausmodell, ETA-Fabrik und Befähigung und Integration energieflexibler Anlagen), als auch im industriellen Umfeld (siehe Regelkreis mit Energieeinsatzplanungstool in der Aluminiumelektrolyse, Integrierte Steuerung von Stromnachfrageflexibilität und Prozesswärme in der Papierindustrie, intelligente Betriebsführung eines Schmelzofenverbundes). Darüber hinaus wird die ESP in Form einer Demonstrationsplattform mit innovativen regionalen Marktmechanismen in einem Testbetrieb in der Modellregion Augsburg unter Beteiligung der ansässigen Unternehmen, Netzbetreiber und Lieferanten getestet (siehe [Pressemeldung](#) vom 22.07.2020). Die konkreten Zielsetzungen, Aufbau und Herausforderungen beziehungsweise Erfahrungen aus den Demonstrationen sind den folgenden Steckbriefen zu entnehmen. Wir bedanken uns bei den beteiligten Partnern für das Ausfüllen der Steckbriefe.

Kühlhausmodell

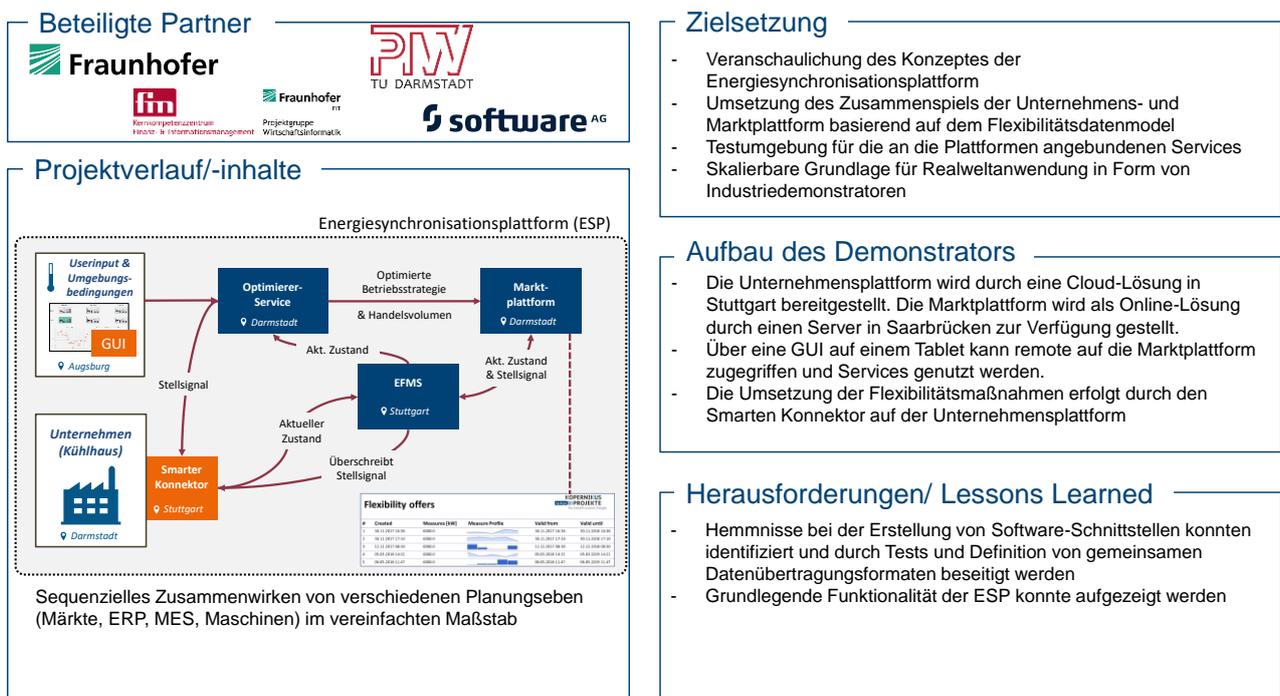


ABBILDUNG 21: STECKBRIEF FORSCHUNGSDEMONSTRATOR KÜHLHAUSMODELL

ETA-Fabrik

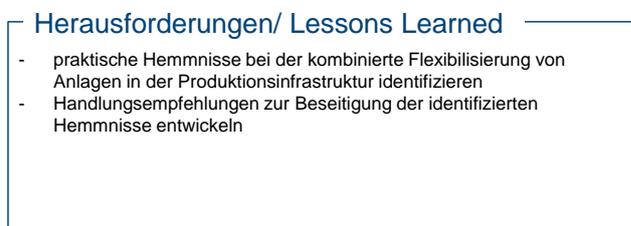
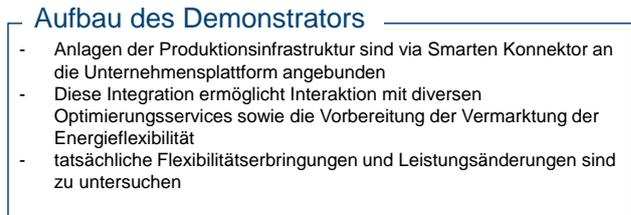
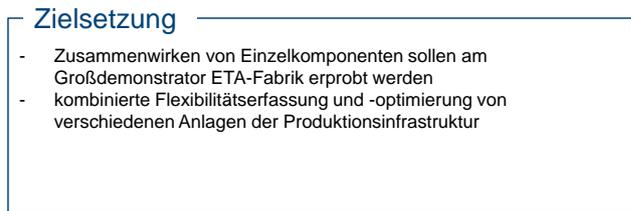
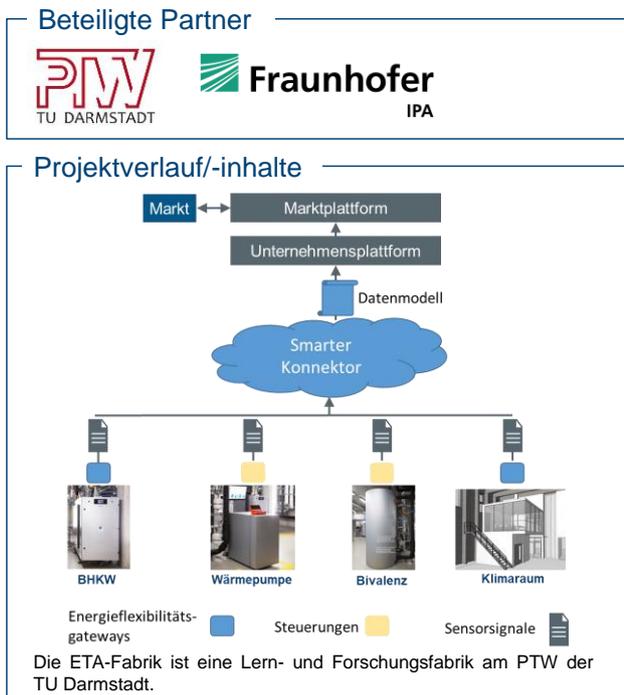


ABBILDUNG 22: STECKBRIEF FORSCHUNGSDEMONSTRATOR ETA-FABRIK

Befähigung und Integration energieflexibler Anlagen

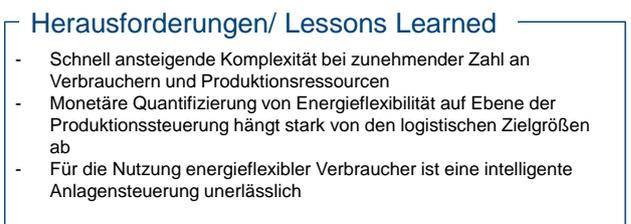
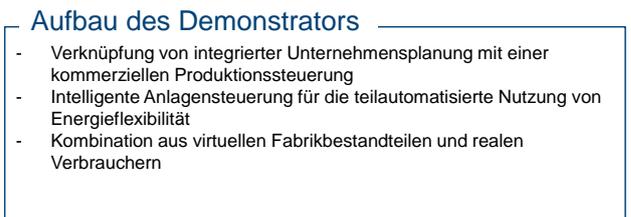
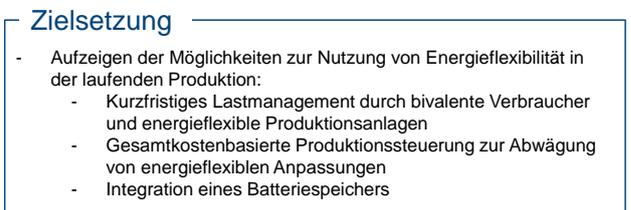


ABBILDUNG 23: STECKBRIEF FORSCHUNGSDEMONSTRATOR BEFÄHIGUNG UND INTEGRATION ENERGIEFLEXIBLER ANLAGEN

Regelkreis mit Flexibilitätseinsatzplanungstool

Beteiligte Partner

Zielsetzung

- Demonstration, wie die energieflexiblen Prozesse mit Services auf Unternehmens- und Marktplattform funktionieren und in einem Regelkreis interagieren.
- Verdeutlichung der Vorteile, die sich für ein energieintensives Unternehmen durch diese automatisierte Regelung ergeben.
- Aufzeigen des Kreislaufs zwischen Anlage, Smartem Konnektor, EFMS und dem Flexibilitätseinsatzplanungstool.

Projekthinhalte

Quelle: TRIMET Aluminium SE

Virtuelle Batterie der Aluminiumelektrolyse in Essen

Flexibler Betrieb einer Halle im Bereich +/- 25% der Nennleistung möglich

- **Flexible Speicherleistung:** +/- 22 MW
- **Speicherkapazität:** +/- 22 MW x 48h = +/- 1.056 MWh

Aufbau des Demonstrators

- Die Unternehmensplattform wird durch eine Cloudlösung in Stuttgart bereitgestellt. Die Marktplattform wird wiederum durch die Software AG in Saarbrücken betreut.
- Zum Einsatz kommen der Smarte Konnektor, EFMS, das Flex Desk Portal und das Flexibilitätseinsatzplanungstool.
- Es besteht dabei ein lesender Zugriff auf die Anlagendaten der virtuellen Batterie von Trimet.

Herausforderungen/ Lessons Learned

- Anbindung an die Unternehmensplattform gestaltete sich herausfordernder als angenommen und konnte durch den Einsatz eines Site-to-Site-VPNs gelöst werden.
- Das geführte Ausfüllen des Datenmodells war für den weiteren Projektverlauf sehr wichtig
- Das Prozessverständnis ist für die Zielerreichung von entscheidender Bedeutung

ABBILDUNG 24: STECKBRIEF INDUSTRIEDEMONSTRATOR ALUMINIUM-ELEKTROLYSE

Integrierte Steuerung von Stromnachfrageflexibilität und Prozesswärme

Beteiligte Partner

Zielsetzung

- Steigerung der Energieflexibilität mittels integrierter und intelligenter Steuerung von Stromnachfrageflexibilität und Prozesswärme
- Verbesserte Reaktionsfähigkeit auf schwankende Ressourcen- und Strompreise und dadurch sinkende Bezugskosten
- Bessere Nutzung und Vermarktung bereits bestehender Flexibilität, welche durch geplante sowie ungeplante Stillstände entstehen.

Projektverlauf/-inhalte

Integrierte Steuerung von Stromnachfrageflexibilität und Prozesswärme (am Beispiel Schongau)

Legende

Anlage/Prozess (grey box) Steuerbare Stoff- und Energieflüsse (red arrow) Vorgegebene Stoff- und Energieflüsse (blue arrow)

Energieträger (blue box) Zentrale Steuerung (cloud icon) Abhängigkeit (dashed line)

Aufbau des Demonstrators

- Die intelligente Steuerung wird durch die Anbindung an bestehende Leitsysteme und Datenbanken gewährleistet.
- Die technische Herausforderung liegt in dem Aufbau von performanten Schnittstellen zu bestehenden Systemen.
- Ein prototypischer Einsatz der interoperablen IoT-Unternehmensplattform

Herausforderungen/ Lessons Learned

- Die umfassende Steuerung des Produktionsprozesses muss aufgrund der Komplexität äußerst effizient umgesetzt werden
- Dazu wurde zunächst ein vereinfachtes Modell des Betriebs erstellt und anhand aktueller Ressourcen und Marktpreise optimiert
- Der Demonstrator wird zeigen, ob eine solche modulare Flexibilitätsoptimierung zusammen mit einer integrierten Betrachtung der Prozesswärme möglich ist und ob sich erwartete Mehrwerte realisieren lassen.

ABBILDUNG 25: STECKBRIEF INDUSTRIEDEMONSTRATOR PAPIERINDUSTRIE

Intelligente Betriebsführung eines Schmelzofenverbunds

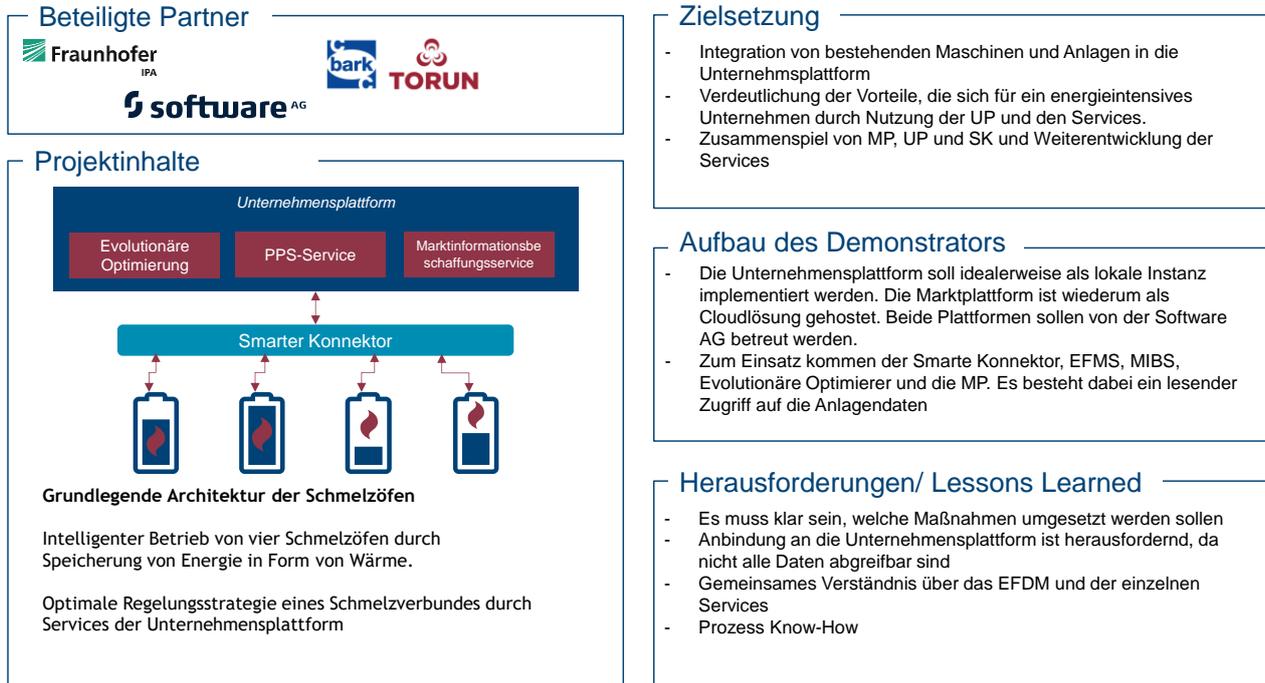


ABBILDUNG 26: STECKBRIEF INDUSTRIEDEMONSTRATOR SCHMELZOFENVERBUND

Testbetrieb in der Modellregion Augsburg

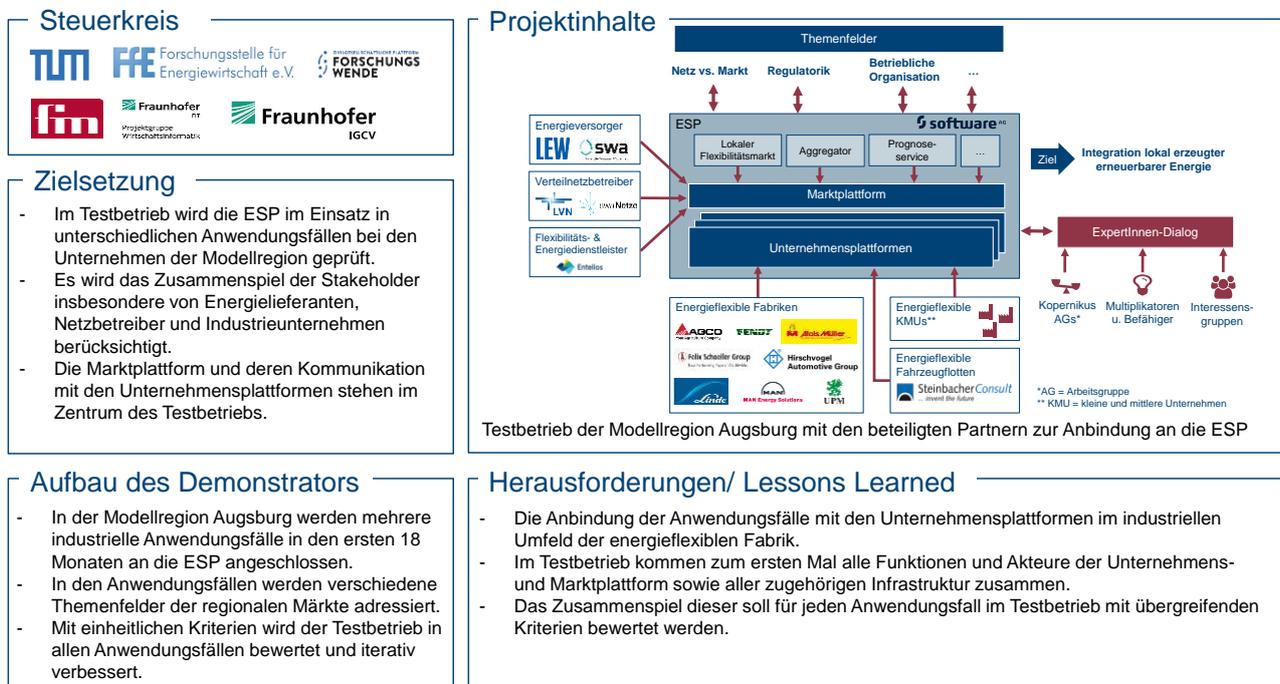


ABBILDUNG 27: STECKBRIEF TESTBETRIEB IN DER MODELLREGION

4 PERSPEKTIVEN DER ENERGIESYNCHRONISATIONSPLATTFORM

Neben den in Kapitel 2 beschriebenen Schichten, welche die Anforderungen und Blickwinkel verschiedener Stakeholder auf unterschiedlichen Ebenen abbilden, adressiert die Referenzarchitektur der ESP und damit die Struktur des vorliegenden Diskussionspapiers zwei Perspektiven, welche über alle fünf Schichten hinweg implementiert werden müssen: Sicherheit und Governance. Sicherheit ist wesentliche Voraussetzung für einen erfolgreichen Betrieb von IT-Systemen und deshalb zentrales Querschnittsthema des Referenzarchitekturmodells. Darüber hinaus wurden Prozesse für die Weiterentwicklung und das Änderungsmanagement der Referenzarchitektur definiert (Governance).

4.1 Security

IT-Sicherheit ist eine wesentliche Voraussetzung für den erfolgreichen Betrieb von IT-Systemen. Daher ist die Perspektive der IT-Sicherheit ein zentrales Querschnittsthema im Architekturmodell.

4.1.1 Sicherheitsperspektive im Architekturmodell

IT-Sicherheit muss bei allen Konzeptions- und Umsetzungsschritten eines Systems in adäquatem Maß bedacht werden sowie bei allen logischen und physischen Bestandteilen des Systems entsprechend implementiert und im operativen Betrieb aufrechterhalten werden. Dies gilt bei der ESP konkret für alle Elemente, die in Kapitel 2 in den einzelnen Schichten aufgeführt sind. Eine umfassende Sicherheitsbetrachtung liegt zum jetzigen Zeitpunkt nicht vor, jedoch wird im Projektverlauf kontinuierlich am Prozess der Absicherung der ESP weitergearbeitet.

Um IT-Sicherheit bestmöglich gewährleisten zu können und bei allen Architekturelementen angemessen zu berücksichtigen, ist eine systematische Herangehensweise notwendig, für die es bewährte Methoden gibt. Zusätzlich gibt es etablierte Sicherheitsfunktionalitäten, die die Architektur eines Systems ergänzen. Durch diese beiden Gesichtspunkte bringt die Perspektive der IT-Sicherheit zusätzliche Elemente in alle Schichten des Architekturmodells ein. Diese Elemente bringen beim Planen, Implementieren, Aufsetzen und Betreiben eines Systems entsprechende Anforderungen und Aufgaben mit sich.

Insgesamt gibt es aus der Perspektive der IT-Sicherheit nach den vorherigen Überlegungen zwei Querschnitte durch die Schichten des Architekturmodells: als ersten Querschnitt die Absicherung der bereits in Kapitel 2 vorgestellten, operativen Architekturelemente und als zweiten Querschnitt die neu hinzukommenden, sicherheitsspezifischen Architekturelemente. Ersteres wird mit Letzterem systematisch umgesetzt. Die sicherheitsspezifischen Architekturelemente werden im Folgenden erläutert. An ausgewählten Stellen wird eine Konkretisierung hin zur ESP vorgenommen. Dabei wird teilweise auch auf die Absicherung der operativen Architekturelemente eingegangen, d. h. es werden spezifische Sicherheitsaspekte für die operativen Architekturelemente erörtert.

4.1.1.1 Strategic Requirements

Manche Sicherheitsaspekte haben eine übergeordnete Rolle für die Absicherung eines IT-Systems und sind daher in der Referenzarchitektur über den in Kapitel 2 betrachteten Ebenen einzuordnen. In Anlehnung an das Referenzarchitekturmodell der International Data Spaces Association (Otto et al. 2019) wird eine übergeordnete Ebene

mit der Bezeichnung Strategic Requirements genutzt. Aus der Perspektive der IT-Sicherheit müssen auf dieser Ebene zunächst die **Sicherheitsanforderungen** in einer Anforderungsanalyse bestimmt werden, siehe Abschnitt 4.1.2. Sicherheitsanforderungen werden oft schon durch gesetzliche Bestimmungen oder sonstige einzuhaltende Regularien festgelegt, sollten aber auch aus Eigeninteresse befürwortet und ergänzt werden.

Aus den Anforderungen können die **Sicherheitsziele** für ein bestimmtes System abgeleitet werden. Ganz allgemein gibt es die grundlegenden Schutzziele *Vertraulichkeit*, *Integrität* und *Verfügbarkeit*. Diese werden oft durch die Schutzziele *Authentizität*, *Nichtabstreitbarkeit* und ggf. weitere Ziele ergänzt. Basierend auf den grundlegenden Schutzziele und den Sicherheitsanforderungen werden konkrete Sicherheitsziele festgelegt. Die Bedeutung der grundlegenden Schutzziele für die ESP wird in Abschnitt 4.1.3 dargestellt und darüber hinaus konkrete Sicherheitsziele für die ESP eingeführt. Für das Erreichen der Schutz- bzw. Sicherheitsziele ist es ein erheblicher Vorteil, nach dem Prinzip **Security by Design** vorzugehen. Dies bedeutet, dass schon beim Entwurf eines Systems Sicherheitsaspekte bedacht und diese bei der Implementierung und Installation konsequent umgesetzt werden. Integraler Bestandteil der Entwurfsphase ist die Erarbeitung eines **Sicherheitskonzepts**. Das finale Sicherheitskonzept enthält eine Zuordnung von allen Teilsystemen oder Systemkomponenten zu Sicherheitsprofilen bzw. -stufen (siehe 4.1.1.3) und legt die konkret umzusetzenden Sicherheitsmaßnahmen in Bezug auf alle Elemente in allen Schichten der Architektur fest.

Der Weg von der Anforderungsanalyse über die Definition der konkreten Sicherheitsziele und Sicherheitsprofile bis hin zum ausgearbeiteten Sicherheitskonzept mit konkreten Sicherheitsmaßnahmen für einzelne Architekturelemente ist ein Prozess, der konsequenterweise im Process Layer (siehe Abschnitt 4.1.1.4) einzuordnen ist. Die Sicherheitsanforderungen, die Sicherheitsziele und das Sicherheitskonzept sind jedoch aufgrund ihrer grundlegenden Relevanz als Elemente der Strategic Requirements eingeordnet.

Die adäquate Erfüllung der Sicherheitsanforderungen sollte ein originäres Unternehmensinteresse sein und daher sollten von der Unternehmensführung Strukturen geschaffen werden, mit denen dies zielgerichtet angegangen werden kann. Das Werkzeug hierfür ist ein **Informationssicherheitsmanagementsystem (ISMS)**. Ein ISMS wird genutzt, um auf organisatorischer Ebene Verantwortlichkeiten und Prozesse zur Bestimmung, Umsetzung und Aufrechterhaltung von Sicherheitsmaßnahmen zu definieren und die Durchführung zu koordinieren und zu dokumentieren (siehe Abschnitt 4.1.2). Dies ist die Grundlage für zielgerichtete und ganzheitliche Absicherung von Systemen.

4.1.1.2 Business Layer

Im Business Layer werden die an der ESP beteiligten Rollen identifiziert und deren Tätigkeiten bzw. Aufgaben beschrieben (siehe Abschnitt 2.1). Hieraus lässt sich aus der Sicherheitsperspektive heraus ein **Berechtigungsmodell** ableiten und mit Berechtigungen für die existierenden Rollen befüllen. Naheliegend ist hier ein Modell zur *rollenbasierten Zugriffskontrolle* (RBAC – engl. „role-based access control“). Evtl. ist es sinnvoll, dieses Modell durch *attributbasierte Zugriffsregeln* (ABAC bzw. RuBAC – engl. „attribute-based access control“ bzw. „rule-based access control“) zu verfeinern und zu stärken. Hiermit ließe sich beispielsweise festlegen, dass eine bestimmte Rolle eine bestimmte Handlung nur durchführen darf, wenn sie sich an einem bestimmten Ort befindet (etwa im Unternehmen bzw. im Intranet des Unternehmens, dessen UP bedient werden soll), oder dass eine bestimmte Aktion nur in einem bestimmten Zeitraum zulässig ist (etwa die Buchung einer Flexibilitätsmaßnahme nur innerhalb einer bestimmten Frist). Je nach Einsatzzweck kann es auch nötig sein, dass das Berechtigungsmodell *mandantenfähig* ist, d. h., dass es

möglich ist, mehrere sog. Mandanten zu definieren, die voneinander unabhängige Institutionen darstellen und in Bezug auf die Zugriffsmöglichkeiten voneinander getrennt sind.

Abbildern lässt sich ein rollenbasiertes Berechtigungsmodell mit einer **Zugriffsmatrix**, in der die Rollen den zulässigen Aktionen gegenübergestellt werden. Bei komplexen Systemen wie der ESP ist es sinnvoll, die Zugriffsmatrix durch zwei ineinandergreifende Matrizen zu ersetzen. In der ersten Matrix werden die Rollen den abstrakten Aktionen zugeordnet und in der zweiten Matrix werden diese Aktionen spezifischen Berechtigungen im System zugeordnet. Für die erste Matrix genügt die abstrakte Sicht des Business Layers, aber für die zweite Matrix ist zusätzliches Wissen aus den tieferliegenden Ebenen über die konkrete Systemausgestaltung nötig. Auch Zugriffsbedingungen aus ABAC/RuBAC können in den Matrizen dargestellt werden. Die gewährten Rechte sollten sich stets nach dem **Principle of least Privilege** richten, d. h. ein Nutzer sollte stets nur die Rechte haben, die für die Erfüllung seiner Aufgaben notwendig sind. Bei der Festlegung von Rollen und deren Berechtigungen sind nicht nur *menschliche Systemnutzer* zu berücksichtigen, sondern auch die verschiedenen Teilsysteme, Komponenten und Zusatzdienste (zu nennen sind hier insbesondere die Services der Markt- und Unternehmensplattform) als Akteure im Gesamtsystem. Auch für solche *technischen Nutzer* muss festgelegt werden, welche Aktionen diese durchführen dürfen.

4.1.1.3 Functional Layer

Im Functional Layer befinden sich zunächst die operativen Funktionalitäten der ESP (siehe Abschnitt 2.2), welche gemäß Sicherheitskonzept (siehe Abschnitt 4.1.1.1) abgesichert werden müssen. Aus der Sicherheitsperspektive heraus werden im Functional Layer zusätzlich alle benötigten Sicherheitsfunktionalitäten erfasst. Diese werden im Folgenden aufgeführt:

- **Sicherheitsprofile/-stufen:** In Sicherheitsprofilen bzw. -stufen wird festgelegt, welche Anforderungen zu erfüllen sind, um einen bestimmten Grad an Sicherheit zu erlangen. Dies wird genutzt, um ein System als Ganzes oder verschiedene Systemelemente gemäß dem konkreten Schutzbedarf, welcher aus dem Einsatzzweck resultiert, einzuordnen. Auf diese Weise wird das System mit angemessenen Schutzmaßnahmen versehen. Eine Anforderungsanalyse (siehe Abschnitt 4.1.1.1 sowie Abschnitt 4.1.2) ist Voraussetzung für diese Einordnung von Systemen oder Systemelementen zu Sicherheitsprofile bzw. -stufen. In SynErgie werden Systemelemente hinsichtlich ihres Sicherheitsbedarfs hauptsächlich aus Sicht des Stromnetzes und Strommarkts bewertet. Insbesondere bei der UP muss der Sicherheitsbedarf für den Praxisbetrieb aber auch aufgrund unternehmensspezifischer Besonderheiten, d. h. nicht nur im Hinblick auf eine ungestörte allgemeine Stromversorgung, sondern auch im Hinblick auf Anforderungen aus dem eigentlichen Wertschöpfungsprozess des Unternehmens, individuell bewertet werden und es müssen basierend darauf verschiedene Elemente ggf. einer höheren Sicherheitsstufe zugewiesen werden.
- **Identitätenverwaltung:** Alle Entitäten im System, d. h. alle menschlichen Nutzer sowie – wie bereits oben unter „Business Layer“ erwähnt – alle aktiven Systemkomponenten, müssen erfasst werden und eindeutig sowie möglichst täuschungsresistent identifizierbar sein. Vor der Registrierung zum System ist dementsprechend eine physische Identifizierung in einem vertrauenswürdigen Rahmen nötig. Danach kann eine Identität im Verwaltungssystem hinterlegt und mit technischen Identifizierungsmerkmalen ausgestattet werden.
- **Public Key Infrastructure (PKI):** Eine PKI ist ein Konzept zum Verknüpfen kryptographischer Schlüssel mit Identitäten und zum Beglaubigen dieser Verknüpfungen in Form von sog. digitalen Zertifikaten. Ebenso wird

eine konkrete Umsetzung des Konzepts in IT-Systemen als PKI bezeichnet. Die kryptographischen Schlüssel und die digitalen Zertifikate können als Sicherheitsanker für vielfältige Anwendungen genutzt werden.

- **Berechtigungsverwaltung:** Das Berechtigungsmodell aus dem Business Layer muss durch ein System abgebildet werden. In diesem System werden die Identitäten aus der Identitätenverwaltung ihren Berechtigungen zugeordnet, d. h. die Berechtigungen der Identitäten werden verwaltet. Dabei muss es möglich sein, neuen Identitäten Berechtigungen zu geben, bei bestehenden Identitäten im Falle von Aufgabenänderungen Berechtigungen anzupassen und bei ausscheidenden Identitäten alle Berechtigungen zu entziehen. Im Falle eines RBAC-Modells werden die Berechtigungen über eine Zuordnung von Identitäten zu Rollen gesetzt und bei den Rollen sind die entsprechenden Rechte hinterlegt (siehe Abschnitt 4.1.1.2)
- **Zugriffskontrolle:** IT-Systeme müssen dafür sorgen, dass die in der Berechtigungsverwaltung gesetzten Berechtigungen nicht überschritten werden, d. h., dass Identitäten nur Aktionen durchführen können, zu denen sie berechtigt sind.
- **Physische Zugangsbeschränkung:** Auch der physische Zugang zu IT-Systemen muss je nach Sicherheitsstufe mit angemessenen Maßnahmen auf berechtigte Personen und ggf. bestimmte Zeitfenster beschränkt werden, um das Risiko für schadhafte Handlungen an den Systemen zu minimieren.
- **Netzwerksicherheit:** Ziel der Netzwerksicherheit ist eine möglichst gute Abschottung des Unternehmensnetzwerks und die Kontrolle darüber. Dies beginnt mit der Perimetersicherung, ist damit aber nicht abgeschlossen. Vielmehr ist es auch angebracht, das interne Netzwerk in physische und logische Zonen zu unterteilen und die Zugriffs- und Kommunikationsmöglichkeiten an den Übergängen zwischen den Zonen und innerhalb der Zonen auf das Erforderliche einzuschränken.
- **Kapselung:** Der Gedanke der Kapselung lässt sich nicht nur auf der Netzwerkebene anwenden, sondern auch auf der Anwendungsebene auf die einzelnen Komponenten eines Systems. Die Teilsysteme, Dienste bzw. Komponenten sollen nur im erforderlichen Umfang aufeinander zugreifen können, um bei Kompromittierung eines Teils des Systems nicht alle Daten preiszugeben oder gar zu verlieren, damit auch dann möglichst ein eingeschränkter Weiterbetrieb aufrechterhalten werden kann und damit die Wiederherstellung der Systemkontrolle und des Normalbetriebs möglichst zügig erfolgt.
- **Kommunikationssicherheit:** Bei der Kommunikation über Netzwerkverbindungen sind Maßnahmen zum Schutz der Kommunikationsinhalte erforderlich. Dies gilt insbesondere bei der Kommunikation über externe Netzwerke, sollte vorzugsweise aber auch bei internen Netzwerken beachtet werden. In manchen Anwendungsfällen, bei denen eine Kommunikation über eine Kette von Verbindungen mit zwischengeschalteten Diensten hinweg stattfindet, kann es notwendig sein, Ende-zu-Ende-Sicherheit in Bezug auf Integrität, Echtheit oder Vertraulichkeit herzustellen.
- **Eingabevalidierung:** Keine Komponente sollte Eingaben ungeprüft übernehmen, da Eingaben technisch invalide oder unplausibel sein können oder im schlimmsten Fall schadhafte Code injizieren können. Um dies zu verhindern, sind Validierungsfunktionen nötig und bei Freitexteingaben ggf. auch Transformationsfunktionen, die im Hinblick auf das verarbeitende System syntaktisch kritische Eingaben durch Escape-Sequenzen ersetzen.
- **Minimierung der Angriffsfläche:** Ein System sollte nur die tatsächlich benötigten und genutzten operativen Funktionalitäten bieten. Dies betrifft sowohl die Zugangsmöglichkeiten zu Funktionalitäten als auch das tatsächliche Vorhalten von Funktionalitäten. Jede unnötige Erweiterung von Zugriffsmöglichkeiten und installierten Funktionalitäten vergrößert die Angriffsmöglichkeiten. Zudem werden installierte, aber nicht

genutzte Komponenten oft nicht aktualisiert, so dass ggf. bekannt gewordene Sicherheitslücken im System bestehen bleiben.

- **Logging und Monitoring:** Im laufenden Betrieb eines Systems müssen sicherheitsrelevante Ereignisse geloggt, d. h. aufgezeichnet werden. Die Logging-Funktion selbst muss derart abgesichert sein, dass keine Log-Einträge unterdrückt, gelöscht, verändert oder auf betrügerische Weise eingefügt werden können – kurz gesagt, das Logging-System muss manipulationssicher sein. Komplementär zur Logging-Funktion sind auch Monitoring-Funktionen nötig, die die Aufzeichnungen auswerten und visualisieren und bei kritischen Ereignissen einen Alarm auslösen. Logging und Monitoring sollte auf Netzwerkebene, Systemebene und Anwendungsebene betrieben werden.

4.1.1.4 Process Layer

Im Process Layer werden die Prozesse zum Erfüllen der funktionalen Aufgaben beschrieben. Hier existieren zunächst die operativen Prozesse (siehe Abschnitt 2.3.) Die Sicherheitsperspektive ergänzt diese Prozesse um Sicherheitsaspekte und führt auch zusätzliche sicherheitsspezifische Prozesse ein. Aus der Sicherheitsperspektive sind insbesondere folgende Prozesse zu nennen:

- **Erarbeitung des Sicherheitskonzepts:** Wie in Abschnitt 4.1.1.1 erwähnt, ist die Erarbeitung des Sicherheitskonzepts ein Prozess in der Entwurfsphase des Systems, der bei der Feststellung der Sicherheitsanforderungen beginnt und über die Bestimmung der Sicherheitsziele und die Festlegung von Sicherheitsstufen mit ihren jeweiligen konkreten Anforderungen hin zu dem Sicherheitskonzept mit konkreten Sicherheitsmaßnahmen führt.
- **Qualitätskontrolle (Sicherheitsaudit und Zertifizierung):** Bevor ein System für den Produktivbetrieb freigegeben wird, sollte das System in einem Audit auf seine Sicherheit überprüft werden. Dies kann je nach Anforderungen von einer Prüfung der Architektur über eine Prüfung der Funktionalitäten bis hin zu einem intensiven Penetration Testing und einer Quellcodebegutachtung reichen. Idealerweise wird das System auch während des Betriebs in regelmäßigen Zeitabständen (etwa alle zwei Jahre) sowie nach Systemänderungen im Rahmen des Releasemanagements überprüft. Von einer Zertifizierung spricht man, wenn die Anforderungen an ein System standardisiert sind und die Kriterien für den Audit festgelegt sind. Trotz begrifflicher Nähe sind Zertifizierungen und digitale Zertifikate (siehe Abschnitt 4.1.1.3 zu PKI“) unabhängige Konzepte. Audits und Zertifizierungen kann man für Gesamtsysteme wie UP oder auch für Systembausteine wie Services und Apps durchführen.
- **Sichere Teilnehmerregistrierung:** Grundlage für ein sicheres „Onboarding“ ist eine sichere Teilnehmeridentifizierung. In den nachfolgenden Schritten finden Interaktionen mit der Identitätenverwaltung und der Berechtigungsverwaltung statt, um Authentifizierungsmerkmale mit dem Teilnehmer zu vereinbaren und um seine Berechtigungen zu konfigurieren. Ein Registrierungsprozess muss jeweils für Personen, für institutionelle Nutzer (z. B für Unternehmen, die eine UP an die MP anschließen wollen) und für technische Komponenten (z. B für UP oder Services bzw. Apps) existieren.
- **Authentifizierung und Autorisierung:** Die zusammenspielenden Prozesse Authentifizierung und Autorisierung setzen die Zugriffskontrolle (siehe Abschnitt 4.1.1.3) um. In einem Authentifizierungsprozess weist ein registrierter Teilnehmer sich mit zuvor vereinbarten Merkmalen, z. B einem Passwort, einem kryptographischen Schlüssel oder per Fingerabdruckscan, aus. Zur Erhöhung der Sicherheit kann man eine Zweifaktoraauthentifizierung anwenden, bei der zwei verschiedene Merkmale abgefragt werden. Der

Authentifizierung nachgelagert sind Autorisierungsprozesse, die vor jedem Zugriff auf Systemressourcen durchgeführt werden.

- **Aufsetzen einer PKI:** Da eine PKI (siehe Abschnitt 4.1.1.3) als Grundlage für viele weitere Sicherheitsfunktionalitäten dient und dem Wurzelzertifikat der PKI eine besondere Rolle als Vertrauensanker zukommt, müssen bei der Erstellung desselben und beim Aufbau der PKI basierend darauf die Schritte einer sicheren Vorgehensweise genau eingehalten werden.
- **Zertifikatsausstellung** und **Zertifikatsrückruf:** Kernaufgabe einer PKI ist es, digitale Zertifikate für Teilnehmer auszustellen. Daneben gibt es auch Situationen, wo ein Zertifikatsrückruf nötig ist, etwa bei dem Ausscheiden eines Teilnehmers oder bei der Kompromittierung eines Zertifikats. Eine PKI muss daher sowohl einen Prozess zur Zertifikatsausstellung als auch für den Zertifikatsrückruf bereitstellen.
- **Sichere Kommunikationsprozesse:** Bei Kommunikationsprozessen sind Schritte zur Sicherung der Kommunikationsinhalte nötig, insb. hinsichtlich Vertraulichkeit, Integrität, Authentizität und Nichtabstreitbarkeit. Das erste Schutzziel ist insbesondere dann relevant, wenn die Kommunikation über externe Netzwerke läuft. Hierfür werden Schritte zur Ver- und Entschlüsselung in den Kommunikationsprozess eingefügt. Die anderen Schutzziele sind je nach Kommunikationsinhalt und Konstellation der Kommunikationspartner relevant und können durch Schritte zur digitalen Signatur und Signaturverifikation abgesichert werden.

4.1.1.5 Information Layer

Im Information Layer werden die relevanten Informationsobjekte erfasst und die Repräsentation von Informationen wird spezifiziert (siehe Abschnitt 2.4). Bei diesen Objekten und deren Repräsentation (Datenformate, Protokolle) sind stets auch die Sicherheitsrisiken zu analysieren, etwa das Risiko von Schadcode in Datenobjekten oder das Risiko von Informationslecks, und entsprechende Maßnahmen – idealerweise direkt durch die Wahl vorteilhafter Formate und Protokolle oder in Form von Schutzmechanismen auf dem Component Layer (siehe Abschnitt 4.1.1.6) – im Sicherheitskonzept festzulegen.

Die IT-Sicherheitsperspektive führt zusätzliche Informationsobjekte ein. Hier sind zunächst für die Entwurfsphase **Notationen** und **Datenstrukturen** zum Abbilden von *Berechtigungsschemata* (siehe Abschnitt 4.1.1.2) und von *Sicherheitsprofilen* (siehe Abschnitt 4.1.1.3) nötig. Im operativen Betrieb der ESP fallen verschiedene **Datenobjekte** zur Gewährleistung von Sicherheit an, insbesondere *digitale Zertifikate* (siehe Abschnitt 4.1.1.3 zu PKI) und *digitale Signaturen* auf Basis digitaler Zertifikate zum Schützen von anderen Datenobjekten und von Kommunikationsvorgängen. Ebenso sind für den Betrieb **Verschlüsselungsprotokolle** nötig.

4.1.1.6 Component Layer

Im Component Layer werden die konkreten physischen und digitalen Systemkomponenten erfasst (siehe Abschnitt 2.5). Die Elemente des Component Layers setzen die Funktionalitäten aus dem Functional Layer und die Prozesse aus dem Process Layer technisch um und Verarbeiten die Elemente des Information Layers. In der weiteren Beschreibung dieser Schicht wird auf Querverweise zu den höheren Schichten verzichtet, da diese sehr zahlreich wären.

Auch im Component Layer werden aus der Sicherheitsperspektive Maßnahmen zur Absicherung der operativen Komponenten dieses Layers definiert. Die konkret zu treffenden Maßnahmen werden, basierend auf der Anforderungs- bzw. Risikoanalyse, im Sicherheitskonzept festgelegt. An erster Stelle steht die Integration und Konfiguration der **Zugriffskontrolle**. Hier muss der Teilaspekt der Autorisierung inhärent in der Implementierung der einzelnen Komponenten verankert werden, wobei sowohl die Berechtigungen von menschlichen Nutzern als auch von technischen Komponenten kontrolliert werden müssen. Ggf. muss auch Mandantenfähigkeit vorhanden sein. Hinzu kommen Maßnahmen zur **Härtung** von Anwendungen und Betriebssystemen. Beispiele für solche Maßnahmen in Bezug auf Anwendungen sind das Ausführen von logischen Komponenten in separaten Prozessen zur *Kapselung* dieser Komponenten sowie die *Validierung von Eingangsdaten* zur Verhinderung von Unplausibilitäten, Inkompatibilitäten, Verarbeitungsfehlern und Codeinjektionsangriffen. Beispiele für Härtungsmaßnahmen an Betriebssystemen sind restriktive Prozessberechtigungen und ggf. zusätzlich Sandboxing bzw. Containering zur *Kapselung* von Komponenten sowie das Deaktivieren bzw. vollständige Entfernen von ungenutzten Systemdiensten zur *Minimierung der Angriffsfläche*. Bei vielen Komponenten fallen zudem Maßnahmen zur **sicheren Konfiguration** von Zugängen, etwa mit sicheren Passwörtern, und von sicherheitsspezifischen Parametern, etwa in Bezug auf Verschlüsselungsprotokolle, an.

Die Sicherheitsperspektive führt zudem zusätzliche Elemente im Component Layer ein:

- Es werden Softwaremodule für die **Identitätenverwaltung**, die **Berechtigungsverwaltung** und für die **Zugriffskontrolle** mit ihren Teilaspekten Authentifizierung und Autorisierung benötigt. Die Authentifizierungskomponente ist eine zentrale Anlaufstelle für alle weiteren Komponenten. Für die Autorisierung kann es je nach Systemarchitektur und Komplexität des Berechtigungsmodells auch dedizierte Komponenten zusätzlich zu den integrierten Autorisierungsfunktionalitäten in den Anwendungskomponenten geben, etwa ein Modul zur Evaluierung attributbasierter Zugriffsregeln oder Module zum Erzeugen und Auswerten von Objekten, die delegierte Berechtigungen repräsentieren.
- Eine **PKI** benötigt für ihren Betrieb verschiedene Komponenten, insbesondere eine *Zertifizierungsstelle* (engl. „certificate authority“, CA), die mit dem Wurzelzertifikat Zwischenzertifikate erstellt und je Zwischenzertifikat eine Zertifizierungsstelle, die weitere Zwischenzertifikate oder Nutzerzertifikate ausstellt. Die privaten Schlüssel zu den Zertifikaten, insbesondere der private Schlüssel zum Wurzelzertifikat, benötigen Schutzvorkehrungen gegen Kompromittierung, etwa ein Software- oder Hardwaremodul zur sicheren Speicherung. Zusätzlich werden Komponenten zur Entgegennahme und Veröffentlichung von *Zertifikatsrückrufen* benötigt.
- Auf dem Gebiet der **Netzwerksicherheit** sind wesentliche Komponenten *Firewalls*, *demilitarisierte Zonen* (DMZ) sowie Komponenten zum *Security Information and Event Management* (SIEM), wobei letzteres auf das *Monitoring* in Bezug auf Netzwerke abzielt.
- Spezielle **Hardwarekomponenten** bieten bestimmte Möglichkeiten zur Erhöhung der Sicherheit. Ein *Trusted Platform Module* (TPM) ermöglicht einen Schutz vor der Manipulation der Systemsoftware. *Smartcards* können als sicherer Speicher für private kryptographische Schlüssel vor der Kompromittierung dieser Schlüssel schützen.
- Auch die Umsetzung der **physischen Absicherung** der ESP ist auf dem System Layer einzuordnen. Die Absicherung wird über bauliche (z. B. abschließbare Türen) und organisatorische Maßnahmen (z. B. manuelle Einlasskontrolle) zur *Beschränkung des Zugangs* zu den Gebäuden und den konkreten Räumen, in denen

sich die Hardware der ESP befindet, realisiert. Auch eine bauliche *Robustheit* gegen *Unwetter* und, soweit möglich, gegen *Naturkatastrophen* muss zum Schutz der IT-Infrastruktur gewährleistet sein. Bei den physischen Sicherheitsmaßnahmen sind auch die Stromversorgung der Systemkomponenten und die Kommunikationsanbindungen zu berücksichtigen.

4.1.2 Anforderungen an die Sicherheit – Regulatorische Vorgaben und Branchenstandards

Die Anforderungen an die IT-Sicherheit der ESP sind aus zwei Blickwinkeln zu betrachten. Einerseits die Sicherheitsanforderungen, die sich aus dem industriellen Umfeld, also der Produktion, ergeben und andererseits die Anforderungen, welche aus einer Einstufung der ESP oder Teilen der ESP als Kritische Infrastruktur (KRITIS; Großschreibung des Adjektivs „Kritische“ in „Kritische Infrastruktur“ nach Nomenklatur des BSI-Gesetzes) resultieren könnten, sofern die ESP oder Teile der ESP als KRITIS eingestuft werden. Während im industriellen Umfeld die Sicherstellung des Produktionsprozesses im Vordergrund steht, ist es bei KRITIS die Netzstabilität und die Sicherheit der Stromnetze. Für beide Bereiche gelten unterschiedliche Vorgaben, die im Folgenden noch genauer erläutert werden.

4.1.2.1 KRITIS und ISMS nach ISO/IEC 27000

Im Sinne der EU-Richtlinie 2008/114/EG ist eine „kritische Infrastruktur“ eine Anlage, ein System oder ein Teil davon, welches von wesentlicher Bedeutung für die Aufrechterhaltung wichtiger gesellschaftlicher Funktionen, der Gesundheit, der Sicherheit und des wirtschaftlichen oder sozialen Wohlergehens der Bevölkerung ist und deren Störung oder Zerstörung erhebliche Auswirkungen hätte, da ihre Funktionen nicht aufrechterhalten werden könnte (EU-Richtlinie 2008/114/EG). Das Bundesministerium des Inneren gliedert KRITIS in neun Sektoren: Energie, Gesundheit, Staat und Verwaltung, Ernährung, Transport und Verkehr, Finanz- und Versicherungswesen, Informationstechnik und Telekommunikation, Medien und Kultur sowie Wasser. Im Sektor Energie sind die Branchen Elektrizität, Mineralöl und Gas betroffen. Für die ESP sind vorrangig die Vorgaben zum Sektor Energie und der Branche Elektrizität relevant.

Die Einstufung als KRITIS erfolgt gemäß regulatorischen Vorgaben maßgeblich nach IT-Sicherheitsgesetz (Bundesrepublik Deutschland 2016), §2 - BSI-Kritisverordnung (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) 2016) und EnWG (Bundesrepublik Deutschland 2005). Die BSI-Kritisverordnung nennt in Teil 3 Bemessungskriterien und Schwellwerte, anhand derer festgelegt wird, ob eine Anlage oder ein System im Sektor Energie, speziell in der Branche Elektrizität, als KRITIS eingestuft wird oder nicht.

- Wird die Allgemeinheit mit Strom versorgt, handelt es sich nach BSI-KritisV um eine kritische Dienstleistung.
- Wird der Grenzwert der Netto-Nenn-Leistung von 420 MW bei Einzelanlagen oder bei aggregierter Leistung bei mehreren, zu einem Pool zusammengeschlossen, Anlagen erreicht oder überschritten oder
- erreicht oder überschreitet eine Anlage oder System, die den physischen kurzfristigen Spothandel bedient, ein Handelsvolumen von 200 TWh/Jahr, gilt bzw. gelten diese als KRITIS.

Erfolgt eine Einstufung als KRITIS anhand der vorgegebenen Bemessungskriterien und Schwellwerte, sind die Vorgaben des IT-Sicherheitskatalogs (IT-Sicherheitskatalog gemäß § 11 Absatz 1b Energiewirtschaftsgesetz) einzuhalten und es ist ein Informationssicherheitsmanagementsystem (ISMS) zu implementieren, welches den Anforderungen der DIN ISO/IEC 27000 (sowie ISO/IEC 27001, ISO/IEC 27002, ISO/IEC 27019 und den dort referenzierten Normen und Standards) in der jeweils geltenden Fassung genügt. Die Normenreihe ISO/IEC 27000 legt

Kategorien für Referenzziele fest, die bei der Implementierung eines ISMS betrachtet werden müssen und für die Maßnahmen umgesetzt werden müssen (ISO/IEC 27000:2018). Diese erstrecken sich, beginnend bei der Erstellung von Informationssicherheitsrichtlinien, über organisatorische Anforderungen bis hin zur technischen Umsetzung. Die Implementierung und Konformität eines ISMS ist durch ein Zertifikat bei einer, durch die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) akkreditierten, unabhängigen Zertifizierungsstelle zu belegen.

Sofern eine Einstufung als KRITIS anhand der angeschlossenen Netto-Nenn-Leistung oder des Handelsvolumens erfolgt, eine Anlage jedoch nicht von einem Energieversorger betrieben wird und die Anlage nicht für den sicheren Netzbetrieb eingesetzt wird, definiert der Branchenverband der Energie- und Wasserwirtschaft BDEW Mindestanforderungen für „Anlagen oder Systeme zur Steuerung / Bündelung elektrischer Leistung“ im branchenspezifischen Sicherheitsstandard „B3S Aggregatoren“ (bdew 2019). Dieser ist vom BSI akzeptiert. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass dieser Standard in der aktuellen Fassung nur bis April 2021 herangezogen werden kann, da das BSI die Eignung von B3S i. d. R. nur für zwei Jahre bescheinigt. Auch hier ist die Einrichtung eines ISMS nach der Normenfamilie DIN ISO/IEC 27000 und eine Zertifizierung notwendig. Der Standard wäre für die ESP oder deren Teilkomponenten anwendbar, sofern sie die oben genannten Schwellwerte der zu steuernden elektrischen Leistung überschritten werden. Hierbei gelten nach derzeitigem Kenntnisstand die maximale (Anschluss-) Leistungen, die im kritischen Fall beeinflusst werden könnten. Werden diese Schwellwerte nicht überschritten, gilt eine Anlage nicht als KRITIS und die Vorgaben zu KRITIS müssen nicht erfüllt werden.

4.1.2.2 Industrie

Aus Gründen der Produktionssicherheit, Einhaltung von Lieferfristen, Schutz von Know-how, Schutz von Kundendaten und weiteren Motiven ist im industriellen Umfeld ein angemessenes Maß an IT-Sicherheit gefordert. Ein weiterer Aspekt sind allgemeine Haftungsfragen, die Funktion der ESP und der Teilkomponenten UP und MP betreffen. Auch im industriellen Umfeld werden Anforderungen an die Funktionssicherheit und die IT-Sicherheit gestellt, da bei Ausfällen die Produktion betroffen sein kann. Eine der maßgeblichen Normen zur IT-Sicherheit ist die internationale Norm ISA/IEC 62443 Industrial Communication Networks – Network and System Security. Hier zeigt sich, dass sich die Norm immer mehr der ISO/IEC 27000 Normenreihe annähert (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) 2017) und alternativ auch diese in Teilbereichen angewendet werden kann. Je nach Branche existieren aber auch weitere Standards oder Richtlinien, die zur Umsetzung eines angemessenen Sicherheitsniveaus angewandt werden können, wie beispielsweise die VDS Richtlinie 3473 (speziell für KMU) (VDS Richtlinie 3473), sowie die VDI/VDE 2182 Normreihe und weitere (VDI/VDE 2182 Blatt 1).

4.1.2.3 Entwicklung für „KRITIS-ready“

Da die Vorgehensweise nach ISO/IEC 27000 zur Einrichtung eines ISMS nicht an KRITIS gebunden ist und die Schutzziele sowie die Referenzziele und zu ergreifenden Maßnahmen sehr allgemein formuliert sind, soll im Weiteren nach ISO/IEC 27000 vorgegangen werden. Die tatsächlich umzusetzenden Maßnahmen wären dann Einzelfallentscheidungen je nach Ergebnis einer durchzuführenden Risikoanalyse, gefordertem Sicherheitsniveau, Einstufung als KRITIS. Die Auswahl, welche Bausteine (Referenzziele der ISO/IEC 27000) mit welcher Sicherheitsstufe umgesetzt werden soll, kann dann aufgrund der Vorgaben abgeleitet werden. Perspektivisch könnte der Schutzbedarfskatalog, nach Sicherheitslevel/Schutzklassen unterteilt (niedrig, mittel, hoch, kritisch), dann die erforderlichen Anforderungen und Maßnahmen für eine Gesamtplattform oder Teilkomponenten bzw. Schnittstellen liefern.

Es muss in Betracht gezogen werden, dass die ESP oder zumindest Teile davon als KRITIS einzustufen sind. Dies gilt insbesondere dann, wenn die über die Plattform direkt beeinflussbaren Leistungen bestimmte Grenzen überschreiten. Daher sollte sichergestellt werden, dass die ESP für den Fall einer entsprechenden Einstufung grundsätzlich die sich daraus ergebenden Anforderungen erfüllen kann. Aus Gründen der Nachhaltigkeit werden die ESP (und damit die MP und die UP) KRITIS-ready entwickelt.

4.1.3 Schutzziele der Energiesynchronisationsplattform

In diesem Abschnitt werden die Schutzziele der ESP formuliert. Zunächst aber werden, losgelöst von der ESP, die grundlegenden Schutzziele der IT-Sicherheit detaillierter vorgestellt. Ganz allgemein kennt die IT-Sicherheit die folgenden grundlegenden Schutzziele (Eckert 2014):

- Vertraulichkeit (Confidentiality): Über die ESP werden vertrauliche Informationen zwischen den UP, der MP und den auf der MP angebotenen Services ausgetauscht. Die Vertraulichkeit dieser Informationen muss auf der ganzen Energiesynchronisationsplattform gewährleistet werden, d. h., die Informationen dürfen nur von berechtigten Parteien eingesehen werden.
- Datenintegrität (Integrity): Die Integrität aller versandten und gespeicherten Informationen in der UP und MP sowie der ESP-Schnittstelle muss sichergestellt werden. Dies gilt insbesondere für Situationen, in denen ein Schaden für die Unternehmen, den Betreiber der MP oder Dritte entstehen kann.
- Verfügbarkeit (Availability): Damit die ESP ihre Aufgaben erfüllen kann, müssen die UP und die MP eine hohe Verfügbarkeit aufweisen. Dadurch, dass nur eine MP existiert, ist bei einem Ausfall der MP kein Handel für die Unternehmen und die MP-Services mehr möglich. Dieser Fall muss durch den Einsatz geeigneter Gegenmaßnahmen verhindert werden. Auf der UP muss mit höchster Priorität die Verfügbarkeit der Produktion eines Unternehmens sichergestellt werden. Sobald ein Unternehmen nicht mehr produziert, ist dessen primäre Einkommensquelle gefährdet. Zusätzlich muss aber auch die Verfügbarkeit der UP sichergestellt werden, damit der Energieflexibilitätshandel des Unternehmens ausfallfrei stattfinden kann und somit keine Strafzahlungen bei Nichterfüllungen von Flexibilität auftreten.
- Subjekt-Authentizität: Die Identität aller Teilnehmer der ESP muss zu jeder Zeit von berechtigten Teilnehmern festgestellt werden können. Dies trifft insbesondere auf Situationen zu, in denen nachvollzogen werden muss, warum und durch wen eine Aktion durchgeführt wurde. Dies gilt auch innerhalb der beiden Teilplattformen.
- Objekt-Authentizität: Die Aktionen eines Teilnehmers und die Erzeuger von Daten müssen für berechtigte Teilnehmer nachvollziehbar sein und die Zuordnung der Aktionen zum Teilnehmer darf nicht abstreitbar sein. Dies dient der, ggf. auch rechtlichen, Verfolgung und Aufklärung von Zwischenfällen.
- Nichtabstreitbarkeit (non repudiation): Die Aktionen eines Teilnehmers (Subjekts oder Objekts) müssen für berechtigte Instanzen nachvollziehbar sein und die Zuordnung der Aktionen zum Teilnehmer darf nicht abstreitbar sein. Dies dient der (ggf. rechtlichen) Verfolgung und Aufklärung von Zwischenfällen. Um die Nachvollziehbarkeit einer sicherheitsrelevanten Aktion zu gewährleisten, müssen die vier W-Fragen (Wer, Was, Wann und Wo) beantwortbar sein. Ebenso kann sich die Nichtabstreitbarkeit auf den Erhalt einer Nachricht beziehen.

Aus diesen übergeordneten Schutzzielen und basierend auf den Sicherheitsanforderungen an die ESP (siehe Abschnitt 4.1.2) ergeben sich die konkreten Schutzziele für die UP und die MP. Letztlich müssen diese konkreten

Sicherheitsziele durch festzulegende Maßnahmen, basierend auf den in Abschnitt 4.1.1 vorgestellten sicherheitsspezifischen Architekturelementen, erreicht werden.

4.1.3.1 Schutzziele der UP

1. Die Produktionsprozesse der Unternehmen dürfen durch Handeln der UP nicht ungewollt beeinflusst, verzögert oder behindert werden.
2. Die Verfügbarkeit der Plattform muss innerhalb von vorab definierten Kriterien gewährleistet sein.
3. Die UP muss vor unberechtigtem Zugriff geschützt werden.
4. Informationen, die Rückschlüsse auf die Produktion eines Unternehmens erlauben, dürfen nur nach dem »need to know«-Prinzip weitergegeben werden.
5. Die Informationen der UP dürfen nicht unerlaubt verändert werden.
6. Die Informationen der UP müssen vor Verlust geschützt werden (Backups, Checksums, USV).
7. Beim Austausch von sensiblen Informationen muss die Identität aller Kommunikationspartner (sowohl Benutzer als auch Systeme) sichergestellt werden.
8. Jegliche Aktion einzelner Stakeholder und der UP selbst müssen sicher protokolliert werden, insbesondere bei Maßnahmen, die einen Einfluss auf die Produktion oder den Handel auf der MP haben.
9. Jegliche Aktion muss einem Stakeholder oder einer UP-Komponente zugeordnet werden können und diese Zuordnung darf nicht anfechtbar sein. Diese Informationen müssen ggf. vor Gericht als Beweis verwendet werden können (Non-Repudiation).

4.1.3.2 Schutzziele der MP

1. Das Marktmodell und die dazugehörigen Marktmechanismen zeichnen sich durch eine angemessene Robustheit aus.
2. Die Verfügbarkeit der Plattform muss innerhalb von vorab definierten Kriterien gewährleistet sein.
3. Im Routinebetrieb auftauchende Fehler müssen erkennbar sein und dürfen die Stabilität der MP nicht gefährdet.
4. Glaubhafte Nachweisbarkeit der Identität eines einzelnen Marktteilnehmers gegenüber den anderen Marktteilnehmern muss gewährleistet werden.
5. Informationen müssen eindeutig ihrer Informationsquelle zugeordnet sein.
6. Rechtlich relevante elektronische Informationen dürfen nur von autorisierten Stakeholdern erstellt und verändert werden. Jede Modifikation muss nachvollziehbar und zurückverfolgbar sein.
7. Informationen dürfen für unberechtigte Dritte nicht einsehbar sein.
8. Zugriffe auf die MP und deren angebotene Dienste sowie die Einigung und der Abschluss eines Handels müssen sicher protokolliert werden.
9. Informationen, die ggf. vor Gericht als Beweis verwendet werden können, müssen bereitgestellt werden, wobei eine Manipulation eben dieser ausgeschlossen werden muss.
10. Die Verfügbarkeit sämtlicher Daten muss sichergestellt sein (z. B. durch Backups).

4.1.3.3 Schutzziele resultierend aus KRITIS

Für KRITIS, die nicht im klassischen Netzbetrieb eingesetzt werden, benennt der B3S-Standard des BDEW folgende Schutzziele:

1. Es muss sichergestellt werden, dass Informationen, deren Offenlegung die zugesagte Bereitstellung/Einspeisung der durch die Anlage aggregierten elektrischen Leistung oder die Einhaltung anderer relevanter Anforderungen in Bezug auf den sicheren Netzbetrieb in relevantem Umfang gefährden würde, Unberechtigten nicht bekannt werden.
2. Es muss die Integrität, Authentizität und korrekte Verarbeitung von Informationen sichergestellt werden, deren fehlerhafte, manipulierte oder unvollständige Übertragung, Speicherung oder Verarbeitung die planmäßige Bereitstellung/Einspeisung der durch die Anlage aggregierten elektrischen Leistung in relevantem Umfang beeinträchtigen oder die Einhaltung anderer Anforderungen in Bezug auf den sicheren Netzbetrieb gefährden würde.
3. Es muss sichergestellt werden, dass Informationen, Systeme, Komponenten oder Prozesse, die für die planmäßige Bereitstellung/Einspeisung der durch die Anlage aggregierten elektrischen Leistung oder die Einhaltung anderer relevanter Anforderungen in Bezug auf den sicheren Netzbetrieb notwendig sind, im benötigten Umfang zur Verfügung stehen.
4. Die durch den Aggregator zugesicherten Beiträge, z. B die Bereitstellung/Einspeisung elektrischer Leistung, darf nicht durch informationstechnische Vorfälle gestört oder unterbrochen werden.
5. Die planmäßige Erzeugung und der planmäßige Verbrauch von Strom zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit muss eingehalten werden.
6. Informationstechnische Systeme, Komponenten und Prozesse der kritischen Infrastruktur (IT-System der Prozessdatenverarbeitung zur Messung, Steuerung und Regelung), die für die Funktionsfähigkeit des kDL-Teilprozesses SBEL maßgeblich sind, sind in unterschiedlichen Lagen zu schützen.

Von besonderer branchenspezifischer Relevanz sind somit die Bestandteile der Systemlandschaft und Prozesskette, die der Bündelung und Steuerung zahlreicher verteilter Erzeugungs- oder Verbrauchsanlagen an einer zentralen Stelle dienen und dadurch ein hohes Gefährdungspotenzial bei unplanmäßigen, fahrlässigen oder vorsätzlichen Ein- bzw. Zugriffen sowie Störungen beinhalten. D. h. besonders relevant sind Komponenten, die von einer Stelle ausgehend eine hohe duplizierende Wirkung im Gesamtsystem zulassen (i. d. R. zentrale Systeme und Prozesse mit verteilter Wirkungskette von innen nach außen).

4.2 Governance

Die Perspektive der Governance definiert aus Sicht der Steuerung und Regelung der ESP die Rollen, Funktionen und Prozesse des Datenraums der Referenzarchitektur. Hierzu werden die Anforderungen definiert, welche eine sichere und interoperable Zusammenarbeit innerhalb des Datenraums sicherstellen. Dabei fallen ihr folgende Aufgaben, bezogen auf die Referenzarchitektur, zu:

- Verfügbarkeit einer Infrastruktur für Datenaustausch und Interoperabilität ermöglichen
- Etablieren zuverlässiger Beziehungen zwischen Datenbesitzer, Datenprovider und Datenkonsument
- Treuhänderische Vermittlung zwischen Beteiligten
- Erleichtern der Aushandlung von Verträgen und Vereinbarungen
- Erzielen von Transparenz und Verfolgbarkeit bei Datenaustausch und Datennutzung
- Ermöglichen von privatem und öffentlichem Datenaustausch
- Berücksichtigen von individuellen Bedürfnissen der Teilnehmer
- Errichtung einer dezentralen Architektur, welche keine zentrale Autorität benötigt

Aus technologischer Sicht sind die Aufgaben erfüllt, indem eine Umgebung zur Verfügung gestellt wird, in der die Entwicklung durchführbar ist. Sie sollte kollaborative Steuerungsmechanismen unterstützen, sodass ein allgemeines Arbeiten und eine Zielerreichung ermöglicht und gleichermaßen die Interessen aller Akteure gewahrt werden (Otto et al. 2019).

Daher gehört die Governance zur Verwaltung von datenbezogenen Ressourcen durch Vergabe von Entscheidungsrechten, Verantwortlichkeiten, Rollen und Ownership zu einem grundlegenden Element in der Referenzarchitektur. Es ist zudem notwendig, geeignete organisatorische Strukturen und Prozesse einzurichten, die bestimmen, wer welche Art von Entscheidungen bezüglich Datenbeständen trifft, und welche Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten mit diesen Entscheidungen verbunden sind. Die Vergabe der Rollen und Rechte in der Entwicklung der Referenzarchitektur orientiert sich dabei an bestehenden Verantwortlichkeiten für Arbeitspakete und Bereiche im Projekt Synergie. Im Folgenden soll die Umgebung sowie der definierte Prozess zur Erstellung der Referenzarchitektur näher erläutert werden.

Zur Entwicklung der Referenzarchitektur der ESP werden zwei Umgebungen genutzt. In der Modellierungsumgebung wird unter Nutzung des bestehenden „The Open Group Architecture Framework“ (TOGAF) der jeweils aktuelle Stand der Referenzarchitektur abgebildet. Alle weiteren Änderungen durchlaufen vor Einpflegen einen Entscheidungsprozess in der Archivierungsumgebung, welcher inklusive Änderungsvorhaben in einem Architecture Decision Log (ADL) festgehalten wird. Durch diese beiden Umgebungen können die oben genannten Aufgaben erfüllt werden.

4.2.1 Referenzarchitektur unter Nutzung des Frameworks TOGAF

TOGAF bezeichnet ein Vorgehensmodell zur Entwicklung von Unternehmensarchitekturen, in welchem der Architekturentwicklungsprozess definiert wird. Dabei umfasst der Architekturentwicklungsprozess die vier Iterationszyklen Architekturkontext (Preliminary, A), Architekturbereitstellung (B, C, D), Übergangsplanung (E, F) und Architektursteuerung (G, H) (siehe Abbildung 28). Alle Iterationszyklen werden von einem Anforderungsmanagement

begleitet, welches über den gesamten Zyklus die Anforderungen und deren Auswirkungen dokumentiert (The Open Group 2020).

Für jeden Baustein des Frameworks kann die entwickelte Architektur über ein Set aus Blöcken sowie Spezifikationen, welche die Abhängigkeiten der einzelnen Blöcke untereinander beschreiben, abgebildet werden. Die Blöcke wiederum ermöglichen eine weitere Untergliederung, wodurch sich der Detailgrad an den der Referenzarchitektur anpassen lässt. Dabei halten Architecture Building Blocks (ABBs) die Anforderungen an die Architektur (beispielsweise Business-, Daten- oder Technologieanforderungen) fest und bilden den Grundstein für spätere Solution Building Blocks (SBBs), in welchen die Komponenten und Funktionalitäten implementiert werden. Pro ABB können fundamentale Funktionalitäten und Attribute, Schnittstellen (Import & Export), die Interoperabilität und Beziehungen zu anderen Building Blocks, Abhängigkeiten der Building Blocks mit benötigten Funktionen sowie der Bezug zu Organisationseinheiten und Richtlinien näher spezifiziert werden.

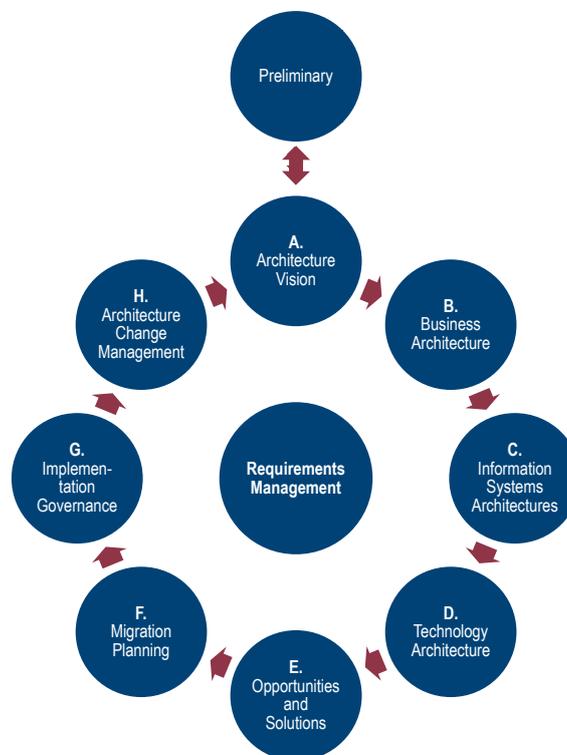


ABBILDUNG 28: TOGAF – ARCHITECTURE DEVELOPMENT METHOD

Da das bereits etablierte Framework TOGAF alle benötigten Funktionalitäten zur Abbildung der Referenzarchitektur bereitstellt und deren Layer sich in die bestehende Struktur der Bausteine integrieren lassen, wird im Weiteren das Framework TOGAF zur Abbildung der Referenzarchitektur genutzt. Dabei wird sich auf die ersten vier Bausteine (A-D) aus TOGAF beschränkt, eine spätere mögliche Nutzung des bestehenden Modells in der Umsetzung der Referenzarchitektur ist durch dieses Framework vorbereitet. Zudem kann das Framework noch um weitere Bausteine ergänzt werden, um beispielsweise die Perspektive Sicherheit in einer detaillierteren Modellierung abzubilden.

In Baustein A („Architecture Vision“) werden die grundlegenden Eigenschaften und der Zweck der Architektur definiert, sowie die Voraussetzungen zur Umsetzung und Einführung geprüft. Dieser Baustein entspricht der übergreifenden Beschreibung der ESP.

In Baustein B („Business Architecture“) wird das Ergebnis der Geschäftsprozessmodellierung abgelegt. Zudem werden die Strategie, Aufbauorganisation, Geschäftsprozesse und Business Capabilities betrachtet. Der Baustein entspricht dem **Business Layer** ergänzt um Geschäftsprozesse des **Process Layer**. Baustein C („Information Systems Architectures“) lässt sich in die Beschreibung der Datenarchitektur und in die Anwendungsarchitektur untergliedern. In der Datenarchitektur werden Daten(-modelle) und Beziehungen, die notwendig für die Durchführung der Geschäftsprozesse sind, beschrieben. Diese bilden somit den **Information Layer** ab. In der Anwendungsarchitektur werden die Anwendungen verwaltet, welche notwendig für die Ausführung der Geschäftsprozesse sind. Auch werden die Beziehungen und Schnittstellen der Anwendungen untereinander betrachtet. Diese bildet somit den **Functional Layer** sowie den **Process Layer** ab. Baustein D („Technology Architecture“) beschreibt den Aufbau und Betrieb der IT-Infrastruktur. Abschließend wird hier also der **Component Layer** abgebildet. Durch die Untergliederung in Building Blocks mit den zugehörigen Spezifikationen lassen sich durch TOGAF komplexe Strukturen einfach abbilden, sowie Lücken im aktuellen Stand der Architektur durch eine gezielte Visualisierung einzelner Bereiche bzw. Building Blocks detektieren.

Im Projektverlauf wurde in einem ersten Schritt der Ist-Zustand in das Framework TOGAF eingepflegt. Hierbei besteht die Möglichkeit, bereits bestehende Prozesse und Definitionen in ARIS zu integrieren. Weitere Änderungen und Detaillierungen der Referenzarchitektur im Projektfortschritt werden entsprechend dem folgend beschriebenen Entscheidungsprozess dokumentiert und eingepflegt.

4.2.2 Referenzarchitekturentwicklungsprozess mittels Architecture Decision Log

Aufbauend auf dem aktuell modellierten Zustand in TOGAF werden alle weiteren Entscheidungen zur Änderung und Detaillierung der Referenzarchitektur gemäß dem Referenzarchitekturentwicklungsprozess mittels Architecture Decision LOG (ADL) dokumentiert. Dabei wird jede Architekturentscheidung („Architecture Decision“ – AD) in einem „Architecture Decision Record“ (ADR) festgehalten. Der ADR stellt hier eine Textdatei dar, welche eine architektonische Entscheidung gemäß vorgegebener Strukturierung festhält. Standardisiert enthält jeder ADR neben notwendigen Metadaten (Stakeholder, Status des ADR, Autor etc.) eine Einbettung der Entscheidung in den Kontext, die vorgeschlagene Änderung sowie alle daraus folgenden Änderungen. Ergänzend zur Textvorlage des ADR kann dieser bei Bedarf durch Grafiken oder Referenzimplementierungen ergänzt werden. Nach Erstellung durchläuft der ADR den Referenzarchitekturentwicklungsprozess, wobei das Ergebnis des Prozesses im ADL festgehalten wird (siehe Abbildung 29). Im Prozess werden drei Rollen mit unterschiedlichen Berechtigungen vergeben:

- Der **Autor** entwirft den ADR. Alle nachfolgenden Änderungen werden ebenfalls durch den Autor eingepflegt.
- Die **Community** gibt nach einem ersten Entwurf des ADR kontinuierliches Feedback in Form von direkten Änderungsvorschlägen oder Kommentaren zum ADR. Die Community besteht mindestens aus den Core-Mitgliedern, kann jedoch frei wählbar erweitert werden.
- Der **Core** bildet das Kontrollgremium zur Entscheidungsfindung über jeden eingereichten ADR. Entscheidungen werden dabei zu Regelterminen aller Core-Mitglieder getroffen.

Der Referenzarchitekturentwicklungsprozess inklusive der definierten Rollen ist in Abbildung 29 dargestellt. Dabei ändert sich je nach Status des ADRs im Prozess dessen Status in den dazugehörigen Metadaten. Nach einem Entwurf des ADR durch den Autor wird dieser im Status *draft* der Community über Git bereitgestellt. Das folgende Feedback sowie alle späteren Änderungen am ADR werden ab diesem Zeitpunkt dokumentiert und später archiviert. Ausgehend

vom Feedback der Community kann der Autor seinen final überarbeiteten ADR in den ADL im Status *decide* hochladen, wo im nächsten Regeltermin über diesen entschieden wird. In diesem Status kann der ADR nicht mehr geändert werden. Nach Entscheidung des Core kann der ADR in unterschiedlichen Status vorliegen: Falls lediglich ein formaler Fehler (beispielsweise Rechtschreibung, Grammatik) im ADR besteht, wird dieser in den Status *revise* gesetzt, in dem der Autor diesen erneut überarbeiten kann. Je nach Auswirkungen kann der Core den ADR zudem ablehnen (*rejected*) oder genehmigen (*accepted*). Nach erfolgter Genehmigung wird die vorgeschlagene Änderung in TOGAF eingepflegt und dies über den Status *implemented* dokumentiert. Abschließend können archivierte ADRs über neue Änderungen überholt (*superseded*) oder negiert (*deprecated*) werden.

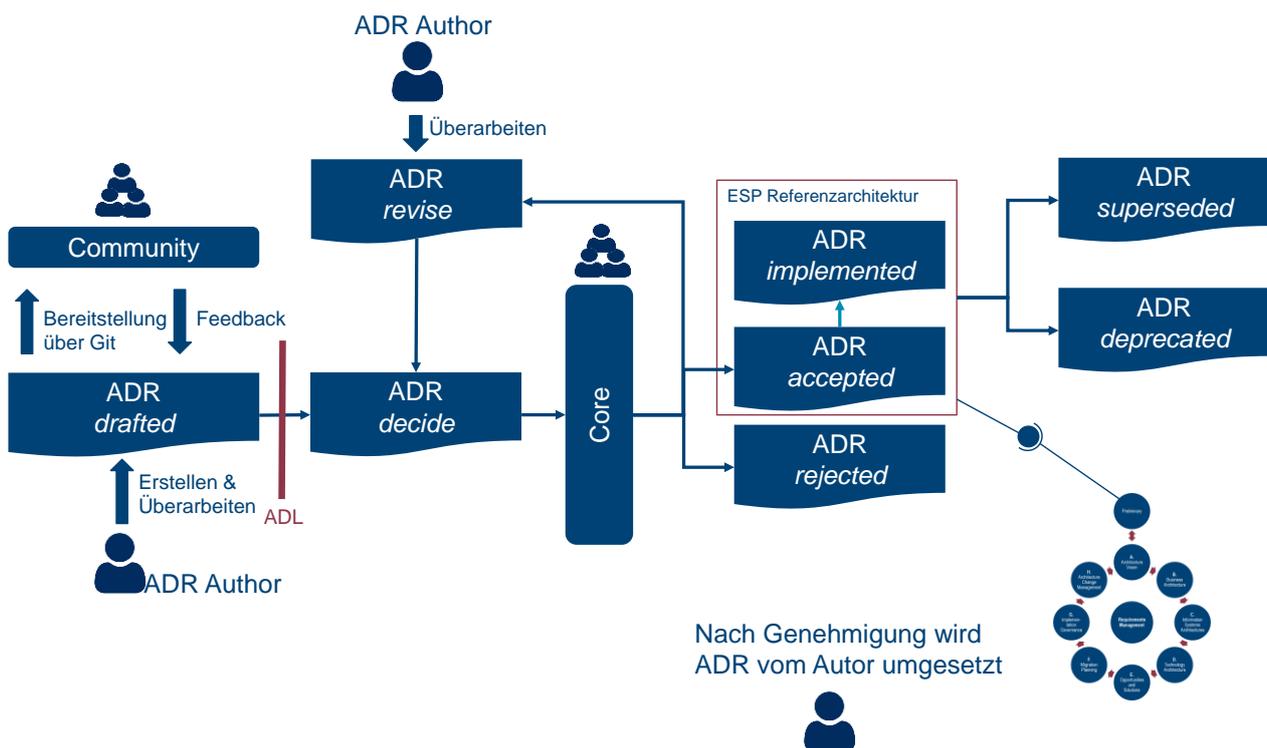


ABBILDUNG 29: REFERENZARCHITEKTURENTWICKLUNGSPROZESS

Durch den Referenzarchitekturentwicklungsprozess unter Nutzung des ADLs wird eine durchgängige Dokumentation aller getroffenen Entscheidungen entlang der Entwicklung der Referenzarchitektur, eingebettet in den jeweiligen Kontext, erreicht. Die dadurch gewährleistete Nachvollziehbarkeit und Transparenz führt zu einem effizienten Entwicklungsprozess in dem alle gewonnenen Erfahrungen (und Fehlentscheidungen) in zukünftigen Entscheidungen berücksichtigt werden können. Zudem kann über die frei erweiterbare Community ein uneingeschränktes Feedback mit einfließen, in welchem sich auch auf archivierte Entscheidungen bezogen werden kann.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Das vorliegende Diskussionspapier beschreibt mit der Referenzarchitektur für die ESP einen Rahmen für die Entwicklung von Systemen und Lösungen für den automatisierten Handel von Energieflexibilität. Die Referenzarchitektur dient als Basis für die Ableitung konkreter IT-Systemarchitekturen und unterstützt Unternehmen dabei, eine entsprechende Architektur der UP zu implementieren und vorhandene Systeme und Anlagen zu integrieren. Auf Seiten der MP bildet die Referenzarchitektur den erarbeiteten Status quo ab, welcher die Integration verschiedener Märkte und Services in der Meta-Plattform aufzeigt. Für Entwickler dient die Referenzarchitektur als Vorlage, auf deren Basis spezifische Anforderungen abgeleitet und diese in IT-Plattformen implementiert werden können. Das Diskussionspapier soll Sie, liebe Leserinnen und Leser, zur Diskussion der Konzepte anregen, deren Ergebnisse wiederum in die Weiterentwicklung der Referenzarchitektur einfließen können.

Auf Basis dieser Diskussionen sollen die Referenzarchitektur der ESP mit ihren Konzepten der UP und MP weiter verfeinert werden. Querschnittsthemen wie das EFDM oder das Sicherheitskonzept der Plattformen werden weiterhin thematisiert und laufend aktualisiert. Darauf aufbauend wird auch die prototypische Umsetzung der Plattformen und zugehörigen Services anhand der Demonstratoren, insbesondere in der Modellregion Augsburg, weiter vorangetrieben und bis 2022 praktisch evaluiert.

Die daraus generierten Erkenntnisse werden genutzt, um der modularen ESP perspektivisch weitere Energieträger und Funktionalitäten hinzuzufügen und sie damit zu einem der wichtigsten IT-Werkzeug zur Energiewende weiterzuentwickeln. Die Plattform ermöglicht den teilnehmenden Unternehmen anschließend eine aktive Partizipation am Energiemarkt: einerseits durch eine akkuratere Bedarfsplanung (Konsumentenrolle), andererseits durch Angebot von Energieflexibilitätpotenzialen (Anbieterrolle). Diese Rollen können je nach Gegebenheiten flexibel gewechselt werden, um die industrielle Produktion an die zunehmend volatilen Energiemärkte zu adaptieren.

LITERATURVERZEICHNIS

- Albadi, M. H.; El-Saadany, E. F. (2008): A summary of demand response in electricity markets. In: *Electric Power Systems Research* 78 (11), S. 1989–1996. DOI: 10.1016/j.epsr.2008.04.002.
- Battaglini, A.; Komendantova, N.; Brtnik, P.; Patt, A. (2012): Perception of barriers for expansion of electricity grids in the European Union. In: *Energy Policy* 47, S. 254–259. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.04.065.
- Bauer, D.; Abele, E.; Ahrens, R.; Bauernhansl, T.; Fridgen, G.; Jarke, M. et al. (2017a): Flexible IT-platform to Synchronize Energy Demands with Volatile Markets. In: *Procedia CIRP* 63, S. 318–323. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.088.
- Bauer, D.; Stock, D.; Bauernhansl, T. (2017b): Movement Towards Service-orientation and App-orientation in Manufacturing IT. In: *Procedia CIRP* 62, S. 199–204. DOI: 10.1016/j.procir.2016.06.079.
- Bauernhansl, T.; Bauer, D.; Abele, E.; Ahrens, R.; Bank, L.; Brugger, M. et al. (2019): Industrie 4.0 als Befähiger für Energieflexibilität. In: A. Sauer, E. Abele und H. U. Buhl (Hg.): *Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt - Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung - SynErgie*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 245–312.
- bdew (2019): B3S Aggregatoren. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Online verfügbar unter https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20190301_B3S-fuer-Anlagen-zur-Steuerung-und-Buendelung-elektrischer-Leistung.pdf, zuletzt geprüft am 17.09.2020.
- Bertsch, J.; Fridgen, G.; Sachs, T.; Schöpf, M.; Schweter, H.; Sitzmann, A. (2017): Ausgangsbedingungen für die Vermarktung von Nachfrageflexibilität: Status-Quo-Analyse und Metastudie. Bayreuth (Bayreuther Arbeitspapiere zur Wirtschaftsinformatik). Online verfügbar unter <https://epub.uni-bayreuth.de/3442/>, zuletzt geprüft am 18.09.20.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (2016): Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz (BSI-Kritisverordnung - BSI-KritisV). BSI-KritisV. Fundstelle: BGBl. I S. 958. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/bsi-kritisv/BSI-KritisV.pdf>, zuletzt geprüft am 17.09.2020.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf, zuletzt geprüft am 13.09.2020.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf>, zuletzt geprüft am 18.09.2020.
- Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (2020): Quartalsbericht Netz- und Systemsicherheit - Gesamtes Jahr 2019. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2020/Quartalszahlen_Gesamtjahr_2019.pdf, zuletzt geprüft am 18.09.2020.
- Bundesrepublik Deutschland (2005): EnWG - Energiewirtschaftsgesetz. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/, zuletzt geprüft am 17.09.2020.
- Bundesrepublik Deutschland (2016): Das IT-Sicherheitsgesetz. Online verfügbar unter <https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Broschueren/IT-Sicherheitsgesetz.pdf>, zuletzt geprüft am 17.09.2020.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (2019): Rollenmodell für die Marktkommunikation im deutschen Energiemarkt. Online verfügbar unter

https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20190507_Rollenmodell-MAK-Version1-2-END.pdf, zuletzt geprüft am 31.08.2020.

Channel, J.; Churmi, E.; Ngyen, P.; Prior, E.; Syme, A.; Jansen, H. et al.: Energy Darwinism II. Why a Low Carbon Future Doesn't Have to Cost the Earth. Hg. v. Citi GPS: Global Perspectives & Solutions. London. Online verfügbar unter <https://ir.citi.com/hsq32Jl1m4alzicMqH8sBkPnbsqfnwy4Jgb1J2kIPYWlw5eM8yD3FY9VbGpK%2Baax>, zuletzt geprüft am 18.09.20.

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

DIN SPEC 91345:2016-04: DIN SPEC 91345:2016-04, Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0).

Eckert, C. (2014): IT-Sicherheit. Konzepte - Verfahren - Protokolle. 9., aktualisierte Aufl. Berlin: De Gruyter Oldenbourg.

ENTSO-E (2020): The harmonised electricity market role model. Online verfügbar unter https://www.entsoe.eu/Documents/EDI/Library/HRM/Harmonised_Role_Model_2020-01.pdf, zuletzt geprüft am 31.08.2020.

EU-Richtlinie 2008/114/EG: Richtlinie 2008/114/EG des Rates vom 8. Dezember 2008 über die Ermittlung und Ausweisung europäischer kritischer Infrastrukturen und die Bewertung der Notwendigkeit, ihren Schutz zu verbessern. Fundstelle: Amtsblatt der Europäischen Union. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32008L0114>, zuletzt geprüft am 17.09.2020.

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

eurostat (2020): Share of energy from renewable sources. Online verfügbar unter https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?query=BOOKMARK_DS-1032380_QID_40E13C63_UID_-3F171EB0&layout=TIME,C,X,0;GEO,L,Y,0;NRG_BAL,L,Z,0;UNIT,L,Z,1;INDICATORS,C,Z,2;&zSelection=DS-1032380UNIT,PC;DS-1032380NRG_BAL,REN_ELC;DS-1032380INDICATORS,OBS_FLAG;&rankName1=UNIT_1_2_-1_2&rankName2=NRG-BAL_1_2_-1_2&rankName3=INDICATORS_1_2_-1_2&rankName4=TIME_1_0_0_0&rankName5=GEO_1_2_0_1&ppcRK=FIRST&ppcSO=ASC&sortC=ASC_-1_FIRST&rStp=&cStp=&rDCh=&cDCh=&rDM=true&cDM=true&footnes=false&empty=false&wai=false&time_mode=NONE&time_most_recent=false&lang=EN&cfo=%23%23%23%2C%23%23%23.%23%23%23, zuletzt geprüft am 13.09.2020.

Götz, B.; Schel, D.; Bauer, D.; Henkel, C.; Einberger, P.; Bauernhansl, T. (2018): Challenges of Production Microservices. In: *Procedia CIRP* 67, S. 167–172. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.194.

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

VDS Richtlinie 3473: Informationssicherheitsmanagementsystem für kleinere und mittlere Unternehmen (KMU). Online verfügbar unter <https://shop.vds.de/de/download/766b96741ea1d8c70d0368c5a6b60e24/>, zuletzt geprüft am 25.09.20.

International Energy Agency (2019): Key World Energy Statistics 2019. Paris: International Energy Agency.

ISO/IEC 27000:2018: ISO/IEC 27000:2018, Information technology - Security techniques - Information security management systems - Overview and vocabulary. Online verfügbar unter <https://www.iso.org/standard/73906.html>, zuletzt geprüft am 17.09.2020.

ISO/IEC/IEEE 42010:2011: ISO/IEC/IEEE 42010:2011. Systems and software engineering - Architecture description.

- Jazayeri, P.; Schellenberg, A.; Rosehart, W. D.; Doudna, J.; Widergren, S.; Lawrence, D. et al. (2005): A Survey of Load Control Programs for Price and System Stability. In: *IEEE Trans. Power Syst.* 20 (3), S. 1504–1509. DOI: 10.1109/TPWRS.2005.852147.
- Jones, D.; Moore, C. (2020): Renewables beat fossil fuels. A half-yearly analysis of Europe's electricity transition. Online verfügbar unter <https://ember-climate.org/project/renewables-beat-fossil-fuels/>, zuletzt geprüft am 13.09.2020.
- Körner, M.-F.; Bauer, D.; Keller, R.; Rösch, M.; Schlereth, A.; Simon, P. et al. (2019): Extending the Automation Pyramid for Industrial Demand Response. In: *Procedia CIRP* 81, S. 998–1003. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.241.
- Lund, H.; Østergaard, P. A.; Connolly, D.; Ridjan, I.; Mathiesen, B. V.; Hvelplund, F. et al. (2016): Energy Storage and Smart Energy Systems. In: *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management* 11, S. 3–14. DOI: 10.5278/IJSEPM.2016.11.2.
- Lund, P. D.; Lindgren, J.; Mikkola, J.; Salpakari, J. (2015): Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45, S. 785–807. DOI: 10.1016/j.rser.2015.01.057.
- Mann, M. E.; Rahmstorf, S.; Kornhuber, K.; Steinman, B. A.; Miller, S. K.; Coumou, D. (2017): Influence of Anthropogenic Climate Change on Planetary Wave Resonance and Extreme Weather Events. In: *Scientific Reports* 7, 1-10. DOI: 10.1038/srep45242.
- Markle-Huss, J.; Feuerriegel, S.; Neumann, D. (2016): Decision model for sustainable electricity procurement using nationwide demand response. In: Tung X. Bui und Ralph H. Sprague (Hg.): Proceedings of the 49th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. 5-8 January 2016, Kauai, Hawaii. 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). Koloa, HI, 1/5/2016 - 1/8/2016. Hawaii International Conference on System Sciences; Annual Hawaii International Conference on System Sciences; HICSS. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1010–1019.
- Mell, P.; Grance, T. (2017): The NIST Definition of Cloud Computing. Online verfügbar unter <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf>, zuletzt geprüft am 19.06.2020.
- Müller, T.; Möst, D. (2018): Demand Response Potential: Available when Needed? In: *Energy Policy* 115, S. 181–198. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.12.025.
- Object Management Group (OMG) (2020): Common Object Request Broker Architecture. Online verfügbar unter <https://www.omg.org/spec/CORBA/About-CORBA/>, zuletzt geprüft am 31.08.2020.
- Otto, B.; Steinbuß, S.; Teuscher, A.; Lohmann, S. (2019): REFERENCE ARCHITECTURE MODEL. Hg. v. International Data Spaces Association. Online verfügbar unter <https://www.internationaldataspaces.org/wp-content/uploads/2019/03/IDS-Reference-Architecture-Model-3.0.pdf>, zuletzt geprüft am 05.08.2020.
- Palensky, P.; Dietrich, D. (2011): Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. In: *IEEE Trans. Ind. Inf.* 7 (3), S. 381–388. DOI: 10.1109/TII.2011.2158841.
- Papaefthymiou, G.; Haesen, E.; Sach, T. (2018): Power System Flexibility Tracker: Indicators to track flexibility progress towards high-RES systems. In: *Renewable Energy* 127, S. 1026–1035. DOI: 10.1016/j.renene.2018.04.094.
- Pfeilsticker, L.; Colangelo, E.; Sauer, A. (2019): Energy Flexibility – A new Target Dimension in Manufacturing System Design and Operation. In: *Procedia Manufacturing* 33, S. 51–58. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.04.008.
- Porter, M. E. (1985): Competitive advantage. Creating and sustaining superior performance. New York, NY: Free Press.
- Rautenstrauch, C.; Schulze, T. (2003): Informatik für Wirtschaftswissenschaftler und Wirtschaftsinformatiker. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch).
- Redl, C.; Hein, F.; Buck, M.; Graichen, P.; Jones, D. (2020): The European Power Sector in 2019. Up-to-Date Analysis on the Electricity Transition. Agora Energiewende, Sandbag. Online verfügbar unter <https://ember-climate.org/wp-content/uploads/2020/02/Sandbag-European-Power-Sector-Review-2019.pdf>, zuletzt geprüft am 13.09.2020.

- Rösch, M.; Bauer, D.; Haupt, L.; Keller, R.; Bauernhansl, T.; Fridgen, G. et al. (2019a): Harnessing the Full Potential of Industrial Demand-Side Flexibility: An End-to-End Approach Connecting Machines with Markets through Service-Oriented IT Platforms. In: *Applied Sciences* 9 (18), S. 3796. DOI: 10.3390/app9183796.
- Rösch, M.; Brugger, M.; Braunreuther, S.; Reinhart, G. (2017): Klassifizierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112(9), S. 567–571. DOI: 10.3139/104.111774.
- Rösch, Martin; Lukas, Martin; Schultz, Cedric; Braunreuther, Stefan; Reinhart, Gunther (2019b): An approach towards a cost-based production control for energy flexibility. In: *Procedia CIRP* 79, S. 227–232. DOI: 10.1016/j.procir.2019.02.054.
- Roth, S.; Schott, P.; Ebinger, K.; Halbrügge, S.; Kleinertz, B.; Köberlein, J. et al. (2020): The Challenges and Opportunities of Energy-Flexible Factories: A Holistic Case Study of the Model Region Augsburg in Germany. In: *Sustainability* 12 (1), S. 360. DOI: 10.3390/su12010360.
- Salza, P.; Hemberg, E.; Ferrucci, F.; O'Reilly, U.-M. (2017): cCube: a cloud microservices architecture for evolutionary machine learning classification. In: *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion (GECCO '17)*, S. 137–138.
- Sauer, A.; Abele, E.; Buhl, H. U. (2019a): Einleitung. In: A. Sauer, E. Abele und H. U. Buhl (Hg.): *Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt - Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung - SynErgie*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 4–8.
- Sauer, A.; Abele, E.; Buhl, H. U. (Hg.) (2019b): *Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt - Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung - SynErgie*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Schel, D.; Bauer, D.; Vasquez, F. G.; Schulz, F.; Bauernhansl, T. (2018a): IT Platform for Energy Demand Synchronization Among Manufacturing Companies. In: *Procedia CIRP* 72, S. 826–831. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.237.
- Schel, D.; Henkel, C.; Stock, D.; Meyer, O.; Rauhöft, G.; Einberger, P. et al. (2018b): Manufacturing Service Bus: An Implementation. In: *Procedia CIRP* 67, 179-138. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.196.
- Schott, P.; Ahrens, R.; Bauer, D.; Hering, F.; Keller, R.; Pullmann, J. et al. (2018): Flexible IT platform for synchronizing energy demands with volatile markets. In: *it - Information Technology* 60 (3), S. 155–164. DOI: 10.1515/itit-2018-0001.
- Schott, P.; Sedlmeir, Jo.; Strobel, N.; Weber, T.; Fridgen, G.; Abele, E. (2019): A Generic Data Model for Describing Flexibility in Power Markets. In: *Energies* 12 (10), S. 1893. DOI: 10.3390/en12101893.
- Seifermann, S.; Abele, E.; Sauer, A.; Bauer, D. (2019): Integrierte Betrachtung technischer, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Aspekte industriellen Demand-Side Managements. In: *Internationaler ETG-Kongress 2019 : Das Gesamtsystem im Fokus der Energiewende. 08. und 09. Mai 2019, Esslingen am Neckar. - Frankfurt am Main*.
- Seitz, P.; Abele, E.; Bank, L.; Bauernhansl, T.; Colangelo, E.; Fridgen, G. et al. (2019): IT-based Architecture for Power Market Oriented Optimization at Multiple Levels in Production Processes. In: *Procedia CIRP* 81, S. 618–623. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.165.
- Smart Grid Coordination Group (2012): *Smart Grid Reference Architecture*. Hg. v. CEN-CENELEC-ETSI. Brussels, Belgium. Online verfügbar unter http://gridscientific.com/images/Smart_Grid_Reference_Artitecture.pdf.
- Steurer, M. (2017): *Analyse von Demand Side Integration im Hinblick auf eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung*. Univ. Stuttgart, Diss., 2017.
- Stock, D.; Stöhr, M.; Rauschecker, U.; Bauernhansl, T. (2014): Cloud-based Platform to Facilitate Access to Manufacturing IT. In: *Procedia CIRP* 25, S. 320–328. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.045.
- The Open Group (Hg.) (2020): *The TOGAF Standard*. Online verfügbar unter <https://www.opengroup.org/togaf>, zuletzt aktualisiert am 05.08.2020.

TTTECH (2020): Time-Sensitive Networking (TSN). IEEE Standard Ethernet for Guaranteed Real-Time Communication. Online verfügbar unter <https://www.tttech.com/technologies/time-sensitive-networking-tsn/>, zuletzt geprüft am 11.08.2020.

Umweltbundesamt (2020): Erneuerbare Energien in Zahlen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>, zuletzt geprüft am 25.09.20.

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

USEF Foundation (Hg.) (2015): USEF: The framework specifications. Online verfügbar unter <https://www.usef.energy/download-the-framework/a-flexibility-market-design/>, zuletzt geprüft am 24.08.2020.

VDI/VDE (2013): Cyber-Physical Systems. Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation. Online verfügbar unter https://www.vdi.de/uploads/media/Stellungnahme_Cyber-Physical_Systems.pdf, zuletzt geprüft am 25.03.2019.

VDI/VDE 2182 Blatt 1, 2020-01: VDI/VDE 2182 Blatt 1, Informationssicherheit in der industriellen Automatisierung - Allgemeines Vorgehensmodell.

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

Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) (2017): Orientierungsleitfaden für Hersteller zur IEC 62443. Online verfügbar unter https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2017/April/Orientierungsleitfaden_fuer_Hersteller_IEC_62443/Orientierungsleitfaden_fuer_Hersteller_IEC_62443.pdf, zuletzt geprüft am 17.09.2020.

