

Kopernikus-Projekt SynErgie

IMPULSPAPIER: DIE ENERGIE- SYNCHRONISATIONS- PLATTFORM

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Vorwort und Danksagung

Diese Publikation baut auf der Reihe der im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie veröffentlichten Diskussionspapiere zur Energiesynchronisationsplattform (ESP) auf. In ihrer Form als Impulspapier soll Sie die Ergebnisse und erarbeiteten Lösungen zum Abschluss der Entwicklung im Strang Flexibilitätsautomatisierung der dritten Förderphase zusammenfassen, in Kontext setzen und so für den Transfer in die Praxis bereitstellen.

Folgende Diskussionspapiere sind im Vorfeld zu dieser Publikation erschienen und wurden von den genannten Ansprechpersonen koordiniert:

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

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

Wir bedanken uns herzlich beim Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR, bis 06. Mai 2025: Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF) für die finanzielle Unterstützung und beim Projektträger Jülich (PtJ) für die Betreuung des Kopernikus-Projektes SynErgie.

Des Weiteren bedanken wir uns bei allen Kolleginnen und Kollegen aus dem SynErgie-Projektconsortium, die die Entwicklung der ESP im Laufe der drei Förderphasen mit ihrer Arbeit unterstützt und begleitet haben sowie allen, die ganz allgemein durch Ihre Beteiligung zur Entstehung der in diesem Impulspapier dargestellten Konzepte beigetragen haben.

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

<https://synergie-projekt.de/>

<https://www.kopernikus-projekte.de/>

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	9
1.1.	Das Kopernikus-Projekt SynErgie	9
1.2.	Einordnung und Motivation	9
1.3.	Ziele und Vision der Energiesynchronisationsplattform	10
1.4.	Leseempfehlungen zur Einarbeitung in das Kopernikus-Projekt SynErgie	11
2.	Energieflexibilitätsdatenmodell (EFDM)	13
2.1.	Notwendigkeit standardisierter Energieflexibilitätsmodelle	13
2.2.	Kontext und Struktur	13
2.3.	Klassen des EFDM	14
2.4.	Neuerungen in der Version 1.1	16
3.	Erweiterte Referenzarchitektur der Unternehmensplattform	18
3.1.	Referenzarchitektur für die Umsetzung energieflexibler IIoT-Plattformen	18
3.2.	Leitfaden für die Umsetzung energieflexibler IIoT-Plattformen	20
3.3.	Neue Komponenten der Referenzarchitektur	20
3.4.	Anwendung des EFDM in der Unternehmensplattform	22
3.5.	Status-Workflow für EFDM-Instanzen	23
3.6.	Standardisiertes EFDM-Interface	25
4.	Standardisierung	28
4.1.	Konnektor-Framework	28
4.2.	Verwaltungsschale für EFDM	29
4.3.	OPC UA Companion Specification und Building Block Energy Management	32
4.4.	Vorteile der Standardisierung für die Energieflexibilisierung	34
5.	Anwendungen der ESP und der IKT-Artefakte in der Praxis	40
5.1.	Anwendungen in mittelständischen Unternehmen	40
5.2.	Anwendungen in energieintensiven Unternehmen	42
5.3.	Anwendungen in Quartieren	45
6.	Fazit	50
7.	Literaturverzeichnis	51

Abbildungen

Abbildung 1: Zusammenspiel von Plattformen und Services.....	10
Abbildung 2: Konzept der UP.....	11
Abbildung 3: Klassen des EFDM v.1.1	14
Abbildung 4: Von der IIoT-Plattform zur energieflexiblen SynErgie-UP.....	19
Abbildung 5: Komponentenübersicht aus der UP-Referenzarchitektur	21
Abbildung 6 : Status-Workflow eines Flexibilitätsraums.....	23
Abbildung 7: Status-Workflow einer Flexible-Last-Maßnahmen.....	24
Abbildung 8: Kommunikation zwischen Unternehmenssystem und EFDM-Interface	26
Abbildung 9: Konnektor-Framework und Aufbau der Cumulocity UP.....	29
Abbildung 10: Einordnung einer AAS-Infrastruktur in die Architektur der UP	32
Abbildung 11: Einordnung der OPC UA Informationsmodelle.....	33
Abbildung 12: Schematische Darstellung einer Durchlaufreinigungsanlage	35
Abbildung 13: Parameter des Anwendungsfalls im Referenzbetrieb.....	36
Abbildung 14: Parameter des Anwendungsfalls im optimierten Betrieb	37

Abkürzungen

ESP	Energiesynchronisationsplattform
EFDM	Energieflexibilitätsdatenmodell
IIoT	Industrial Internet of Things
UP	Unternehmensplattform
MP	Marktplattform
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
MES	Fertigungssteuerung (Manufacturing Execution System)
ERP	Unternehmensressourcenplanung (Enterprise Resource Planning)
EFMS	Energieflexibilitätsmanagementservice
SDK	Software Development Kits
API	Schnittstelle
WMS	Workflow-Management-Systeme
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
AAS	Verwaltungsschale (Asset Administration Shell)
CS	Companion Specification
SM	Submodell
SMT	Submodell-Template
IDTA	Industrial Digital Twin Association
BHKW	Blockheizkraftwerk

1. Einleitung

1.1. Das Kopernikus-Projekt SynErgie

Als Teil der Kopernikus-Projekte hat das Gesamtprojekt „Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung“ – kurz „SynErgie“ – zum Ziel, bis 2026 alle technischen und marktseitigen Voraussetzungen in Einklang mit rechtlichen und sozialen Aspekten zu schaffen, um den Energiebedarf der deutschen Industrie effektiv mit dem volatilen Energieangebot zu synchronisieren. Das Projekt SynErgie leistet durch Innovationen einen maßgeblichen Beitrag zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende. Hierfür erweitert SynErgie die bisherigen umfangreichen Maßnahmen der deutschen Industrie zur Energieeffizienz um den Aspekt der Energieflexibilität/Nachfrageflexibilität. Dieser Ansatz soll den Energiebedarf von Produktionsprozessen auf effiziente Weise mit dem fluktuierenden Energieangebot synchronisieren.

Dabei hat sich SynErgie vier zentralen Themenfeldern gewidmet: Flexibilitätstechnologieentwicklung, Flexibilitätsumsetzung, Flexibilitätsautomatisierung und Flexibilitätsvermarktung. Die Flexibilitätstechnologieentwicklung erforscht Methoden zur Befähigung von Produktionstechnologien zur Bereitstellung von Flexibilität. Die Flexibilitätsumsetzung implementiert diese Konzepte durch Pilotprojekte in der Industrie. Die Flexibilitätsautomatisierung standardisiert die notwendigen Plattformen und Datenmodelle. Die Flexibilitätsvermarktung, schließlich, schafft die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Bereitstellung industrieller Energieflexibilität.

1.2. Einordnung und Motivation

Das Forschungsvorhaben führt zu besseren Konditionen der Energiebeschaffung für die Unternehmen und erschließt für das Stromsystem zusätzliche und leicht verfügbare Flexibilitätskapazitäten. Die Ertüchtigung vorhandener sowie die Erschließung neuer Flexibilitätspotenziale durch innovative und neuartige technische Lösungen bildet die Grundlage, auf der die im Projekt aufgebaute Energiesynchronisationsplattform (ESP) aufbaut. Diese steuert und überwacht die Energieverteilung innerhalb des Produktionssystems und reagiert hochdynamisch auf Flexibilitätsanforderungen des Stromsystems. Um den Energiebedarf kostenoptimal decken zu können, nehmen die Unternehmen aktiv am Strommarkt teil und beeinflussen prädiktiv die Produktionsplanung. In den Industriewerken wird Flexibilität zu einem frei wählbaren Automatisierungsgrad in Angebote für das Stromsystem übersetzt und effizient vermarktet. Integriert werden die technischen Lösungen und die ökonomische Betrachtung mit sozialen und ökologischen Aspekten.

Das vorliegende Impulspapier fasst in kurzer und anwendungsorientierter Form den aktuellen Stand des Projekts rund um die Flexibilitätsautomatisierung zusammen und regt zur Diskussion an.

Der Aufbau gliedert sich dabei wie folgt: Zunächst wird im folgenden Unterkapitel die ESP samt Zielen und Visionen vorgestellt. Anschließend widmet sich Kapitel 2 dem aktuellen Stand des Energieflexibilitätsdatenmodells (EFDm). Ein weiterer Schwerpunkt ist die Neuausrichtung der Referenzarchitektur auf bestehende Industrial-Internet-of-Things-Plattformen (IIoT-Plattformen), wel-

che in Kapitel 3 behandelt wird. Eine Säule der Flexibilitätsautomatisierung ist die Standardisierung in Kapitel 4, in welchem der Fokus auf den Themen Konnektor-Framework, Verwaltungsschale und Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) Companion Specification gelegt wurde. Das Impulspapier schließt inhaltlich folgend in Kapitel 5 mit Anwendungen der ESP und der Informations- und Kommunikationstechnologie-, kurz IKT-Artefakte in der industriellen Praxis ab und gliedert diese dabei in Anwendungen in mittelständischen Unternehmen, energieintensiven Unternehmen und in Quartieren. Kapitel 6 fasst die wesentlichen Erkenntnisse nochmals in einem Fazit zusammen und gibt einen Ausblick.

1.3. Ziele und Vision der Energiesynchronisationsplattform

Die automatisierte Erfassung und Verarbeitung von Energieflexibilitätsdaten mittels maßgeschneiderter Informations- und Kommunikationstechnik ist nicht nur für die Minimierung von Energiekosten unerlässlich, sondern bildet zugleich die Grundlage, um Energieflexibilität digital am Energiemarkt anzubieten. Die [ESP](#) zielt darauf ab, den gesamten Prozess des automatisierten Energieflexibilitätshandels von der Maschine bis zu den Vermarktungsservices zu standardisieren und zu automatisieren. Hierfür ist insbesondere die Integration von Energieflexibilitätsmaßnahmen in die Produktionsplanung und -steuerung von Industrieunternehmen notwendig. Für Unternehmen als Plattformnutzer eröffnen sich durch den Einsatz von Energieflexibilität (unterstützt durch eine ESP) neue Geschäftsmodelle. Unternehmen können durch die Umsetzung von Energieflexibilität sowohl Einsparungen durch die Reduzierung der Strombeschaffungskosten und/oder der Netzentgelte sowie weiterer Umlagen erzielen als auch Erlöse generieren.

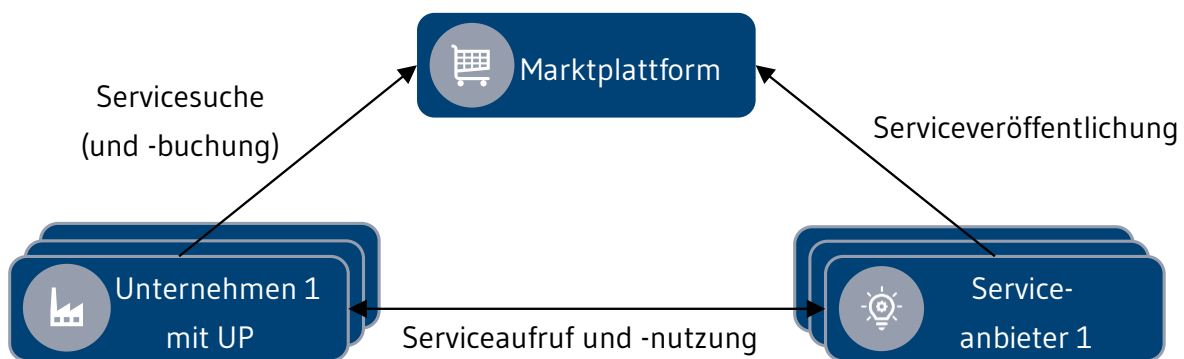


Abbildung 1: Zusammenspiel von Plattformen und Services

Im Unterschied zu herkömmlichen, rein softwarebasierten Lösungen versteht sich die ESP als übergeordnetes Gesamtkonzept, in dem zwei Teilplattformen – die Unternehmensplattform (UP) und die Marktplattform (MP) – zusammenwirken (Abbildung 1) und von Serviceanbietern für die Veröffentlichung und Bereitstellung von Services genutzt werden können. Sie definiert die Rahmenbedingungen, Architektur- und Datenmodelle, standardisierte Schnittstellen sowie Rollen- und Stakeholderstrukturen und legt die Sicherheitsanforderungen fest.

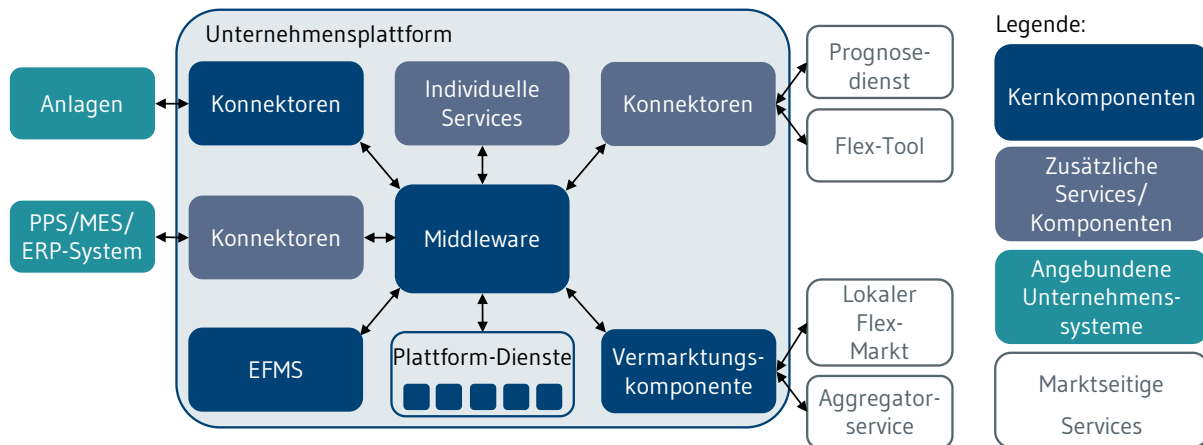


Abbildung 2: Konzept der UP

Abbildung 2 zeigt das grundlegende Konzept einer Unternehmensplattform (UP). Eine UP stellt das modulare, serviceorientierte und sichere informations- und kommunikationstechnische System innerhalb von Unternehmen dar, durch welches diese zum automatisierten Energieflexibilitätshandel und zur innerbetrieblichen Optimierung befähigt werden. Sie bietet in einer serviceorientierten IT-Infrastruktur die notwendigen Funktionalitäten für die informationstechnische Anbindung und die Ansteuerung von energieflexiblen Produktionsprozessen und Infrastruktur und somit für die Bereitstellung von Energieflexibilität.

1.4. Leseempfehlungen zur Einarbeitung in das Kopernikus-Projekt SynErgie

Aufgrund der Vielzahl an Inhalten im Zusammenhang mit der ESP stellen wir eine Übersicht der vorhandenen Dokumentation bereit. Diese dient als Grundlage für die strukturierte Einarbeitung in die ESP des Forschungsprojekts SynErgie. Basierend auf der Ist-Aufnahme der bestehenden Dokumentation haben wir eine empfohlene Lesereihenfolge entwickelt, die Ihnen hilft, die Konzepte und Systeme schrittweise zu verstehen und anzuwenden.

Empfohlene Lesereihenfolge bei der Einarbeitung:

1. [Einführungsvideo zur Energiesynchronisationsplattform \(ESP\)](#) (Fraunhofer IPA, 2022) – Das Video erklärt die Funktionsweise und die Vorteile der ESP auf verständliche Weise für Neueinsteiger:innen.
1. [VDI-Blätter Reihe 5207](#) – insbesondere Blatt 3 „IT-Infrastruktur zum Betrieb energieflexibler Fabriken“ (VDI, 2023): Die Blätter der Reihe 5207 geben eine umfassende Einführung in das Thema der Energieflexibilität, angefangen von den Grundbegriffen bis hin zur IT-Infrastruktur.
2. [Leitfaden für die Umsetzung energieflexibler IIoT-Plattformen](#) (Kopernikus-Projekt SynErgie, 2025) – Ein sehr guter Einstiegspunkt für IIoT-Plattformanbieter ist zudem der in SynErgie erstellte Leitfaden für die Umsetzung energieflexibler IIoT-Plattformen. Er bietet Orientierung, wenn es darum geht, digitale Plattformen für die Automatisierung und Vermarktung von Energieflexibilität zu entwickeln. Insbesondere richtet er sich dabei an Anbieter mit bestehenden IIoT-Plattformen, die diese dafür erweitern oder anpassen möchten.

3. Referenzarchitektur aus SynErgie3 – In SynErgie 3 wird aktuell eine erweiterte Referenzarchitektur für die UP erstellt. Diese umfasst die Beschreibung der Kernkomponenten, die Kommunikation zwischen den Kernkomponenten sowie Datenmodelle und standardisierte Außenschnittstellen. Die erweiterte Referenzarchitektur ist noch nicht öffentlich zugänglich. Bei Interesse wenden Sie sich an die Koordinierungsstelle des SynErgie-Projekts. Kapitel 3.3 beschreibt neue und interessante Aspekte daraus.
4. [Security Guide](#) (05.2022) – Wichtige Sicherheitsaspekte bei der Implementierung und dem Betrieb einer UP (Oeder et al., 2022).

Ergänzend dazu empfehlen wir weitere Veröffentlichungen aus SynErgie. Diese dienen der weiteren Einarbeitung in Themen rund um die Ausgestaltung des zukünftigen Energiesystems und den Beitrag, den SynErgie dazu leistet:

1. SynErgie-Fachbücher (geben eine fundiert aufbereitete Zusammenfassung der Arbeiten über das gesamte Projekt SynErgie):
 - a. [Band 1](#) (Sauer et al., 2019): Überblick über Förderphase 1 - Für Informationen zum Strommarkt kann hier insbesondere Kapitel A.2.2 konsultiert werden sowie folgende [Kurzdarstellung](#)
 - b. [Band 2](#) (Sauer et al., 2022): Überblick über Förderphase 2 - Letzte und aktuelle Auflage
2. [Leitfaden zur Energiesynchronisationsplattform](#) (Version 1.0) (Leitfaden Zur Energiesynchronisationsplattform, 2022): Der Leitfaden wurde geschrieben, um einen einfachen Zugang zum Thema ESP zu schaffen. Der Stand entspricht dem Ende von Förderphase 2 (vgl. Fachbuch Band 2).
3. Ältere Dokumente wie die „[Diskussionspapiere \(v4\)](#)“ (Bauernhansl et al., 2021; Buhl et al., 2021; Fridgen et al., 2021; Ronge et al., 2021; Schilp et al., 2021a, 2021b): Diese Dokumente geben historische und konzeptionelle Kontextinformationen und können als Hintergrundmaterial dienen, repräsentieren aber nicht unbedingt den aktuellen Entwicklungsstand im SynErgie-Projekt.

2. Energieflexibilitätsdatenmodell (EFDM)

Das Wichtigste in Kürze:

- Das EFDM wurde entwickelt, um eine generische und standardisierte Beschreibung von Energieflexibilität bereitzustellen - unabhängig von spezifischen Technologien, Unternehmensebenen oder Marktstrukturen.
- Dadurch ermöglicht das Modell eine einheitliche Kommunikation und praktische Umsetzung von Energieflexibilitätspotenzialen, sowohl innerhalb von Industrieunternehmen als auch im Austausch mit externen Energiemarktdienstleistern.
- Die Fähigkeit zur Anpassung der elektrischen Leistung eines energieflexiblen Systems wird durch die Definition eines Flexibilitätsraums quantifiziert, aus dem konkrete Anforderungen zur Leistungsänderung - sogenannte Flexible-Last-Maßnahmen - abgeleitet und protokolliert werden können.
- Das Modell ist objektorientiert, plattformunabhängig und nutzt JSON-Schemata für zentrale Klassen. Version 1.1 ergänzt unter anderem den Status im Lebenszyklus, Modellierungsumfang sowie Vermarktungsmöglichkeiten und ermöglicht die Nachverfolgung von Aufteilungen und Zusammenführungen.
- Die Protokollierung erfolgt über die neue Klasse Flexible-Last-Maßnahmen-Ausführungsprotokoll.

2.1. Notwendigkeit standardisierter Energieflexibilitätsmodelle

Ein einheitliches Datenmodell ermöglicht die automatisierte und fehlerarme Kommunikation zwischen den Akteuren des Energiesystems. Es schafft die Basis dafür, unterschiedliche Flexibilitätspotenziale ökonomisch zu erschließen und technische Schnittstellen langfristig interoperabel zu halten. Gleichzeitig reduziert es Lock-in-Effekte: Anbieter und Nutzer von Flexibilitätsservices können bei Bedarf einen Wechsel des Plattformanbieters mit reduzierten Integrationskosten vollziehen. Ein standardisiertes Modell verbessert den Informationsaustausch, erleichtert den Zugang zu digitalen Energiedienstleistungen und fördert die Weiterentwicklung von Plattform-Ökosystemen. Vor diesem Hintergrund wurde das EFDM in der zweiten Förderphase von SynErgie systematisch weiterentwickelt, validiert und mithilfe von Prototypen praktisch erprobt (Buhl et al., 2021).

2.2. Kontext und Struktur

Die im Folgenden aufgeführten Abschnitte referenzieren auf die EFDM-Version 1.1 aus dem zugehörigen [Git-Repository „Energy Flexibility Data Model“](#) (Koch & Stöhr, 2025). Im Repository befinden sich die vollständigen Beschreibungen der einzelnen Elemente, die entsprechenden JSON-Schemata sowie Beispieldateien.

Das EFDM wurde erstmals 2019 im Rahmen des Forschungsprojekts SynErgie definiert und seither kontinuierlich weiterentwickelt (Lindner, 2024). Ziel des Modells ist es, alle technischen, energetischen und marktrelevanten Informationen abzubilden, die für eine anwendungsorientierte Beschreibung von Energieflexibilität aus Sicht von Industrieunternehmen und der Energiewirtschaft erforderlich sind. Mit wenigen Attributen soll einerseits die Komplexität und der Umfang der aus-

getauschten Daten reduziert, andererseits der Schutz sensibler Produktions- und Prozessinformationen gewährleistet werden (Buhl et al., 2021). Darüber hinaus ermöglicht die Integration aller relevanten Daten sowie die generische Modellierung des EFDM die Aggregation und Optimierung unterschiedlicher **Flexibilitätsräume** aus verschiedenen Ebenen der Produktionsautomatisierung (M. Lindner et al., 2021; Weber et al., 2018).

Das EFDM ist plattform- und protokollunabhängig konzipiert, orientiert sich jedoch am Informationsfluss und an der Architektur der ESP. In dieser dient das EFDM als zentrale Kommunikationsgrundlage – sowohl innerhalb einer **Unternehmensplattform** als auch extern mit marktbasierten Softwareanwendungen, die über eine **Marktplattform** bereitgestellt werden (Reinhart et al., 2018; van Stiphoudt et al., 2025).

Das EFDM ist objektorientiert konzeptioniert, um Daten systematisch, modular und flexibel zu strukturieren und verarbeiten zu können. Für die übergeordneten Klassen (siehe Kapitel 2.3: Abbildung 3) **Flexibilitätsraum**, **Flexible-Last-Maßnahmen-Paket** und **Flexible-Last-Maßnahmen-Ausführungsprotokoll** ist die Datenstruktur durch jeweils ein JSON-Schema definiert. Durch die Zuweisung konkreter Daten können EFDM-Objekte abgeleitet werden, die im Folgenden **EFDM-Instanz** genannt werden. Softwareanwendungen, die **EFDM-Instanzen** verarbeiten, werden als **Services** bezeichnet. **Attribute** bilden die kleinste beschreibbare Einheit des EFDM, thematisch gruppierte Attribute werden als **Elemente** bezeichnet. Im EFDM sind Klassen, Elemente und Attribute entweder obligatorisch oder optional. Durch die Angabe optionaler Elemente kann der Freiheitsgrad eines Flexibilitätsraums gezielt eingeschränkt werden, z. B. durch einen Maximalwert für die **Abrufhäufigkeit** einer **Flexiblen Last**. Werden optionale Elemente weggelassen, impliziert dies einen maximalen Freiheitsgrad, sofern keine anderen Einschränkungen bestehen.

2.3. Klassen des EFDM

Abbildung 3 zeigt die bisherigen und neu hinzugefügten Klassen des EFDM, die im Folgenden näher erläutert werden. Für eine vollständige Beschreibung der jeweiligen Elemente wird auf das [Git-Repository](#) verwiesen.

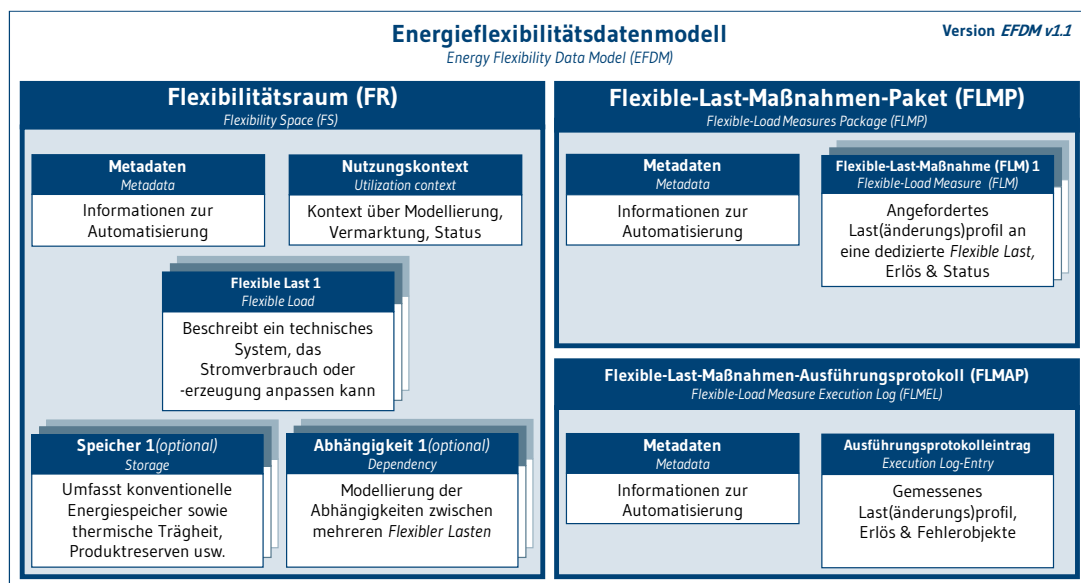


Abbildung 3: Klassen des EFDM v1.1

Die Klasse **Metadaten** enthält für die Verarbeitung von EFDM-Instanzen Elemente, die eine eindeutige Identifizierung und Kontextualisierung sowohl für automatische als auch manuelle Verwendung erlauben.

Ein **Flexibilitätsraum** beschreibt die Freiheitsgrade eines energieflexiblen Systems mittels den untergeordneten Klassen Metadaten, Nutzungskontext, Flexible Last, Abhängigkeit (optional) und Speicher (optional). Je nach Komplexität des energieflexiblen Systems variiert die Anzahl der Instanzen dieser untergeordneten Klassen im FR (Schott et al., 2019).

- Die Klasse **Nutzungskontext** beschreibt den Status, den Modellierungsumfang und die Vermarktbarkeit eines Flexibilitätsraums. Der aktuelle Prozessschritt der Vermarktung eines FRs wird über den Status dargestellt. Der Modellierungsumfang definiert, wie detailliert das Energieflexibilitätspotenzial erfasst wird – von allgemeinen technischen Eigenschaften bis hin zu spezifisch auf den Anwendungsfall zugeschnittenen Modellen. Zudem legt die Klasse fest, ob der Flexibilitätsraum außerhalb des Unternehmens vermarktbar ist und ob der Handelsprozess automatisiert ablaufen kann.
- Eine **Flexible Last** beschreibt ein technisches System oder das Zusammenspiel verschiedener technischer Systeme, die das Potenzial haben, eine Leistungsänderung durchzuführen. Dies umfasst sowohl Erzeuger als auch Verbraucher von elektrischer Leistung (Buhl et al., 2021). Je nach Betrachtungsweise können die absoluten Leistungswerte oder die Abweichung vom geplanten Lastgang als potenziell umzusetzende Leistungszustände definiert werden (Schott et al., 2019).
- Über die Klasse **Abhängigkeit** lassen sich Einschränkungen und Wechselwirkungen zwischen mehreren Flexiblen Lasten innerhalb eines Flexibilitätsraums abbilden. So kann beispielsweise die Aktivierung einer Flexiblen Last die Nutzung einer anderen bedingen oder ausschließen. Dadurch können zulässige Betriebspunkte des Gesamtsystems realistischer dargestellt werden, ohne negative Auswirkungen auf Prozesse oder Produktqualität zu haben (Buhl et al., 2021).
- Im EFDM beschreibt der Begriff **Speicher** klassische Energiespeichersysteme wie Batterien sowie Speicherpotenziale industrieller Prozesse, etwa Lagerbestände, thermische Trägheit oder Zwischenproduktreserven. Die gespeicherte Energie muss nicht in elektrischer Form vorliegen – auch Wärme-, Kälte- oder Druckluftspeicher sind möglich, sofern der Speicher mit einer *Flexiblen Last* verknüpft ist (Schott et al., 2019).

Das **Flexible-Last-Maßnahmen-Paket** bündelt Maßnahmen, die auf dedizierte Flexible Lasten ausgerichtet sind. Es enthält eine oder mehrere Flexible-Last-Maßnahmen sowie zugehörige Metadaten.

- Eine **Flexible-Last-Maßnahme** beschreibt ein konkretes Laständerungsprofil, das von einer bestimmten Flexiblen Last innerhalb eines Flexibilitätsraums umzusetzen ist. Zudem wird in dieser Klasse der zu erwartende Erlös bei Umsetzung der Maßnahme definiert. Analog zu einer Flexiblen Last können je nach Perspektive sowohl die absoluten Leistungswerte als auch die Abweichung vom geplanten Lastgang als Leistungszustände definiert sein.

Das **Flexible-Last-Maßnahmen-Ausführungsprotokoll** protokolliert die Maßnahmen, die an dedizierte Flexible Lasten adressiert wurden. Es enthält eine oder mehrere Ausführungsprotokolleinträge sowie zugehörige Metadaten.

- Ein **Ausführungsprotokolleintrag** ist einer Flexible-Last-Maßnahme zugeordnet und enthält das während der Ausführung einer Flexible-Last-Maßnahme gemessene Laständerungsprofil, den realisierten Erlös sowie gegebenenfalls Fehlerinformationen.

2.4. Neuerungen in der Version 1.1

Im Rahmen der dritten SynErgie-Förderphase zeigte sich, dass insbesondere Informationen zum Nutzungskontext und zum Lebenszyklus eines Flexibilitätsraums notwendig sind, um Energieflexibilität realistisch beschreiben und automatisiert umsetzen zu können. Dies erfordert eine Protokollierung sowie kleinere Anpassungen an den Modellen. Aus diesem Grund wurden für die EFDM-Version 1.1 die folgenden Änderungen vorgenommen.

Elementerweiterungen und -änderungen:

- Reaktionsdauer: Erweiterung auf Minimal- und Maximalwerte, um einen Schwankungsbereich abbilden zu können, falls die Reaktionsdauer in der Praxis nicht exakt vorhersehbar ist.
- Referenzpunkt Leistungszustände: Je nach Referenzpunkt kann der Leistungszustand als absoluter Leistungswert (Referenz "Null") oder als Abweichung von der geplanten Last definiert werden.
- Referenzpunkt Erlös Flexible-Last-Maßnahme: Je nach Perspektive kann es sich der Erlös auf eine Kosteneinsparung oder die Gesamtkosten beziehen.
- Restrukturierung von Objekten im Schema
- Erweiterung der unterstützten Währungseinheiten auf sämtliche internationalen ISO-4217-Währungscodes für Kosten und Preise.

Status im EFDM-Instanz-Lebenszyklus:

- Im Flexibilitätsraum wird der Status der EFDM-Instanz innerhalb ihres Lebenszyklus angegeben. Eine Instanz beginnt im Entwurfsstatus (draft), kann verfügbar (available), angeboten (offered), reserviert (reserved), aktiv durch Maßnahmen genutzt (measuresRequested) und schließlich abgeschlossen (finalized) werden.
- Der Status einer Flexible-Last-Maßnahme kennzeichnet deren aktuellen Fortschritt im Prozess zur Erbringung von Energieflexibilität. Eine Flexible-last-Maßnahme kann dabei im Entwurf (draft), einsatzbereit (toExecute), aktuell in Ausführung (inExecution), erfolgreich umgesetzt (executed), nur teilweise umgesetzt (partiallyExecuted), fehlgeschlagen (failed) oder storniert (canceled) sein.

Modellierungsumfang

- Der Modellierungsumfang ordnet EFDM-Instanzen entlang des Weges zur praktischen Anwendung ein und kontextualisiert damit ihren jeweiligen Zweck.
 - generalTechnicalPotential: Die Beschreibung der Flexibilität umfasst allgemeingültige technische Eigenschaften und Restriktionen. Das Modell enthält keine Informationen zu Betriebsstrategien, Produktionsplänen oder weiteren Limitierungen, die sich aus dem spezifischen Einsatz der Anlage oder des Systems ergeben.
 - operationalPotential: Die Flexibilität wird vollständig im Kontext des Produktionsumfelds betrachtet und enthält alle notwendigen Informationen, die für eine Nutzbarmachung der Energieflexibilität erforderlich sind. Das Modell beschreibt das größtmögliche umsetzbare Energieflexibilitätpotenzial – unabhängig vom konkreten Anwendungsfall.
 - applicationTailoredPotential: Das Modell beschreibt ein auf einen konkreten Anwendungsfall zugeschnittenes Potenzial. So kann beispielsweise ein Energiemarkt ausschließlich die Verwendung der Klasse Flexible Last mit Haltedauern im 15-Minuten-Raster erfordern. In einem solchen Fall müsste etwa ein Potenzial von Speichern und Abhängigkeiten so transformiert werden, dass sie als Flexible Last abgebildet werden können.

Vermarktung

Für die Vermarktung eines Flexibilitätsraums wird angegeben, ob eine Nutzung bzw. Vermarktung außerhalb des Unternehmens stattfinden darf (externallyTradeable) und ob der Handelsprozess automatisiert erfolgen kann (autoTradeable). Beide Angaben erfolgen als Ja/Nein-Werte (Boolean).

Aufteilung und Zusammenführung von Energieflexibilität

Wird ein Flexibilitätsraum in mehrere Flexibilitätsräume aufgeteilt oder mehrere Flexibilitätsräume zu einem Flexibilitätsraum zusammengeführt, wird dieser Vorgang über Kompositionseinträge (compositionRecords) dokumentiert. Gleiches gilt für die Aufteilung und Zusammenführung von Flexible-Last-Maßnahmen. So bleibt nachvollziehbar, welche EFDM-Instanzen bei einer Aufteilung oder Zusammenführung beteiligt waren und welche Rolle sie dabei eingenommen haben.

Ausführungsprotokoll

Um Abweichungen zwischen beauftragtem und tatsächlich realisiertem Lastprofil zu quantifizieren, wird die neue Klasse Ausführungsprotokoll eingeführt. Ein Ausführungsprotokoll ist einer Flexible-Last-Maßnahme zugeordnet und enthält sowohl das während der Ausführung gemessene Laständerungsprofil als auch gegebenenfalls aufgetretene Fehlerinformationen.

3. Erweiterte Referenzarchitektur der Unternehmensplattform

Das Wichtigste in Kürze:

- Die Referenzarchitektur der UP und der dazugehörige Leitfaden für die Umsetzung energieflexibler IIoT-Plattformen bieten eine umfassende Unterstützung bei der schrittweisen Implementierung energieflexibler Plattformen – ausgehend von der bestehenden IIoT-Plattform hin zur energieflexiblen UP. Eine Gap-Analyse ermittelt dabei die Ausgangssituation und zeigt den erforderlichen Handlungsbedarf.
- Die Erweiterung der Referenzarchitektur berücksichtigt neue Anforderungen eines kommerziellen Betriebs und rückt IIoT-Plattformen als Grundlage für den Aufbau einer UP in den Mittelpunkt. Sie beschreibt dabei neue Komponenten, Schnittstellen und Datenmodelle.
- Die Prozesse zur Erfassung, Vermarktung und Bereitstellung von Energieflexibilität basieren in einer UP maßgeblich auf dem standardisierten Datenmodell EFDM.
- Flexibilitätsräume und Flexible-Last-Maßnahmen können entlang der Prozesse einer UP mithilfe von Status-Workflows verwaltet und orchestriert werden.
- Das neu spezifizierte „EFDM-Interface“ ermöglicht eine standardisierte Anbindung von Unternehmenssystemen an eine UP, sofern diese Systeme das EFDM zur Bereitstellung von Energieflexibilität unterstützen.

3.1. Referenzarchitektur für die Umsetzung energieflexibler IIoT-Plattformen

Die Erweiterung der Referenzarchitektur von einem Greenfield-Ansatz hin zur Nutzung bestehender IIoT-Plattformen als Grundlage für die Umsetzung der Unternehmensplattform (UP) erfordert eine Reihe von Überarbeitungen und Präzisierungen. Ziel ist es, anbietenden, betreibenden und entwickelnden Unternehmen einen Bauplan an die Hand zu geben, der sie bei der schrittweisen Transformation ihrer IIoT-Lösungen zu voll funktionsfähigen, energieflexiblen Unternehmensplattformen unterstützt – von der automatisierten Datenerfassung über die Integration des standardisierten EFDM (siehe Kapitel 2) bis hin zur innerbetrieblichen Optimierung und Vermarktung von Energieflexibilität (Abbildung 4).

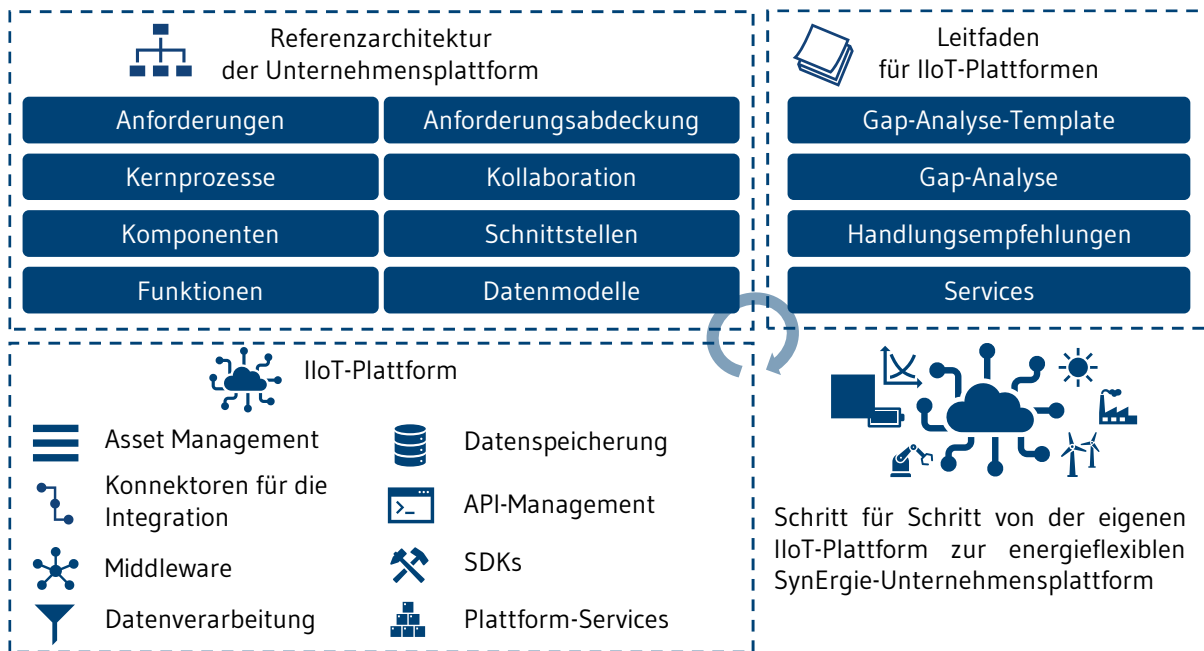


Abbildung 4: Von der IIoT-Plattform zur energieflexiblen SynErgie-UP

Die UP-Referenzarchitektur enthält detaillierte Spezifikationen zu Anforderungen, Kernprozessen, Abläufen und Komponenten. Sie verknüpft das EFDM mit den zentralen Prozessen und definiert standardisierte Schnittstellen zu angrenzenden Unternehmens- und Marktsystemen. Dabei setzt sie auf etablierte Technologien und Datenformate, um Interoperabilität und Skalierbarkeit sicherzustellen.

IIoT-Plattformen bieten sich als Ausgangspunkt für eine UP an, da sie bereits über folgende zentrale Bausteine verfügen:

- Native Konnektoren für die Anbindung heterogener Automatisierungs- und Leitsysteme
- Middleware-Schicht zur Nachrichtenvermittlung und Orchestrierung
- Dienste für Datenpersistenz, -verarbeitung, Schnittstellen (APIs) und Software Development Kits (SDKs)
- Dienste für das Asset-Management und den Plattformbetrieb

Damit erfüllen IIoT-Plattformen bereits grundlegende Betriebsanforderungen der UP-Referenzarchitektur, darunter Integrationsmechanismen, Datenverarbeitungs- und Speicherfunktionen sowie Kommunikations- und Plattformfunktionen. Auch sicherheitsrelevante Funktionen sind vielfach bereits implementiert und können im Rahmen der UP ergänzt werden. Dennoch bleiben spezifische Anforderungen zur Anwendung des EFDM und zur Energieflexibilitätsvermarktung unberührt, und notwendige Kernkomponenten der UP-Referenzarchitektur, wie der Energieflexibilitätsmanagementservice oder die Vermarktungskomponente, sind noch nicht abgebildet.

Lesen Sie mehr dazu im umfangreichen Dokument zur Referenzarchitektur. Diese wird voraussichtlich im zweiten Quartal 2026 veröffentlicht. Bei Interesse am aktuellen Entwurf wenden Sie sich gerne an die Koordinierungsstelle des SynErgie-Projekts.

3.2. Leitfaden für die Umsetzung energieflexibler IIoT-Plattformen

Für IIoT-Plattformanbieter bietet auch der bereits veröffentlichte [Leitfaden für die Umsetzung energieflexibler IIoT-Plattformen](#) (Kopernikus-Projekt SynErgie, 2025) einen hervorragenden Einstiegspunkt. Er bietet Orientierung für die Entwicklung digitaler Plattformen zur Automatisierung und Vermarktung von Energieflexibilität, insbesondere für Anbieter bestehender IIoT-Plattformen, die diese erweitern oder anpassen möchten. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Gap-Analyse, die Lücken zwischen dem aktuellen Stand einer IIoT-Plattform und der angestrebten UP identifiziert und den Handlungsbedarf ermittelt. Die Gap-Analyse berücksichtigt die Anforderungen und Zielarchitektur aus der UP-Referenzarchitektur. Für jede Plattform können somit individuell notwendige Transformationsschritte geplant werden.

Der Aufbau gliedert sich wie folgt: Zunächst wird die Referenzarchitektur als Zielarchitektur für die UP samt ihrer Funktionalität zusammengefasst. Anschließend wird die Vorgehensweise zur Gap-Analyse vorgestellt und im darauffolgenden Template näher beschrieben. Abschließend erfolgt eine Auflistung nächster Schritte und Handlungsempfehlungen für IIoT-Plattformanbieter, einschließlich einer tabellarischen Übersicht bisher entwickelter Services aus den ersten beiden Förderphasen.

Sie sind IIoT-Plattformanbieter? Finden sie heraus, welche Anforderungen an eine energieflexible Plattform sie bereits heute erfüllen und was noch zu tun ist. Den Leitfaden finden sie [hier](#).

3.3. Neue Komponenten der Referenzarchitektur

In der ersten Projektphase von SynErgie stand die Entwicklung und Bereitstellung von Optimierungsservices sowie die Integration verschiedener Dienste im Kontext der UP im Vordergrund. In der zweiten Projektphase wurden Sicherheitskonzepte entwickelt und entsprechende Maßnahmen abgeleitet. Die Ergebnisse wurden in eine Referenzarchitektur überführt (Fridgen et al., 2021). Diese Referenzarchitektur wurde in der dritten Phase gezielt für die Unternehmensplattform (UP) weiterentwickelt: Neue Erkenntnisse aus der Validierung werden integriert und IIoT-Plattformen als technologische Basis für ein marktfähiges Angebot stärker in den Mittelpunkt gerückt.

Die Anforderungsliste der Referenzarchitektur wurde aktualisiert und umfasst neben allgemeinen Betriebsanforderungen jetzt auch Anforderungen an die grundlegenden Funktionen einer IIoT-Plattform. Weiterhin beinhaltet sie spezifische Anforderungen zur Realisierung von Energieflexibilität, einschließlich der Nutzung des EFDM, das Management von Energieflexibilität, deren Vermarktung sowie die Integration zusätzlicher Services. Ergänzt wird die Anforderungsliste durch energiewirtschaftsspezifische Anforderungen zur Anpassung an marktspezifische Gegebenheiten sowie durch Sicherheitsanforderungen an Infrastruktur, Betrieb und Funktionsweise der Plattform.

Abbildung 5 zeigt die Komponenten und Services der aktualisierten Referenzarchitektur. Dabei sind notwendige Elemente blau und optionale hellblau hinterlegt. Der Datenaustausch erfolgt über EFDM-konforme Nutzdaten (dunkelblaue Pfeile) oder beliebige Formate (graue Pfeile).

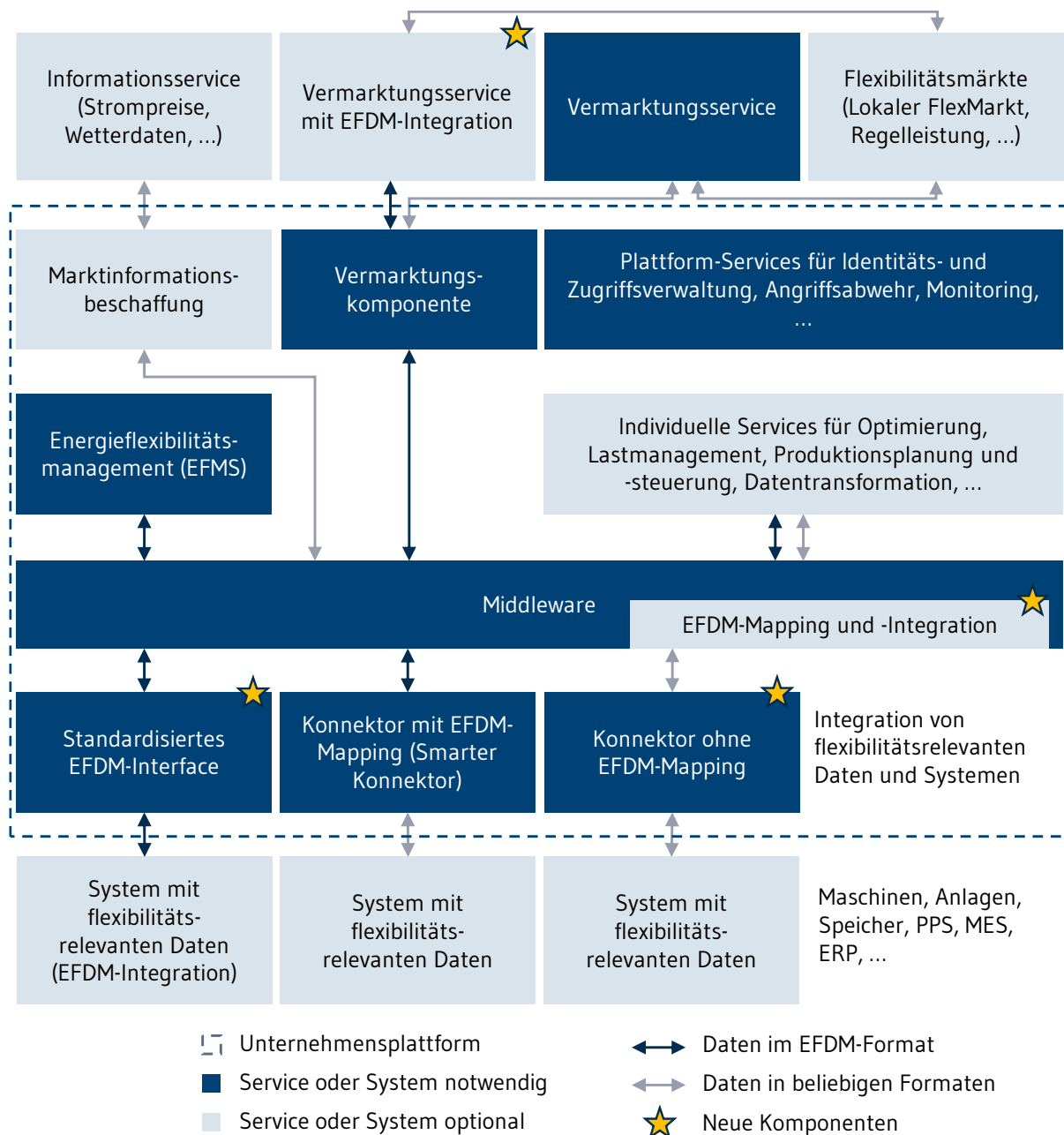


Abbildung 5: Komponentenübersicht aus der UP-Referenzarchitektur

Um Energieflexibilität automatisiert zu erfassen und über die UP bereitzustellen, müssen Unternehmenssysteme – von Maschinen und Anlagen bis hin zu Systemen für die Produktionsplanung und Steuerung (PPS), die Fertigungssteuerung (MES) oder die Unternehmensressourcenplanung (ERP) – angebunden werden. Dabei gilt es, energieflexibilitätsrelevante Daten zu erfassen, beauftragte Flexible-Last-Maßnahmen auszuführen und den resultierenden Lastverlauf zu protokollieren. Für die Integration stehen drei Varianten zur Verfügung, von denen mindestens eine in der UP implementiert sein muss:

1. Standardisiertes EFDM-Interface: Systeme liefern bereits EFDM-kompatible Daten und übertragen ihre Flexibilitäten direkt über eine standardisierte Schnittstelle.
2. Konnektoren mit EFDM-Mapping: Daten liegen in proprietären Formaten vor; ein Konnektor übernimmt neben der UP-Anbindung auch die Transformation in das EFDM-Format.
3. Konnektoren ohne EFDM-Mapping: Daten werden unverändert übermittelt; das EFDM-Mapping erfolgt in einem nachgelagerten UP-Service oder über eine Plattformfunktion.

Nach der Erfassung fungiert der Energieflexibilitätsmanagementservice (EFMS) als zentrales Repository für alle EFDM-Instanzen (Flexibilitätsräume, Flexible-Last-Maßnahmen, Flexible-Last-Maßnahmen-Ausführungsprotokolle). Der EFMS verwaltet deren Lebenszyklus, archiviert abgeschlossene Instanzen und speichert Protokolle zur Dokumentation des Lastverlaufs (siehe Kapitel B.2.1.3).

Eine Vermarktungskomponente stellt die Verbindung zwischen UP und externen Vermarktungsservices her und übernimmt mittels Marktadapter die Transformation zwischen EFDM und marktspezifischen Datenmodellen. Sie unterstützt dabei zwei Service-Varianten:

1. Vermarktungsservices mit EFDM-Support: Einfachere Anbindung an die Märkte durch die Anwendbarkeit eines standardisierten Marktadapters auf Basis des EFDM.
2. Vermarktungsservices ohne EFDM-Support: Verschiedene Marktadaptern mit Transformatoren innerhalb der Vermarktungskomponente sind nötig, um EFDM-Daten in marktspezifische Inerate zu überführen.

Externe Informationsservices, etwa für Strompreisprognosen oder Wetterdaten, liefern entscheidungsrelevante Informationen für Vermarktung und innerbetriebliche Optimierung. Sie werden über Konnektoren zur Marktinformationsbeschaffung eingebunden. Auch weitere externe Dienste wie Optimierungsservices können über entsprechende Konnektoren in die UP eingebunden werden. Darüber hinaus stehen optional verschiedene Unternehmensservices zur Verfügung, beispielsweise für Produktionsplanung und -steuerung, Lastmanagement oder die Komposition von Flexibilitätsräumen (Zusammenführung, Aufteilung etc.).

Die Middleware ist die zentrale Komponente der UP: Sie vermittelt Informationen zwischen den Komponenten, unterstützt offene und standardisierte Kommunikationsprotokolle und ermöglicht einen modularen Plattformaufbau. Plattformdienste, wie Identitäts- und Zugriffsverwaltung, Monitoring und Zertifikatsmanagement, sorgen für einen stabilen, sicheren und transparenten Betrieb aller UP-Komponenten.

3.4. Anwendung des EFDM in der Unternehmensplattform

Energieflexibilität wird in der UP anhand des EFDM beschrieben. Die EFDM-Instanzen werden dabei entlang der zentralen UP-Prozesse zwischen den UP-Komponenten ausgetauscht. Parallel zur Validierung und Erweiterung der Referenzarchitektur wird das EFDM fortlaufend weiterentwickelt,

um neue Anforderungen aus der UP zu berücksichtigen. So wurden mit dem Übergang von Version 1.0 auf Version 1.1 des EFDM auch folgende Merkmale ergänzt (siehe Kapitel 2.4):

- Statusinformationen für Flexibilitätsräume und Flexible-Last-Maßnahmen
- Vermarktungsspezifische Konfigurationen
- Kompositionseinträge zur Beschreibung der Aufteilung oder Zusammenführung von Flexibilitätsräumen

3.5. Status-Workflow für EFDM-Instanzen

Die neu eingeführten Statusinformationen ermöglichen eine durchgängige Nachverfolgung der EFDM-Instanzen entlang der UP-Prozesse und bilden die Basis für eine workflowgestützte Prozesssteuerung. Jede Statusänderung löst definierte Folgeaktionen aus und erlaubt, den Zustand von Flexibilitätsräumen und Flexible-Last-Maßnahmen zu überwachen. Je nach den Fähigkeiten der zugrunde liegenden IIoT-Plattform erfolgt die Automatisierung über Workflow-Management-Systeme, Funktionen der Middleware oder den zentralen EFMS.

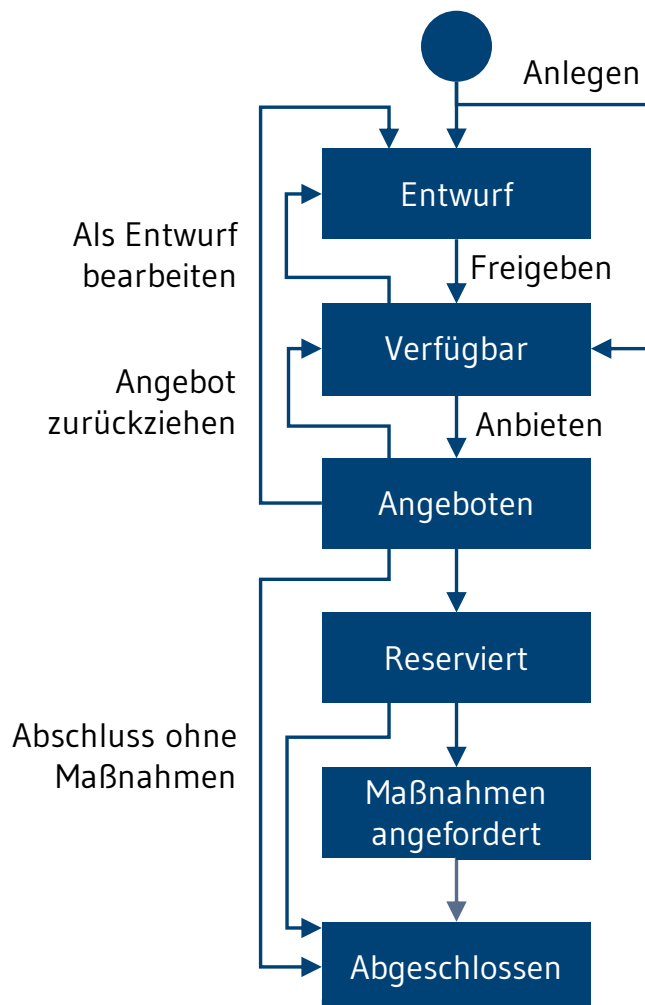


Abbildung 6 : Status-Workflow eines Flexibilitätsraums

Der Status eines Flexibilitätsraums kann folgende Zustände annehmen (Abbildung 6):

1. Entwurf (draft): Flexibilitätsraum ist im Erstellungsprozess und noch nicht verwertbar.
2. Verfügbar (available): Flexibilitätsraum steht für interne Optimierung oder externe Vermarktung bereit.
3. Angeboten (offered): Flexibilitätsraum wurde einer Nachfragenden Instanz angeboten; eine Reservierung liegt bisher nicht vor. Rücknahme oder Anpassung sind daher noch möglich.
4. Reserviert (reserved): Flexibilitätsraum ist gebucht und muss jetzt im Bereitstellungsmodus gehalten werden, bis sein Gültigkeitszeitraum endet oder eine Flexible-Last-Maßnahme angefordert wird.
5. Maßnahmen angefordert (measuresRequested): Flexible-Last-Maßnahmen sind angefordert und werden ausgeführt; es wird bis zum Ablauf des Gültigkeitszeitraums oder zur vollständigen Erschöpfung des Flexibilitätsraums auf weitere Anforderungen gewartet.
6. Abgeschlossen (finalized): Flexibilitätsraum ist abgeschlossen und kann nicht weiterverwertet werden.

Für jede Flexible-Last-Maßnahme durchläuft die UP einen separaten Status-Workflow, während ihr übergeordneter Flexibilitätsraum im Zustand „Maßnahmen angefordert“ verbleibt.

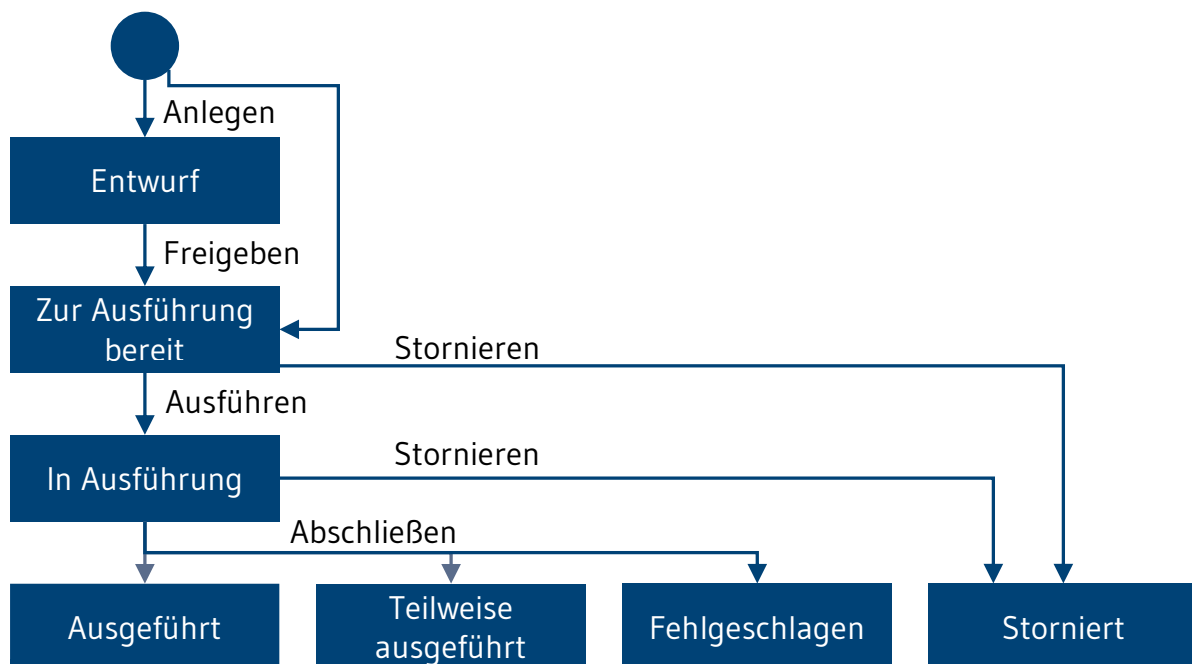


Abbildung 7: Status-Workflow einer Flexible-Last-Maßnahmen

Der Status einer Flexible-Last-Maßnahme kann folgende Zustände annehmen (Abbildung 7):

1. Entwurf (draft): Maßnahme ist im Erstellungsprozess und noch nicht ausführbar.
2. Zur Ausführung bereit (toExecute): *Flexible-Last-Maßnahme* steht bereit für die Ausführung.
3. In Ausführung (inExecution): *Flexible-Last-Maßnahme* wird aktuell ausgeführt.
4. Ausgeführt (executed): *Flexible-Last-Maßnahme* wurde erfolgreich abgeschlossen.

5. Teilweise ausgeführt (partiallyExecuted): *Flexible-Last-Maßnahme* wurde nicht vollständig ausgeführt; das tatsächliche Laständerungsprofil weicht vom Soll-Profil ab.
6. Fehlgeschlagen (failed): Während der Ausführung trat ein Fehler auf, der die Flexible-Last-Maßnahme verhindert hat.
7. Storniert (canceled): *Flexible-Last-Maßnahme* wurde vom Auftraggeber abgebrochen; laufende Ausführungen können jederzeit gestoppt werden.

Je nach Endzustand werden Erfolge, Teilerfolge oder Ausfälle dokumentiert. Um Abweichungen zwischen beauftragtem und tatsächlich realisiertem Lastprofil zu quantifizieren, wird die Klasse Flexible-Last-Maßnahmen-Ausführungsprotokoll verwendet. Die neuen Statusinformationen sind ab Version v1.1.0 im EFDM enthalten und können im [Git-Repository des EFDM](#) eingesehen werden.

3.6. Standardisiertes EFDM-Interface

Die UP-Referenzarchitektur ermöglicht es, interne Schnittstellen flexibel an die jeweiligen organisatorischen und technischen Gegebenheiten anzupassen. Für die Anbindung externer Systeme hingegen ist eine weitgehende Standardisierung erforderlich, um Interoperabilität und Wiederverwendbarkeit plattformübergreifend zu ermöglichen. Als gemeinsames Datenmodell dient dabei das EFDM. Wichtige externe Schnittstellen der UP sind:

- das EFDM-Interface zur Integration von EFDM-kompatiblen Unternehmenssystemen
- die Schnittstelle des standardisierten Vermarktungsservices

Zur Spezifikation dieser Schnittstellen wurden drei Kommunikationsmuster in Betracht gezogen:

1. Synchroner Kommunikation: Datenaustausch über Funktionsaufrufe nach dem Request-Response-Prinzip. Die Methoden- und Datendokumentation erfolgt mittels [OpenAPI-Spezifikation](#).
2. Asynchrone Kommunikation: Ereignisgesteuerter Nachrichtenaustausch, bei dem Systeme relevante Events abonnieren und über Nachrichten kommunizieren. Für die Dokumentation von Nachrichtenformaten und Protokollen wird die [AsyncAPI-Spezifikation](#) verwendet.
3. Hybrider Ansatz: Kombination aus synchronen Funktionsaufrufen und asynchronem Event-Austausch. Dieser Ansatz vereint unmittelbar abrufbare Operationen mit proaktiver Benachrichtigung.

Für das EFDM-Interface wurde der hybride Ansatz gewählt, da viele Unternehmenssysteme bereits synchrone APIs unterstützen und gleichzeitig asynchrone Events zur effizienteren Terminierung von Folgeprozessen genutzt werden können

Das EFDM-Interface ermöglicht die standardisierte Anbindung von Unternehmenssystemen, die das EFDM bereits unterstützen. Über den in Abbildung 8 dargestellten Kommunikationsverlauf werden folgende Schritte realisiert:

1. Ein Unternehmenssystem meldet einen neuen Flexibilitätsraum über das EFDM-Interface und abonniert alle zukünftigen zugehörigen Benachrichtigungen.
2. Bei Reservierung des Flexibilitätsraums erhält das System eine entsprechende Benachrichtigung und hält die Energieflexibilität bereit.
3. Werden Flexible-Last-Maßnahmen (paketierte) freigegeben, erhält das System eine Benachrichtigung, bezieht die Maßnahmen und löst die Ausführung aus.
4. Für jede Flexible-Last-Maßnahme übermittelt das System das gemessene Laständerungsprofil oder informiert über Fehlerfälle.

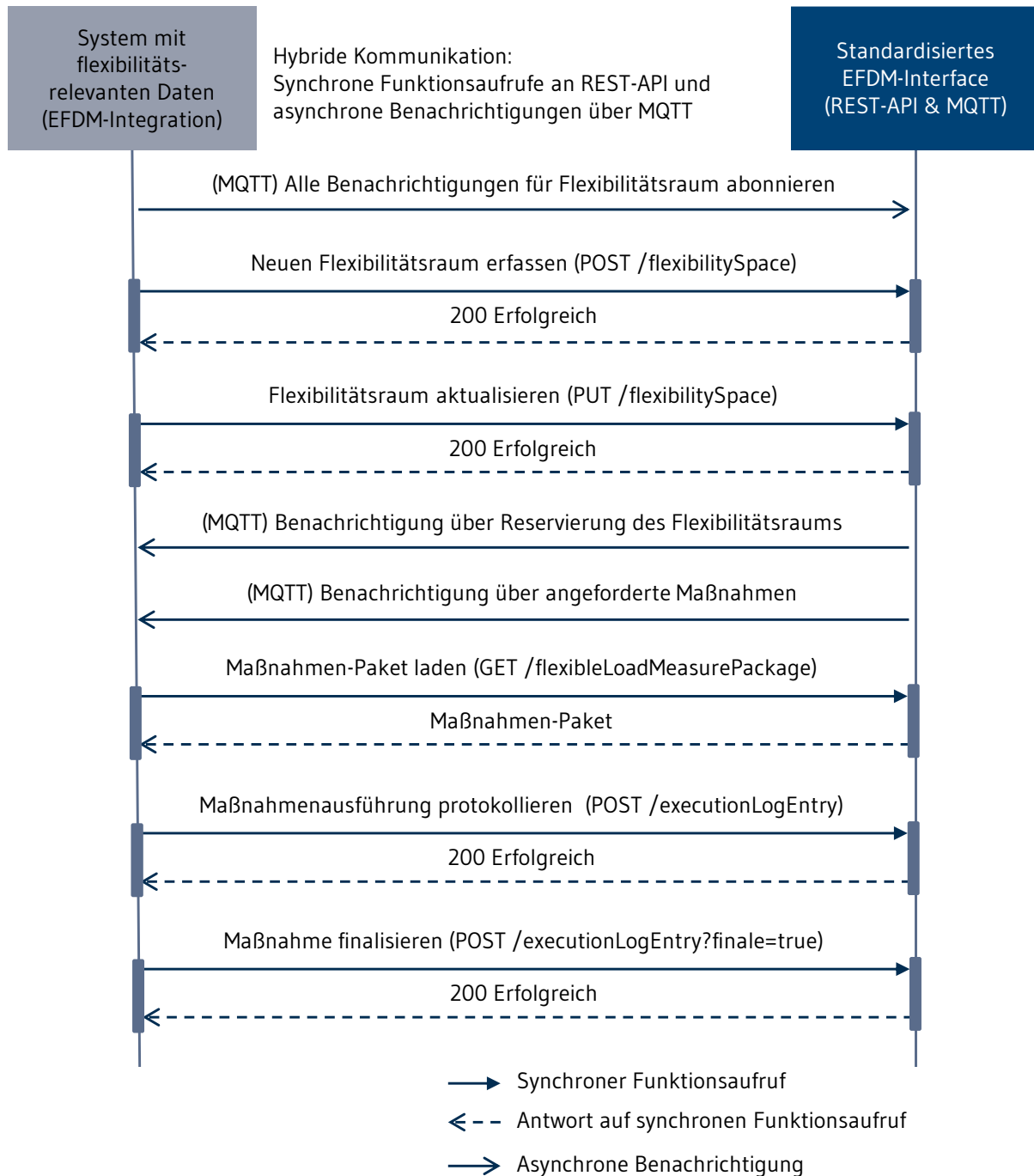


Abbildung 8: Kommunikation zwischen Unternehmenssystem und EFDM-Interface

Auf diese Weise unterstützt das EFDM-Interface nicht nur den Datenaustausch, sondern integriert auch die neuen Statusinformationen. Die vollständige Spezifikation des EFDM-Interfaces steht als [Online-Dokumentation](#) zur Verfügung.

4. Standardisierung

Das Wichtigste in Kürze:

- Dieses Kapitel zeigt auf, wie die durchgängige Standardisierung technischer Schnittstellen und Datenmodelle, insbesondere mithilfe von OPC UA und der Verwaltungsschale (Asset Administration Shell, AAS), die Grundlage für interoperable, skalierbare und wartbare Energieflexibilitätslösungen schafft.
- Ein zentrales Ergebnis ist die Entwicklung der sogenannten OPC UA Companion Specification (CS) 40701 für Reinigungs- und Vorbehandlungsanlagen sowie des universellen Bausteins „Energy Management“ für die übergeordnete OPC UA for Machinery. Dadurch wird eine einheitliche und erweiterbare Datenanbindung verschiedener Anlagentypen an IT-Systeme (Information Technology) ermöglicht, die als Grundlage für energetische Betrachtungen dient.
- Das EFDM (Koch und Stöhr, 2025) lässt sich dabei in bestehende AAS integrieren. Die AAS fungiert als zentrale Informationsdrehscheibe für relevante Daten und Betriebsparameter von Anlagen, unterstützt durch die IEC 62832 Standardreihe. Eine prototypische Umsetzung in der Forschungs- und Demonstrationsumgebung für energieeffiziente und -flexible Produktion (ETA-Fabrik) der Technischen Universität Darmstadt (TU Darmstadt) demonstriert anhand einer Durchlaufreinigungsanlage die praktische Anwendbarkeit dieser Standards zur Umsetzung von energieflexiblen Betriebsstrategien.
- Durch die standardisierten Schnittstellen und Datenmodelle werden verschiedene Systeme vereinbar und reduzieren damit den Integrationsaufwand für die industrielle Energieflexibilitätsbefähigung.

4.1. Konnektor-Framework

Das Konnektor-Framework verfolgt das Ziel, Energieflexibilität effizient und nachhaltig in bestehenden Systemlandschaften zu erschließen und in eine UP zu integrieren. Dabei steht die enge Einbindung von Fachexpert:innen im Vordergrund, die durch Low-/No-Code-Werkzeuge aktiv an der Definition von Flexibilitätsräumen mitwirken können – ohne tiefgreifende Programmierkenntnisse. Ein zentraler Bestandteil ist die Verbesserung der Konnektivität durch den Einsatz eines plattformunabhängigen Thin-Edge-Agenten. Dieser ermöglicht eine universelle Anbindung verschiedenster Geräte über standardisierte Kommandos und Operationen. Die Agenten kommunizieren mittels EFDM (siehe Kapitel 2) mit dem EFMS (siehe Kapitel 3), welcher sämtliche Flexibilitätsinformationen verwaltet und an die relevanten Services weiterleitet – sowohl die Flexibilitätsräume, welche die bereitgestellte Flexibilität beschreiben, als auch Flexibilitätsmaßnahmen, welche die Flexibilitätsabrufe darstellen. Dabei ist der Agent zuständig für die konkrete Umsetzung angeforderter Flexibilitätsmaßnahmen, in dem Sinne, dass sie die Flexibilitätsmaßnahmen in für die Bestandssysteme verständliche Operationen übersetzen und diese Operationen an die jeweiligen Systeme übermitteln.

Die Daten- und Applikationsintegration erfolgt über eine Integrationsplattform, die eine Verbindung zwischen unterschiedlichen Systemen ermöglicht. Hierbei werden auch die Schritte zur Erstellung von Flexibilitätsräumen abgebildet. Durch die Externalisierung der Flexibilitätsraumerstellung aus den zugrunde liegenden Microservice-Implementierungen wird der Erstellungsprozess transparent und wartbar gestaltet. Die Domänenexperten erhalten so die Möglichkeit, direkt an der Modellierung und Weiterentwicklung der Flexibilitätsdefinitionen mitzuwirken.

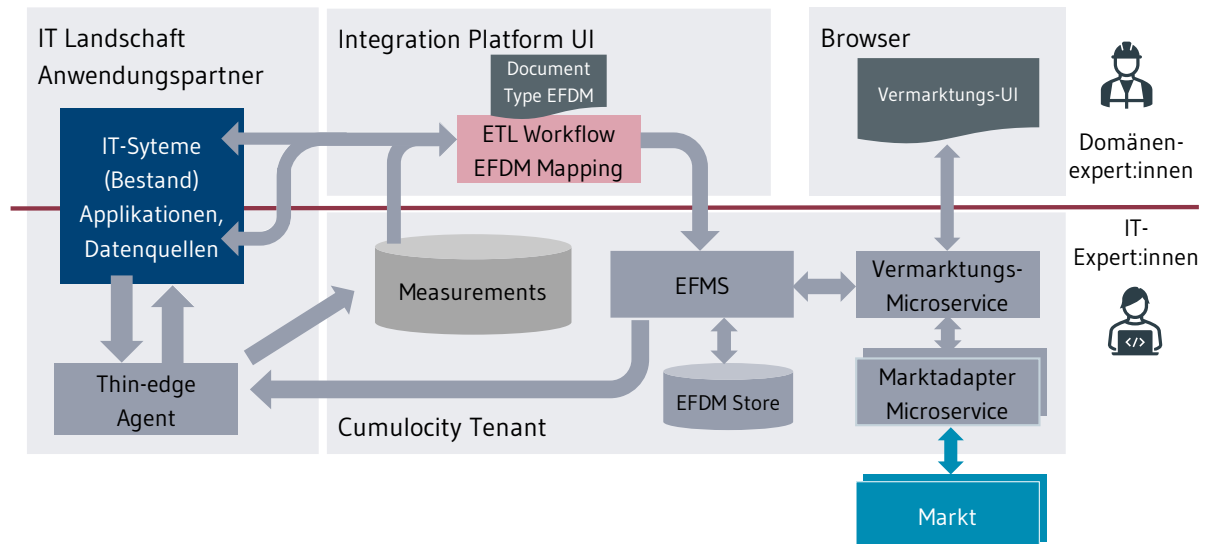


Abbildung 9: Konnektor-Framework und Aufbau der Cumulocity UP

4.2. Verwaltungsschale für EFDM

Die AAS ist das digitale Abbild eines physischen oder virtuellen Assets und bildet damit die Basis für den Digitalen Zwilling in der Industrie 4.0. Ein Asset bezeichnet dabei einen Gegenstand im Kontext von Industrie 4.0, der über seine AAS eindeutig identifiziert, beschrieben und in datengetriebene Ökosysteme integriert werden kann. Dies kann sowohl ein physisches Asset, wie etwa eine Produktionsmaschine, als auch ein virtuelles Asset, wie ein Prozess, sein. Die Repräsentation durch die AAS ermöglicht standardisierte Datenstrukturen und Schnittstellen, sodass Unternehmen ihre Assets effizient vernetzen, verwalten und in intelligente Produktionsprozesse einbinden können.

Eine AAS zeichnet sich durch ihre strukturierte und modulare Architektur aus. Durch sogenannte Submodelle (SM) können spezifische Informationen und Funktionalitäten eines Assets flexibel ergänzt werden, ohne bestehende Strukturen zu verändern. Die Standardisierung des EFDM als SM innerhalb der AAS folgt diesem Ansatz: Unternehmen, die bereits erste Implementierungen der AAS nutzen oder deren Maschinen zukünftig mit AAS-Funktionalitäten ausgeliefert werden, können das EFDM mit minimalem Integrationsaufwand übernehmen und unmittelbar in bestehende Systeme integrieren. Anstatt neue Schnittstellen oder proprietäre Lösungen zu entwickeln, lässt sich das EFDM einfach in bestehende AAS-Strukturen einbinden. Dies erleichtert die Einführung von Energieflexibilität erheblich, da vorhandene Mechanismen der AAS für Datenverwaltung, Kom-

munikation und Sicherheit genutzt werden können. Gleichzeitig fördert diese Lösung die Interoperabilität über System- und Herstellergrenzen hinweg und ermöglicht eine zukunftssichere Einbindung in digitale Energiemanagementsysteme.

Die AAS fasst die Informationen zu diesem Asset in verschiedenen SM zusammen, die jeweils einen spezifischen Aspekt des Assets beschreiben. Ein Beispiel dafür ist das SM „Digitales Typenschild“, welches die Identifikation des Assets, dessen Rückverfolgbarkeit sowie regulatorische Angaben nach EU-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG beinhaltet. Jedes SM ist dabei hierarchisch aufgebaut. Die Struktur basiert auf standardisierten Bausteinen, die gemäß dem AAS-Metamodell IEC 63278-2 definiert sind, was eine systemübergreifende Konsistenz sicherstellt. Ein leeres SM wird als „Submodel Template“ (SMT) bezeichnet und dient als Vorlage, um SM in konkreten Anwendungen mit spezifischen Werten zu befüllen. Zur Gewährleistung der Interoperabilität werden solche Vorlagen idealerweise einheitlich als standardisierte SMT festgelegt. Ein praktisches Beispiel ist das standardisierte SMT „Digitale Typenschild“. Hersteller können dabei standardisierte Felder mit maschinenspezifischen Daten belegen. Innerhalb der AAS-Interessensgruppe wird die Standardisierung, Entwicklung, Überprüfung, Veröffentlichung und Aktualisierung von SMT durch die „Industrial Digital Twin Association“ (IDTA) vorangetrieben. Detaillierte Informationen, beispielsweise zur Vorgehensweise bei der Informationsmodellierung mittels AAS, zur technischen Implementierung der AAS in Laufzeitumgebungen sowie zur kombinierten Nutzung der AAS mit Large Language Models, sind in den entsprechenden Publikationen beschrieben (Shi et al., 2024; Shi et al., 2025).

Die Standardisierung des EFDM erfolgt durch die Überführung des proprietären Modells in ein AAS-SMT nach den IDTA-Standardisierungsprozessen. Dafür wird eine offene Arbeitsgruppe für die Entwicklung des EFDM-SMT gebildet, die sich aus AAS- und Domänenexperten zusammensetzt. Für die Entwicklung des EFDM-SMT werden die ursprünglichen Inhalte des EFDM nicht verändert, sondern durch standardisierte AAS-Bausteine modelliert. Ein besonderer Fokus der AAS liegt auf der semantischen Interoperabilität, insbesondere zur Unterstützung der unternehmensübergreifenden Kommunikation. Im Bereich der Energieflexibilität werden verschiedene Begriffe und Rollen auf dem Flexibilitätsmarkt definiert, wie im Annex 1 des ACER Demand Response Network Code (2025) festgelegt:

- Steuerbare Einheit (Controllable Unit): Ein einzelnes stromerzeugendes Modul (z. B. Photovoltaikanlage) oder eine Verbrauchseinheit (z. B. Produktionsanlage). Im Kontext der AAS für Energieflexibilität wird der Begriff „steuerbare Einheit“ auch als energieflexibles Asset bezeichnet.
- Dienstbereitstellende Einheit (Service Providing Unit): Eine einzelne steuerbare Einheit oder eine Gruppe solcher Einheiten, die an einen gemeinsamen Netzanschlusspunkt angeschlossen sind, z. B. eine energieflexible Fabrik mit einem gemeinsamen Netzanschluss.
- Flexibilitätsanbieter (Flexibility Service Provider): Ein Marktteilnehmer, der über eine oder mehrere dienstbereitstellende Einheiten oder Gruppen verfügt und Systemdienstleistungen im Rahmen von Regelenergiemärkten oder lokalen Flexibilitätsmärkten erbringen kann. Ein Flexibilitätsanbieter kann dabei sowohl ein externer Dienstleister (z. B. Aggregator oder Energiedienstleister) als auch die flexible Fabrik selbst sein.

Steuerbare Einheiten werden von Anlagenherstellern bereitgestellt, die nicht direkt am Strommarkt teilnehmen. Diese Anlagenhersteller können jedoch technische Spezifikationen, Betriebsbeschränkungen und Leistungsdaten ihrer Maschinen in Form eines EFDM-SM liefern. Beispielsweise kann der Anlagenhersteller spezifische technische Eigenschaften zur Energieflexibilität, wie Anlaufzeiten einer Maschine, im standardisierten EFDM-SMT hinterlegen. Sobald ein SMT mit konkreten Werten gefüllt wird, entsteht daraus eine eindeutige SM-Instanz, welche zunächst die grundlegenden Informationen zum physischen Flexibilitätspotenzial der Maschine enthält.

Wenn diese steuerbare Einheit geliefert wurde und in einer energieflexiblen Fabrik betrieben wird, kann der Flexibilitätsanbieter auf Grundlage der bereits vorhandenen SM-Instanz des Anlagenherstellers seine eigene EFDM-Instanz erstellen, indem er diese um betriebsspezifische und anwendungsspezifische Datenelemente ergänzt. Die standardisierte Struktur des EFDM-SMT gewährleistet so eine interoperable Informationsweitergabe zwischen Anlagenherstellern und Flexibilitätsanbietern. Sobald der Flexibilitätsanbieter die Energieflexibilität der Anlage auf dem Markt anbietet, können andere Marktteilnehmer ebenfalls auf die relevanten Informationen aus dieser EFDM-Instanz zugreifen.

Entscheidend dabei ist, dass die Energieflexibilität jederzeit einheitlich durch dasselbe standardisierte EFDM beschrieben wird und der Zugriff über die standardisierte AAS-Schnittstelle (implementiert als REST API) erfolgt. Dadurch wird die Interoperabilität zwischen allen beteiligten Akteuren sichergestellt. Das detaillierte EFDM-SMT ist in der IDTA SMT EFDM Specification dokumentiert (befindet sich derzeit im IDTA-Review).

Die technische Umsetzung und Nutzung von Verwaltungsschalen erfolgt mithilfe eines AAS-Servers. In diesem können die Verwaltungsschalen von verschiedenen Assets gespeichert und auf die darin enthaltenen Informationen zugegriffen werden. Die Standardisierung des Metamodells der Verwaltungsschale, der SMT und der Schnittstellen des AAS-Servers entsprechend der Standards der IDTA (Industrial Digital Twin Association, 2024) ermöglicht dabei einen automatisierbaren, maschinenlesbaren Zugriff. Somit kann der AAS-Server als eine Vermittlungsschicht für die Verwaltung der Informationen der Assets fungieren, auf die verschiedene Dienste und Akteure in einheitlicher Art und Weise aufbauen können.

Der AAS-Server wird, wie in Abbildung 10 dargestellt, als integraler Bestandteil der UP implementiert, um einen semantisch einheitlichen Datenzugriff sowie eine zentrale Datenverwaltung sicherzustellen. Für jedes energieflexible Asset wird hierzu das standardisierte EFDM-SMT instanziiert und innerhalb des AAS-Servers bereitgestellt. Die Nutzung des AAS-Servers mit EFDM-SM bietet für die energieflexiblen Assets innerhalb der UP erhebliche Vorteile. Dank des standardisierten EFDM-SMT können sämtliche Services der UP einheitlich auf die Daten zugreifen, sodass bei der Entwicklung neuer Services keine individuellen Konnektoren zur Datenmodelltransformation erforderlich sind. Stattdessen steht eine einheitliche und zentrale Datenbasis zur Verfügung, die der AAS-Server bereitstellt. Weiterhin ermöglicht der AAS-Server die Integration zusätzlicher SM, beispielsweise für Produktionsplanungsdaten aus ERP- oder MES-Systemen, Prozessdaten der Anla-

gensteuerung oder Energieverbrauchswerte. Technisch erfolgt diese Anbindung über die standardisierte AAS-API (typischerweise als REST-API implementiert) sowie über spezielle AAS-Komponenten wie die Databridge, die als Adapter zur Einbindung externer Datenquellen dient. Auf diese Weise wird die Datenbasis kontinuierlich erweitert, ohne dass Services der UP erneut direkt an Quellsysteme angebunden werden müssen. Damit wird die Nutzung von Energieflexibilitäten deutlich vereinfacht und beschleunigt.

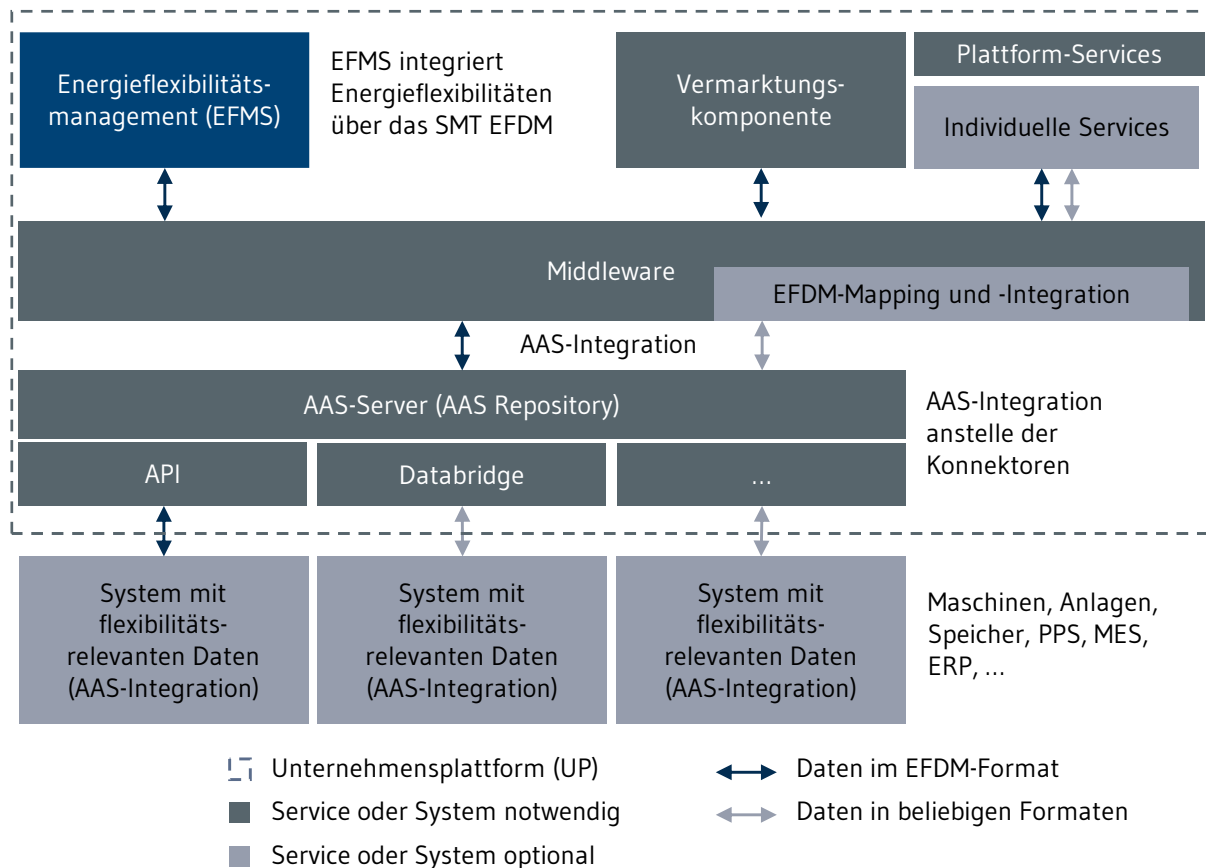


Abbildung 10: Einordnung einer AAS-Infrastruktur in die Architektur der UP

4.3. OPC UA Companion Specification und Building Block Energy Management

Im Kopernikus-Projekt SynErgie wird das EFDM als Teil einer AAS standardisiert und Energieflexibilität über den Building Block „Energy Management“ in OPC UA for Machinery integriert. Die Funktionalität zur Erfassung von Medien- und Energiekenngrößen kann dadurch Branchenübergreifend in allen Maschinen und Anlagen genutzt werden, die über einen OPC UA Server verfügen, der OPC UA for Machinery implementiert. Ergänzend wird eine CS für Reinigungs- und Vorbehandlungsanlagen entwickelt, die die Modellierung solcher Anlagen in OPC UA standardisiert.

Die Entwicklung und Harmonisierung der Modelle erfolgt vorwettbewerblich in offenen Arbeitsgruppen unter Leitung der OPC Foundation und Branchenverbänden wie dem VDMA. Im Rahmen von SynErgie wurde die OPC UA Companion Specification Surface Technology – Cleaning and Pretreatment (OPC UA 40701) erarbeitet. Zusätzlich wurde die übergeordnete Surface Technology – General (OPC UA 40700) erstellt. Ferner wurde der Basic Building Block „Energy Management“

innerhalb von OPC UA for Machinery (OPC 40001-4) mitentwickelt, der auf der OPC UA CS Energy Consumption Measurement (OPC UA 34100) basiert und für alle Maschinentypen einsetzbar ist.

Abbildung 11 verdeutlicht die hierarchische und modulare Struktur der entwickelten Spezifikationen (dunkelblau) sowie deren Wechselwirkungen mit bereits bestehenden Spezifikationen (hellblau).

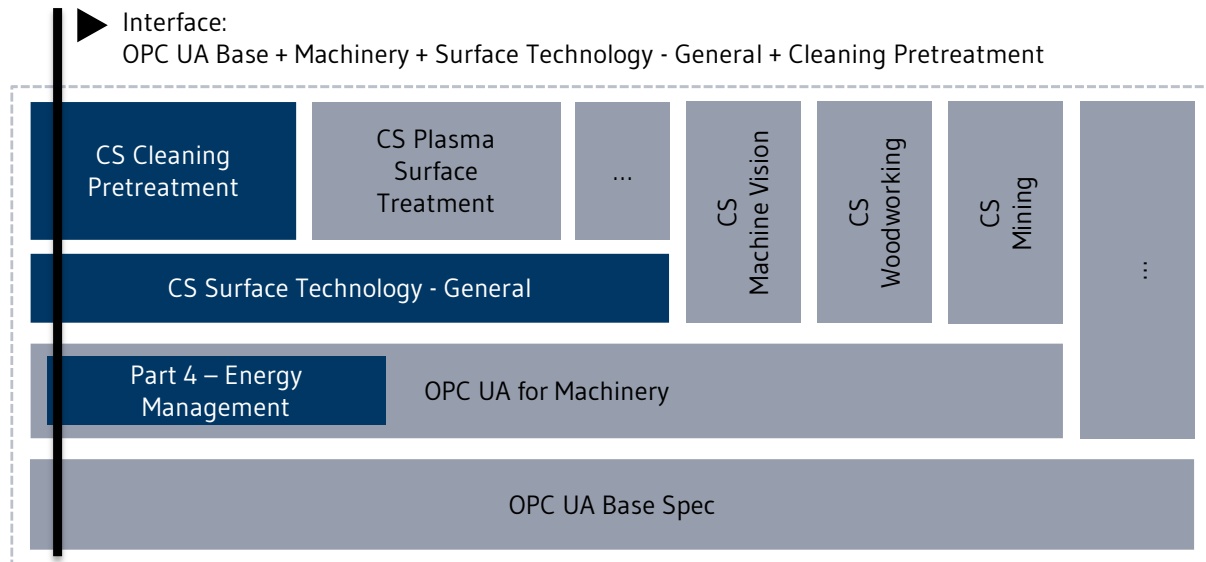


Abbildung 11: Einordnung der OPC UA Informationsmodelle

Die vollständige Datenanbindung einer Reinigungsanlage implementiert die Spezifikationen schrittweise: Zunächst wird die OPC UA for Machinery implementiert, welche maschinenübergreifende Funktionalität bereitstellt. Dazu zählen unter anderem Identifikation und Aufbau der Maschine und ihrer Komponenten, Betriebszustände sowie Energie- und Medienverbräuche über OPC 40001-4. Anschließend wird das modulare Anlagenmodell der Oberflächentechnik aus OPC 40700 übernommen, das die Modellierung verschiedener Reinigungsanlagen aus vorgefertigten Funktionsbausteinen und die Kommunikation der Anlage mit höhergelagerten IT-Systemen ermöglicht. Zuletzt erfolgt die Einbindung von häufig in der Reinigungs- und Nachbehandlungstechnik verwendeten Komponenten und Messparametern über OPC UA 40701. Ziel ist eine einheitliche semantische Basis für effiziente Datenerfassung, einfache MES-Integration und – wo zulässig – den automatisierten Eingriff in die Steuerung zur Umsetzung von EFDM-Maßnahmen.

Um Generalisierbarkeit zu sichern, folgt die Modellierung einem modularen Ansatz. Anlagen werden als Verkettung funktional entkoppelter Stationen mit definierten Eigenschaften und standardisierten Sensorkonfigurationen beschrieben. Dadurch bleiben Implementierungen flexibel erweiterbar und für weitere Anlagentypen skalierbar.

Die praktische Validierung erfolgte an einer industriellen Durchlaufreinigungsanlage in der ETA-Fabrik der TU Darmstadt. Gezeigt wurden die einfache Integration in bestehende OPC UA-Server, die flexible Parametrierbarkeit von Energie- und Medienmessungen auf System- und Komponentenebene sowie die Anbindung an EFDM/AAS. Energieflexible Betriebsstrategien (z. B. Lastver-

schiebungen) konnten ohne signifikante Einbußen bei Prozessqualität oder Durchlaufzeit demonstriert werden. Die interoperable Einbindung in Energiemanagementsysteme und Plattformlösungen erleichtert den Transfer.

4.4. Vorteile der Standardisierung für die Energieflexibilisierung

Um einen reibungslosen Ramp-up von Energieflexibilität in der Industrie zu ermöglichen, sind standardisierte Datenaustauschformate wie die AAS oder OPC UA unerlässlich. Sie schaffen Interoperabilität und Flexibilität zwischen Maschinen und Systemen. Bisher wurden OPC UA-Server meist individuell auf Kundenanforderungen zugeschnitten, was hohen Aufwand in Planung und Inbetriebnahme verursacht. Die Integration in neue Plattformen bringt zusätzliche Herausforderungen mit sich, da bestehende Informationsmodelle manuell angepasst werden müssen und Interpretationsspielräume bei Variablen entstehen.

Die prototypische Umsetzung erfolgt an einer Durchlaufreinigungsanlage in der ETA-Fabrik der TU Darmstadt, die als Demonstrator für energieeffiziente Produktion dient.

OPC-UA-Datenmodell

Durch die Nutzung des OPC UA-Datenmodells sowie die Implementierung spezifischer Steuerungsvariablen gelingt es Maschinen, wie am praktischen Beispiel der Durchlaufreinigungsanlage im Folgenden gezeigt, in der ETA-Fabrik energieflexibel zu betreiben. Die standardisierte OPC UA-Schnittstelle bildet hierbei die Grundlage für die Umsetzung eines integrierten Energiemanagements (Kramer et al., 2025a). Das sowohl eine effiziente Erfassung und Bereitstellung von Prozessdaten als auch eine einfache Integration in MES-Systeme als Grundlage für die Anbindung von Reinigungsanlagen im Projekt ermöglicht. Über einen Optimierer kann die Reinigungsanlage, unter Einbeziehung von Börsenstromdaten, Prozessparametern und einem Referenzprozess gesteuert werden. Der Optimierer regelt nach einer definierten Betriebsstrategie.

Dabei wird das entwickelte EFDM als einheitliche Kommunikationsbasis für Energieflexibilitätsmaßnahmen verwendet und stellt somit einen zentralen Bestandteil der ESP (Reinhart et al., 2018) dar. Die Abbildung des EFDMs in Form eines SM der AAS unterstützt dabei den Datenaustausch für das Energiemanagement über den gesamten Betriebszeitraum der Maschine. Die Maschine wird hierbei als ein cyber-physisches Produktionssystem, bei dem Computersysteme mit anderen Systemen und der physischen Welt interagieren verstanden (Monostori, 2016).

Beschreibung des Anwendungsfalls

Bei der betrachteten Durchlaufreinigungsanlage handelt es sich um das Modell YukonDAD der Firma BvL Oberflächentechnik (Frank und Magin, 2024). Die Maschine (siehe Abbildung 12) arbeitet mit einem kontinuierlichen Materialfluss, bei dem die zu reinigenden Teile nacheinander die Reinigungs-, Spül- und Trocknungszone durchlaufen. Zuerst wird das Bauteil im Eingangsbereich auf das Förderband gelegt, anschließend wird es gereinigt und gespült, danach erfolgt der Vortrocknungsprozess und schließlich wird das Bauteil im Trocknungsbereich getrocknet. Die Beheizung der beiden Tanks (Füllvolumen 500 Liter) erfolgt jeweils über fünf Heizstäbe mit einer Leistungsaufnahme von 6 kW pro Heizstab. Die IT-OT-Architektur der Durchlaufreinigungsmaschine

basiert auf den Kommunikationsprotokollen OPC UA und Modbus. Im folgenden Beispiel wird gezeigt, wie mithilfe der standardisierten Datenmodelle die Tankheizung der Durchlaufreinigungsanlage flexibelisiert werden kann. Diese Art von Optimierern kann in Zukunft in MES-Systeme integriert werden. Durch die gleiche Bezeichnung der Variablen innerhalb der CS ist ein Duplizieren auf andere Maschinen möglich. Das reduziert die Integrationsaufwände. Die Stellsignale werden als EFDM-Maßnahme generiert, dadurch können die Maßnahmen innerhalb des Flexibilitätsraums vermarktet werden.

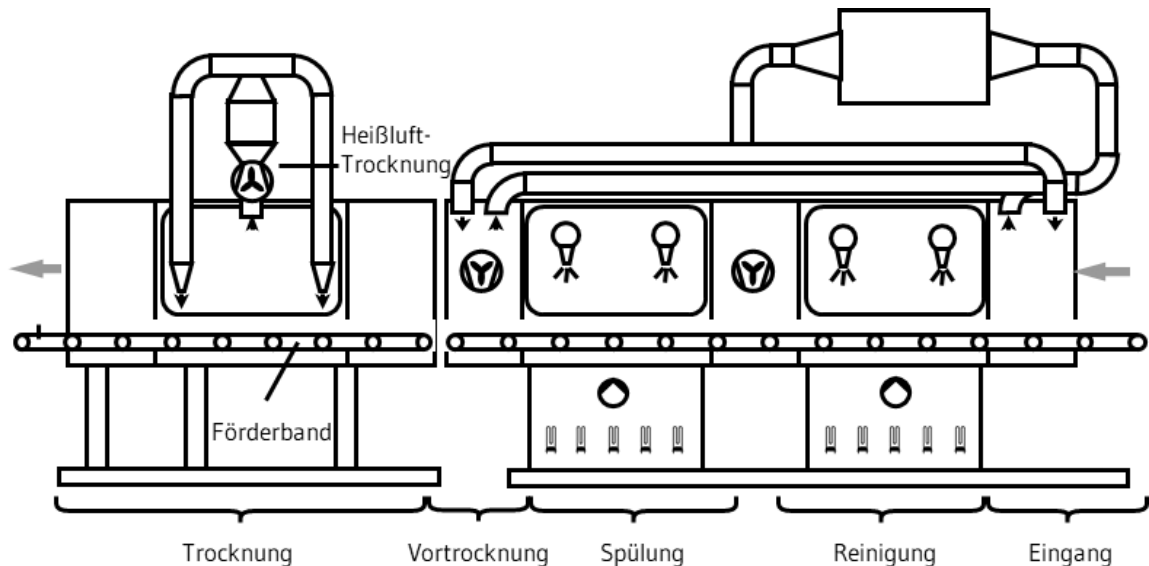


Abbildung 12: Schematische Darstellung einer Durchlaufreinigungsanlage

Referenzprozess und Potenzialanalyse

Abbildung 13 zeigt den Referenzprozess. Der Referenzprozess wurde im Vorgängerprojekt LoTuS umfassend analysiert und detailliert beschrieben, wodurch eine fundierte Grundlage für die Weiterentwicklung energieflexibler Betriebsstrategien geschaffen wurde (Weigold, 2023). Die Heizstäbe werden durch einen Zweipunktregler geregelt. Der Zweipunktregler arbeitet mit einer unteren Temperaturschwelle von 48 °C und einer oberen Schwelle von 50 °C. Es zeigt sich zudem, dass lediglich ein Paar Heizstäbe im Spültank geregelt wird. Dies liegt an der Leistungsbegrenzung in der Software, die das Zuschalten weiterer Heizstäbe im Dauerbetrieb verhindert. Infolgedessen wird der Tank der Reinigungszone nur über den Kaskadenfluss durch die Abwärme des Spültanks beheizt, weshalb nur die Temperaturkurve des Spültanks dem typischen Verlauf eines Zweipunktreglers folgt. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass die Heizstäbe unabhängig vom aktuellen Strompreis eingeschaltet werden.

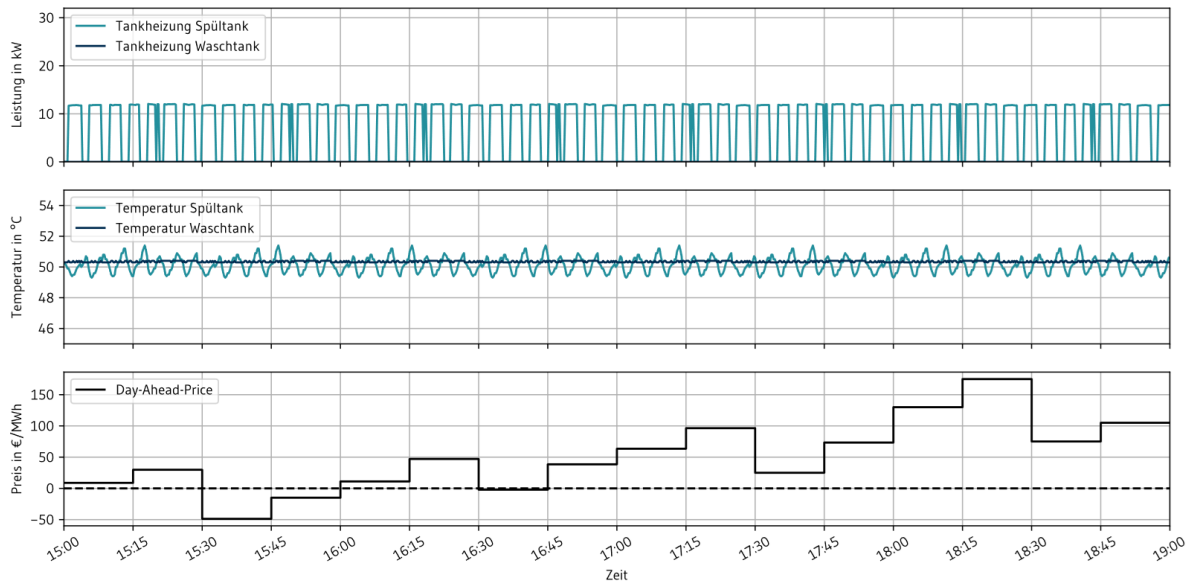


Abbildung 13: Parameter des Anwendungsfalls im Referenzbetrieb

Zur Ableitung geeigneter Energieflexibilisierungsmaßnahmen wurde zunächst das Flexibilisierungspotenzial der Anlage ermittelt. Zur Ermittlung des technischen Potenzials wurde das Flexibilitätspotenzial der beiden Hauptverbraucher, der Tankheizungen sowie der Umlufttrocknung, unter Verwendung ihrer Zeit- und Leistungsindikatoren im Dauerbetrieb bewertet.

Auf Grundlage dieser Potenzialabschätzung wurde geprüft, inwieweit sich die am PTW entwickelten Energieflexibilitätsmaßnahmen aus der Anwendung an der Reinigungsanlage MAFAC KEA (Fuhrländer-Völker, 2023) auf die YukonDAD-Anlage übertragen lassen, welche im Vergleich eine höhere Reinigungsleistung und einen höheren Energiebedarf hat. Aus den aufgezeichneten Daten des Referenzprozesses ergeben sich die Heißlufttrocknung und die Tankheizungen als Hauptverbraucher. Dabei ist insbesondere bei den Tankheizungen ein diskontinuierlicher Leistungsbedarf erkennbar, der auf ein hohes Flexibilisierungspotenzial hinweist.

Die 500 Liter fassenden Reinigungsmedientanks dienen als inhärente Speicher. Dadurch kann die Aktivierung der Heizstäbe in Zeiten niedriger Börsenstrompreise verlagert werden. Im Vergleich hierzu fällt das Flexibilisierungspotenzial der Umlufttrocknung geringer aus.

Strompreisoptimierter Betrieb

Im konventionellen Betrieb wird die Tankheizung aktiviert, sobald die Tanktemperatur unter die Prozesstemperatur fällt. Der Optimierer hingegen arbeitet nach einer abweichenden Logik. Neben regelbasierten Verfahren lässt sich der Optimierer auch durch Ansätze des Maschinellen Lernens oder mittels mathematischer Optimierungsmethoden realisieren. Im Folgenden wird der Betrieb unter Verwendung der stochastischen dynamischen Optimierung betrachtet. Der Einsatz dieser Optimierungsmethode bietet gegenüber einem regelbasierten Ansatz durch eine vorausschauende Arbeitsweise eine verbesserte Reaktion auf dynamische Betriebsbedingungen (Nickel et al., 2022).

Auftretende Temperaturschwankungen im Betrieb erschweren eine präzise Vorhersage und bringen somit erhebliche Unsicherheiten ins System. Diese stochastischen Einflüsse werden durch ihre Wahrscheinlichkeitsverteilung modelliert und können so durch den stochastisch-dynamischen Ansatz genutzt werden. Die Optimierung erfolgt rekursiv mithilfe der terminalen Kostenfunktion, welche die erwarteten Kosten bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes beschreibt.

Eine Aktivierung erfolgt, wenn entweder die Tanktemperatur kritisch niedrig ist oder der Strompreis im betrachteten Intervall gemäß dem Algorithmus als günstig eingestuft wird. In diesem Fall wird die Heizleistung gezielt verschoben, um Wärme im Medium zu speichern und gleichzeitig Stromkosten zu reduzieren. Die Tanktemperatur wird dabei innerhalb eines definierten Prozessfensters geregelt, was eine flexible Lastanpassung ermöglicht.

Abbildung 14 zeigt den optimierten Betrieb mittels stochastischer dynamischer Optimierung. Für die wirtschaftliche Analyse wird anschließend der Betrieb durch einen regelbasierten Optimierer im Vergleich zum Referenzprozess betrachtet.

Praktische Versuchsreihe

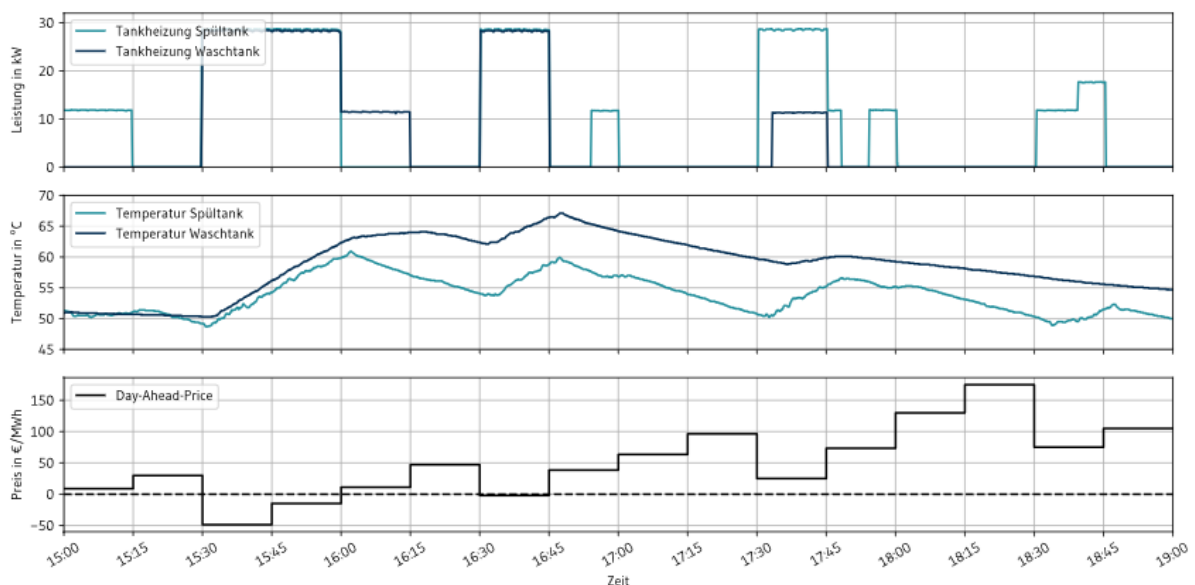


Abbildung 14: Parameter des Anwendungsfalls im optimierten Betrieb

Zunächst wird die Demand-Response-Maßnahme der inhärenten Energiespeicherung durch gezielte Steuerung der Tankheizungen umgesetzt (Kramer et al., 2025). Für die Maßnahme der inhärenten Energiespeicherung wird ausschließlich die Tankheizung betrachtet, da die Strompreise alle 15 Minuten aktualisiert werden und die Luftheizung nur für Demand-Response-Maßnahmen mit einer Dauer von wenigen Sekunden geeignet ist. Die Ergebnisse der Maßnahme zur inhärenten Energiespeicherung sind in Abbildung 14 dargestellt. Die Tests wurden über einen Zeitraum von vier Stunden durchgeführt. Zu Beginn des Zeitraumes lagen die Strompreise auf einem niedrigen Niveau und stiegen im Verlauf kontinuierlich an. Auffällig war insbesondere das Auftreten negativer Strompreise in den Zeitfenstern zwischen 15:30 und 16:00 Uhr sowie zwischen 16:30 und 16:45 Uhr. In der frühen Phase des Zeitintervalls erfolgte das Aufheizen vorrangig während

dieser Phasen negativer Strompreise. In diesen Zeiträumen wurden sämtliche Heizelemente aktiviert, um den ökonomischen Vorteil vollständig auszunutzen. Gegen Ende der Schicht wurde nur noch bei Bedarf oder während kurzzeitiger günstiger Preisintervalle geheizt.

Im Vergleich zum Spültank wurde der Waschtank zu Beginn der Schicht intensiver beheizt, während gegen Ende nur eine minimale Wärmezufuhr stattfand. Diese Strategie nutzt die günstigen thermischen Eigenschaften des Waschtanks aus: Er kühlt langsamer ab und kann bei Bedarf rascher wieder aufgeheizt werden. Dadurch fungiert der Waschtank als thermischer Puffer, der es dem Gesamtsystem ermöglicht, Phasen hoher Strompreise am Schichtende besser zu überbrücken. Verglichen mit dem Referenzprozess in Abbildung 13 zeigen die Heizelemente längere Aktivierungszeiten und werden bevorzugt in Zeitfenstern mit niedrigen Strompreisen betrieben. Dies führt zwar zu größeren Temperaturschwankungen im Tank im Vergleich zum Referenzprozess, die jedoch stets innerhalb der vorgegebenen Temperaturgrenzen bleiben.

Gegenüber dem entwickelten Referenzprozess konnte die erfolgreiche Implementierung der Maßnahmen gezeigt werden. Gegenüber dem Referenzprozess ergaben sich im Zwei-Schicht Betrieb mit Hilfe der Flexibilisierungsmaßnahmen unter Verwendung einer regelbasierten Optimierung Einsparungen von 43,5% der Stromkosten. Die CO₂-Emissionen konnten durch die Implementierung der Flexibilisierungsmaßnahmen um 22,46% reduziert werden. Die Berechnung der Emissionen erfolgte auf Basis des zeitvariablen CO₂-Emissionsfaktors des deutschen Strommixes.

Bewertung

Der Einsatz eines Algorithmus zum energieflexiblen Betrieb einer Durchlaufreinigungsanlage führt zu einer Energiekosteneinsparung von 43,5% im Vergleich zum Referenzbetrieb und gelingt durch die Nutzung des OPC UA-Datenmodells. Besonders hervorzuheben ist der geringe Hardwareaufwand im Vergleich zu konventionellen Ansätzen zur Energieeinsparung. Diese Maßnahme trägt zur Synchronisierung der industriellen Energienachfrage mit dem schwankenden Energieangebot bei und könnte durch die Integration von selbst erzeugtem Solarstrom zusätzliche Einsparungen ermöglichen. Zudem bietet die bivalente Aufheizphase durch ein externes Heizwassernetz weiteres Flexibilisierungspotenzial. Durchlaufreinigungsanlagen machen rund 23% der industriellen Reinigungsanlagen in Deutschland aus, was die Relevanz dieser Ergebnisse unterstreicht (Rögner & Pfeilschifter, 2021). Die Skalierbarkeit der energieflexiblen Steuerung auf mehrere Anlagen ist ein weiterer Vorteil.

Limitation und Ausblick

Es konnte die vielversprechende Umsetzung der Energieflexibilisierungsmaßnahmen im Forschungsbetrieb gezeigt werden. Anschließend gilt es, die Ergebnisse in die Anwendung in der Industrie zu transferieren. Die industrielle Übertragbarkeit der entwickelten Flexibilisierungsmaßnahmen ist bislang noch nicht abschließend geklärt, da bisher lediglich erste Versuchsreihen durchgeführt wurden. Zudem sind die Auswirkungen von Temperaturschwankungen auf die Prozessqualität und nachgelagerte Fertigungsschritte noch nicht ausreichend untersucht. Aktuell

werden alternative Optimierungsstrategien, wie mathematische Verfahren und maschinelles Lernen, geprüft, um die Energieeffizienz weiter zu steigern. Zudem könnte die Kombination von flexiblem Energiebezug und CO₂-Bepreisung zusätzliche Einsparpotenziale bieten.

5. Anwendungen der ESP und der IKT-Artefakte in der Praxis

5.1. Anwendungen in mittelständischen Unternehmen

SPHINX OPEN als SynErgie-Unternehmensplattform bei GFT Technologies

Kurzcharakterisierung

GFT Technologies ist ein weltweit führender Anbieter von digitalen Lösungen und ein Wegbereiter der digitalen Transformation. Das Unternehmen entwickelt innovative, KI-zentrierte Geschäftslösungen, modernisiert IT-Infrastrukturen und gestaltet richtungsweisende Kernsysteme der nächsten Generation für Branchen wie Banken, Versicherungen und die Industrie. Weltweit beschäftigt GFT Technologies mehr als 12.000 Technologieexpert:innen an über 20 Standorten. Im Fokus steht dabei, insbesondere in der Industrie, eine durchgängige Vernetzung entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu ermöglichen. Ein zentrales Element des Angebots ist dabei die IIoT-Plattform SPHINX OPEN.

Energieflexibilität und Befähigung

Im Rahmen der aktuellen dritten Förderphase des Projekts SynErgie wird die Plattform SPHINX OPEN zu einer Unternehmensplattform (UP) für die industrielle Praxis weiterentwickelt. Ziel ist es, Industrieunternehmen zu befähigen, ihre Produktionsprozesse flexibel an schwankende Energieangebote anzupassen und aktiv am Energiemarkt teilzunehmen. Hierfür wurden wichtige Meilensteine umgesetzt, darunter die Erstellung eines Architektur-Blueprints sowie eines Leitfadens für die Umsetzung energieflexibler IIoT-Plattformen (Kopernikus-Projekt SynErgie, 2025). Diese Ergebnisse gewährleisten eine strukturierte Herangehensweise an die Implementierung energieflexibler Plattformen und unterstützen weitere IIoT-Plattformanbieter bei der Anpassung bestehender Systeme. Der Transformationsprozess von einer bestehenden IIoT-Plattform hin zu einer energieflexiblen UP basiert auf einer detaillierten Gap-Analyse, die die Identifikation bestehender Lücken zwischen dem aktuellen Stand einer IIoT-Plattform und der angestrebten Unternehmensplattform erlaubt, wodurch eine fundierte Ableitung des Handlungsbedarfs ermöglicht wird. Die Handlungsempfehlungen für SPHINX OPEN umfassen zwei zentrale Themenfelder, in die sich viele der Anforderungen clustern lassen: die Integration des EFDM sowie die Implementierung von Vermarktungslösungen für Energieflexibilität.

Vermarktung und Benefits

Zum Projektabschluss soll SPHINX OPEN als Unternehmensplattform für einen Anwendungsfall eines Referenzkunden der GFT prototypisch umgesetzt werden. Damit wird SPHINX OPEN um den Use Case der Energieflexibilitätsvermarktung erweitert. Mit der Einbindung des standardisierten EFDM wird eine dynamische Anpassung an branchenspezifische oder kundenspezifische Anforderungen ermöglicht. Außerdem folgt SPHINX OPEN als Unternehmensplattform der im Rahmen des SynErgie-Projekts entwickelten Referenzarchitektur. Die SynErgie-Standards haben so den Sprung in ein kommerzielles Produkt geschafft sowie gleichzeitig zur Förderung nachhaltiger Geschäftsmodelle beigetragen.

Unternehmensplattform in Stanz-Laser-Maschinen

Kurzcharakterisierung

TRUMPF Werkzeugmaschinen SE + Co. KG ist ein Marktführer für Werkzeugmaschinen für die flexible Blechbearbeitung, insbesondere mit Lasern. Die Standardverfahren sind insbesondere Schneiden, Schweißen, Biegen und Stanzen. Neben den Maschinen liefert TRUMPF auch Software. Dies betrifft nicht nur Software zur direkten Programmierung und Steuerung der einzelnen Maschine, sondern auch Software zur Planung, Steuerung und Optimierung der gesamten Blechfertigung. Die TRUMPF-Gruppe hat ca. 16.000 Mitarbeiter weltweit und einen Jahresumsatz von 4,2 Mrd. €.

Ziel ist es, die Energieflexibilitätsmaßnahme „Maschinenbelegung anpassen“ als steuerbaren Service über die Unternehmensplattform (UP) bereitzustellen. Dabei werden sowohl marktseitige Anforderungen (z. B. Reaktionszeiten, Abrufbarkeit) als auch prozessseitige Randbedingungen (z. B. Maschinenverfügbarkeit, Rüstzeiten, Qualitätsanforderungen) berücksichtigt. Der entwickelte Optimierungsservice ermöglicht es, die Maschinenbelegung im Schneidprozess so zu gestalten, dass Lastverschiebungen, -verzichte und -erhöhungen gezielt und wirtschaftlich umgesetzt werden können.

Ergänzend wurde die Anbindung der TRUMPF-Systeme an die UP unterstützt sowie die Zielarchitektur für eine zukünftige Integration in ein virtuelles Kraftwerk konzipiert.

Energieflexibilität und Befähigung

Im Rahmen des Projekts zur Weiterentwicklung der Energieflexibilitätsmaßnahmen im industriellen Umfeld wurde in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen TRUMPF ein innovativer Ansatz zur dynamischen Maschinenbelegung im Laserschneidprozess entwickelt. Aufbauend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Förderphasen liegt der Fokus dieses Beitrags auf der Validierung und Übertragung der entwickelten Referenzarchitektur und Services auf ein konkretes industrielles Anwendungsszenario.

Die Konzepte des flexiblen Lastmanagements sind essenziell für die Umsetzung digitaler Werkzeuge. Flexibles Lastmanagement bezieht sich auf die Anpassung des Energieverbrauchs an die Verfügbarkeit von Energiequellen, insbesondere in Zeiten hoher Nachfrage oder niedriger Erzeugung. Durch die Implementierung der Lösungen wird eine aktive Steuerung des Energieverbrauchs in der Produktion ermöglicht.

Digitale Werkzeuge unterstützen Trumpf dabei, Produktionsprozesse so zu gestalten, um flexibler auf Änderungen in der Energieverfügbarkeit reagieren zu können. Dies geschieht durch die Analyse des Energieverbrauchs und die proaktive Anpassung der Maschinenbelegung, um Energiekosten zu optimieren und die Effizienz zu steigern.

Die zukünftige Entwicklung des Optimierungsservices sieht vor, zusätzliche Funktionen zu integrieren, die es ermöglichen, noch präzisere Vorhersagen über den Energieverbrauch zu treffen. Hierzu wird an der Weiterentwicklung des Algorithmus gearbeitet, der auf maschinelles Lernen setzt, um die Effizienz weiter zu steigern.

Vermarktung und Benefits

Mit der realisierten bidirektionalen Kommunikation kann die UP Vermarktungssignale an den Trumpf-Service in Form von Flexible-Last-Maßnahmen-Paketen übermitteln. Flexibilitäten, die im EFMS vorliegen, können mit den vorhandenen Marktschnittstellen der Vermarktungskomponente an Zielmärkte, hier den lokalen Flexibilitätsmarkt, übermittelt werden.

Die daraus generierten Benefits liegen vor allem in der Erweiterung des Geschäftsmodells hinsichtlich der Flexibilisierung von Laserschneidmaschinen (u.a. unter Nutzung von "Equipment as a Service" - EaaS) und der Validierung der in den ersten beiden Förderphasen entwickelten Referenzarchitektur.

5.2. Anwendungen in energieintensiven Unternehmen

ESP-Implementierung in der Papierindustrie bei UPM

Kurzcharakterisierung

UPM ist ein global agierender Konzern im Geschäftsbereich der grafischen Papierherstellung mit etwa 5.000 Mitarbeitenden und einer Produktion von etwa 4,0 Millionen Tonnen grafischen Papiers jährlich. Von insgesamt zehn Standorten in Europa und den USA sind im Zeitraum 2023 - 2026 drei deutsche Papierfabriken Teil des SynErgie-Projekts: UPM Augsburg, UPM Nordland Papier in Dörpen, und UPM Schongau.

Identifikation von Energieflexibilität und standortspezifische Implementierung des ESP-Konzepts

Der Papierherstellungsprozess gliedert sich grundsätzlich in drei Schritte, die jeweils unterschiedliche Energieflexibilität bieten. Die Schritte 1 und 3 – die Fasererzeugung und die Nachbereitung – verfügen insbesondere über zeitliche Flexibilitäten in der Produktionssteuerung. Über Speicherbütten beziehungsweise Tambourläger können die Produktionsschritte 1 und 3 zeitlich von den in Schritt 2 – der Papierherstellung – kontinuierlich laufenden Papiermaschinen entkoppelt werden. Auch im zweiten Produktionsschritt ist die Flexibilisierung durch die Anpassung von Produktionsplänen bei entsprechender Auftragslage grundsätzlich möglich. Größere und kontinuierlich vorhandene Flexibilitätspotenziale bietet aber vor allem die bivalente Wärmeversorgung zur Trocknung des Papiers und der Streichfarbe, welche eine preisbasierte Wahl zwischen den Energieträgern Strom und Erdgas ermöglicht.

Abgeleitet vom theoretischen Vorbild der ESP hat UPM die energieflexibilitätsfördernde Zielarchitektur „EnFlex“ zur Vernetzung der Produktionssteuerung und des Energieflexibilitätsmanagementsystems entwickelt. Kern der Implementierung ist der individuelle und cloudbasierte Optimierungsservice „Beyond Spot Cloud“. Dieser wurde ursprünglich für das Werk in Schongau entwickelt und pilotiert, und im Anschluss auf andere Werke übertragen. Werktags führt der Service täglich eine kostenminimierten Energieplanung des Folgetages durch auf deren Basis das System die Energiemengen des Tages teilweise automatisiert beschafft sowie einen optimalen Produktions- und Kraftwerksfahrplan empfiehlt. Auf Basis aktueller Marktdaten validiert der Service zudem am Produktionstag die Ergebnisse in einem 15-Minutentakt mittels einer aktualisierten Optimierung.

Vermarktung und Benefits

Die Vermarktung der Flexibilitäten erfolgt aktuell insbesondere auf den Spotmärkten für Energie. Eine Vermarktung auf den Regenergiemärkten, wofür das Unternehmen die nötigen Präqualifikationen für die Primärregelung sowie die Sekundär- und Minutenreserve besitzt, ist ebenfalls möglich. Zu Zeiten der Verordnung zu abschaltbaren Lasten (AbLaV) wurden zudem entsprechende Flexibilitäten aktiv mit allen Papiermaschinen bereitgestellt.

EnFlex trägt insbesondere zur Reduktion von Energiekosten bei, da zum einen durch die zeitliche Verschiebung von Stromverbräuchen die Zeiten geringerer Börsenstrompreise gezielt genutzt werden können. Zum anderen erlaubt die Bivalenzstrategie in der Wärmeversorgung die Wahl zwischen Strom und Erdgas und folglich eine zeitabhängige Entscheidung für den günstigeren Energieträger. Auf diese Weise werden nicht zuletzt auch Treibhausgasemissionen reduziert und folglich zu einer effektiven Defossilisierung beigetragen.

EMS-Implementierung in der NExT-Factory von Schaltbau

Kurzcharakterisierung

Schaltbau ist ein weltweit führender Anbieter von Gleichstromlösungen und hat sich auf Produkte und Lösungen spezialisiert, die die Elektrifizierung in allen Branchen vorantreiben. Mit einem breiten Portfolio an Schützen, Steckverbindern, Schaltern und Sicherheitskomponenten unterstützt Schaltbau seit Generationen Partner und Kunden bei der Lösung von Herausforderungen in der Bahn. Mit der neuen Marke Eddicy baut das Unternehmen auf diesem Erbe auf und entwickelt innovative Lösungen, die höchste Sicherheits- und Zuverlässigkeitsstandards für das Schalten und Schützen von Gleichstromanwendungen in der Energie- und E-Mobilität erfüllen. Mit Hauptsitz in München, Deutschland, und unterstützt von einem globalen Team von über 1.000 Mitarbeitern, gestaltet Schaltbau die Zukunft der Elektrifizierung mit fast einem Jahrhundert Know-how.

Identifikation von Energieflexibilität im DC-Grid

Im Rahmen der „Schaltbau Next Factory“ wurde weltweit erstmals ein DC-Grid (Gleichstromnetz) in einem produktiven Umfeld realisiert – ein Meilenstein für die industrielle Energiewende. Durch die Vermeidung von Wandlungsverlusten lassen sich signifikante Energieeinsparungen erzielen. Eine intelligente Kombination aus elektrischen und thermischen Speichern mittels eines selbstentwickelten Energiemanagementsystems, ermöglicht darüber hinaus die Nutzung vielfältiger Energieflexibilität: Der elektrische Speicher dient zum Peak Shaving und kurzfristigen Lastverschiebungen, während der thermische Speicher Energie langfristig vorhält.

Besonderes Potenzial für Energieflexibilität ergibt sich aus der firmeneigenen PV-Anlage mit 1,3 MWp – einer Größe, die in Frühling, Sommer und Herbst den Energiebedarf zeitweise deutlich übersteigt. Um dieses Potenzial nutzbar zu machen, wurde zunächst eine detaillierte Analyse der größten Energieverbraucher durchgeführt. Das Ergebnis: Die Produktion selbst spielt beim Stromverbrauch eine untergeordnete Rolle. Stattdessen dominieren Heizung, Klimatisierung und Belüf-

tung sowie als größter Einzelverbraucher die Schock- und Vibrationstestanlage, die je nach Testlauf mehrere Stunden bis Tage in Betrieb ist und bis zu 20 % des gesamten Energiebedarfs des Gebäudes ausmacht.

Gerade dieser Shock- und Vibrationstester bietet hohes Flexibilitätspotenzial: Nicht zeitkritische Tests lassen sich gezielt in die Mittagsstunden mit hohem PV-Ertrag legen, auf besonders sonnige Tage verschieben oder nachts mithilfe des Batteriespeichers puffern. So entsteht ein praxisnahes Beispiel, wie durch intelligente Nutzung von Energieverbrauch und -speicherung ein energieeffizienter Betrieb mit hoher Flexibilität möglich wird.

Vermarktung und Benefits:

Die identifizierten Energieflexibilität eröffnet nicht nur Einsparpotenziale, sondern auch neue Vermarktungschancen – etwa durch die Teilnahme am Intraday-Markt oder die Bereitstellung von Regelenergie. Zusätzlich stärken sie die Versorgungssicherheit, reduzieren Lastspitzen und verbessern die CO₂-Bilanz – ein klarer Wettbewerbsvorteil in Richtung nachhaltiger Industrie.

Befähigung und Bewertung eines energieflexiblen Energiesystems in der Lebensmittel-industrie

Kurzcharakterisierung

Die Molkerei Zott mit Hauptsitz in Mertingen zählt zu den führenden Unternehmen der deutschen Lebensmittelindustrie. Zott fungiert im Kopernikus-Projekts „SynErgie“ als industrieller Demonstrator für die Region Augsburg.

Energieflexibilität und Befähigung

Am Standort Mertingen wird das bestehende Energiesystem der Molkerei dahingehend weiterentwickelt, dass es zur Energieflexibilitätsbereitstellung befähigt wird. Im Zentrum steht dabei die Integration eines intelligenten EFMS, das eine koordinierte Steuerung von Energieerzeugern, -speichern und -verbrauchern erlaubt. Ziel ist es, den Betrieb des Energiesystems flexibel an schwankende Verfügbarkeiten von Wärme und Strom – insbesondere aus erneuerbaren Quellen – anzupassen und dabei gleichzeitig die hohen Anforderungen der milchverarbeitenden Prozesse zu erfüllen.

Die Identifikation und Bewertung geeigneter Energieflexibilitätsmaßnahmen erfolgt unter Berücksichtigung technischer, wirtschaftlicher und betrieblicher Rahmenbedingungen. Relevante Einflussfaktoren sind unter anderem:

- die Produktionskapazitäten der Anlagen,
- saisonale Schwankungen bei der Milchanlieferung,
- Lagerkapazitäten für Rohstoffe und Fertigprodukte,
- sowie prozesstechnische Einschränkungen hinsichtlich Temperaturführung, Hygiene und Produktqualität.

Kurzfristige Leistungsanpassungen – beispielsweise durch das Abschalten einzelner Anlagen – sind grundsätzlich technisch möglich, erfordern jedoch in der Regel längere Wiederanfahrzeiten und können die Produktqualität sowie die Prozessstabilität negativ beeinflussen. Daher müssen potenzielle Flexibilitätsmaßnahmen in enger Abstimmung mit den Milchlogistikprozessen, Produktionszyklen und Qualitätsanforderungen entwickelt und implementiert werden.

Die Eignung der Energieflexibilitätsmaßnahmen für den Einsatz in milchwirtschaftlichen Produktionsprozessen wurde gemäß der **VDI-Richtlinie 5207** systematisch analysiert. Die Maßnahmen wurden dabei nach ihrer Relevanz für den Standort Mertingen in die Kategorien **hoch**, **mittel**, **gering** und **nicht anwendbar** klassifiziert. Diese Einordnung bildet die Grundlage für die weitere technische und wirtschaftliche Bewertung sowie für die Entwicklung konkreter Umsetzungsstrategien.

Vermarktung und Benefits

Durch die gezielte Anpassung des Energieverbrauchs an Zeiten mit günstigen Strompreisen oder hoher Verfügbarkeit erneuerbarer Energien können signifikante Einsparungen bei den Energiekosten erzielt werden. Gleichzeitig ermöglicht die Teilnahme an Flexibilitätsmärkten – etwa durch Lastverschiebung oder variable Wärmeerzeugung – zusätzliche Erlöse durch Netzdienstleistungen oder Direktvermarktung.

Gerade in der Milchwirtschaft mit ihren kontinuierlich laufenden Prozessen, Kälte- und Wärmelasten sowie hohem Energiebedarf bieten sich vielfältige Potenziale, die ohne eine Beeinträchtigung der Produktqualität oder der Versorgungssicherheit gehoben werden können. Energieflexibilität erhöht zudem die Resilienz gegenüber steigenden Energiepreisen sowie regulatorischen Anforderungen und positioniert die Molkerei als zukunftsfähiges, nachhaltig wirtschaftendes Unternehmen in einem zunehmend CO₂-regulierten Marktumfeld.

5.3. Anwendungen in Quartieren

Unternehmensübergreifende Energieflexibilität in der Wärmeversorgung des Stadtbach Industriequartiers Augsburg

Kurzcharakterisierung

Das Stadtbach-Industriequartier ist eines der bedeutendsten Industriequartiere der Modellregion Augsburg und beherbergt namhafte Unternehmen wie Everllence (ehemals MAN Energy Solutions), UPM, MT Aerospace und manroland Goss web systems. Insbesondere UPM ist zudem ein wichtiger Partner im Kopernikus-Projekt SynErgie. Aufgrund der hohen Energie- und CO₂-Intensität der ansässigen Unternehmen und ihrer Produktionsstätten ist das „Stadtbach-Industriequartier“ für das SynErgie-Projekt von besonderer Bedeutung. Im Zuge des SynErgie-Projektes wird an der Entwicklung einer Roadmap für eine weitestgehend strombasierte, klimaneutrale Wärmeversorgung der energieintensiven Industrie gearbeitet. Vor diesem Hintergrund sind die Stadtwerke Augsburg als Versorgungsunternehmen und Netzbetreiber ein wichtiger Akteur sowie Projektpartner.

Energieflexibilität und Befähigung

Aktuell lassen sich die gehobenen Energieflexibilitätspotenziale im Stadtbach-Industriequartier vorrangig bei UPM Augsburg verorten. Der enorme Strom- und Wärmebedarf des Papierherstellungsprozesses war Ausgangspunkt für eine zunehmende Flexibilisierung der Energienutzung und -bereitstellung. In diesem Zuge wurden verschiedenste Flexibilitätspotenziale sowohl in der Halbstoff- als auch der Papierproduktion identifiziert und gehoben. Eine zeitliche Flexibilisierung der Halbstoffproduktion, kann durch die Zwischenspeicherung von Halbstoff in Büttensilos und die daraus folgende zeitliche Entkopplung von Halbstoff- und Papierproduktion erreicht werden. Die (begrenzte) Substituierbarkeit von Primär- und Sekundärfasern stellt, aufgrund der unterschiedlichen spezifischen Energiebedarfe, eine weitere Flexibilität dar. Neben der auslastungs- und kundenabhängigen Flexibilisierbarkeit von Anlaufphasen und Produktionsbetrieb der Papiermaschine, hat UPM Augsburg ein System zur bivalenten Wärmeversorgung umgesetzt. Der erhebliche Wärmebedarf für die Papiertrocknung wird in Zeiten günstiger Intraday-Strompreise von einem Elektrodendampfkessel anstelle mehrerer Gaskessel bereitgestellt werden.

Zukünftige Maßnahmen zur Elektrifizierung und Flexibilisierung der Wärmeversorgung durch die Kombination und quartiersübergreifende Integration unterschiedlicher Wärmequellen und -bereitstellungstechnologien werden in Zusammenarbeit mit Projektpartnern entwickelt. In diesem Zuge soll unvermeidbare Abwärme der Industrieunternehmen in das Fernwärmenetz eingespeist werden können, während Fernwärme als weitere Wärmequelle neben eigenerzeugter Wärme aus Verbrennungs- oder Power-to-Heat-Anlagen erschlossen werden kann. Diese Bi- und Multivalenz in der Wärmeversorgung eröffnet sowohl bei Unternehmen als auch Fernwärmeversorgern neue Flexibilitätspotenziale mit wesentlicher Wirkkraft auf das Stromsystem. Die geplante Integration eines Großwärmespeichers im Quartiersgebiet kann nicht nur die Kappung von Lastspitzen und infolgedessen die Reduktion der vorgehaltenen Kraftwerkskapazität unterstützen, sondern auch in gewissem Umfang zur saisonalen Entkopplung von Wärmeangebot und – nachfrage beitragen.

Die technische Befähigung erfordert den Aufbau notwendiger Infrastruktur für die Erzeugung, Speicherung und Übertragung von Wärme sowie einer IT-Architektur zur unternehmensinternen sowie -übergreifenden Kommunikation und Steuerung der Wärmebereitstellung. Eine quartiersweite Plattform könnte außerdem Abwärmeströme erfassen, bewerten und mit dynamischen Preisbildungsmechanismen verknüpfen, um wirtschaftliche Anreize für Unternehmen zu schaffen.

Vermarktung und Benefits

Die Anbindung an eine MP eröffnet verschiedene Vermarktungsoptionen. Prognosedienste, Flexibilitätseinsatzplanungstools und Aggregatordienste können Markteintrittshürden senken und Unternehmen bei der Entwicklung optimaler Vermarktungsstrategien unterstützen. Die monetären Vorteile der Vermarktung sind erheblich. Flexible Lasten können in Zeiten niedriger Preise gesteuert werden, was zu Kosteneinsparungen führt. Im Rahmen einer multivalenten Wärmebereitstellung können insbesondere in solchen Perioden Elektrodenkessel und Wärmepumpen zur Wärmeerzeugung genutzt werden. Aufgrund der positiven Korrelation zwischen Spotmarktpreisen und Emissionen der Stromerzeugung führt eine marktorientierte Laststeuerung in gewissem Maße gleichzeitig zu einer Reduktion der Scope-2-Emissionen. Die zunehmende Elektrifizierung der Wär-

meerzeugung durch den Betrieb flexibler strombasierter Wärmebereitstellungstechnologien ermöglicht nicht nur die Reduktion fossiler Brennstoffe und Emissionen und eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit, sondern fördert die Integration unregelmäßiger Abwärmeströme. Die ökonomisch-ökologischen Benefits einer Flexibilisierung von Energiebereitstellung und -verbrauch im Stadt-bach-Industriequartier können sich perspektivisch auf weitere Unternehmen des Quartiers übertragen lassen.

Umsetzung eines nachhaltigen FlexQuartiers zur Bündelung des Energieflexibilitätspotenzials

Kurzcharakterisierung

Das FlexQuartier ist eines der bedeutendsten Industriequartiere in der Region Memmingen und beherbergt namhafte Unternehmen wie Alois Müller, CB-Tex und DPD. Die Unternehmen sind bereits über ein gemeinsames Wärmenetz miteinander verbunden. Im Zuge des SynErgie-Projektes werden weitere gemeinsame Flexibilitätspotenziale aufgedeckt, ausgearbeitet und umgesetzt. Vor diesem Hintergrund ist Alois Müller Group als Versorgungsunternehmen und als Netzbetreiber ein wichtiger Akteur sowie Projektpartner.

Energieflexibilität und Befähigung

FlexQuartiere sind Gruppen von Unternehmen, die aufgrund spezifischer Besonderheiten, wie z.B. einer engen geographischen Lage, ihre Energieflexibilitätskapazitäten gemeinsam auf Energieflexibilitätsmärkten anbieten können. Ziel ist es, ein integriertes FlexQuartier mit einer ESP umzusetzen, diese Lösung zu testen und die Auswirkungen zu untersuchen, die sie auf den Energieflexibilitätsmärkten der Zukunft haben könnten. Darüberhinaus werden die ökologischen und ökonomischen Vorteile, die diese Aggregation für Industrieunternehmen bietet, analysiert. Die Integration der Energiemanagementsysteme der Unternehmen Alois Müller, CB-tec und DPD kann aufgrund ihrer fokussierten geografischen Lage und der Integration der verschiedenen Energiesysteme inklusive regenerativer Eigenerzeugungsanlagen zur Validierung des Konzepts des energieflexiblen und nachhaltigen Industriequartiers "FlexQuartier" dienen. Die Implementation des FlexQuartier geschieht unter Betrachtung aktueller und zukünftiger regulatorischer Rahmenbedingungen. Dazu sollen neben der Umsetzung von identifizierten Energieflexibilitätsmaßnahmen in verschiedenen Stufen, digitale Systeme (ESP) zur optimierten Nutzung entwickelt werden, welche die Entscheidungsfindung bei der Aktivierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen unterstützen sollen. Dazu sollen Anforderungsanalysen an die jeweiligen Systeme erstellt sowie Schnittstellen und Energieflexibilitätsmaßnahmen identifiziert werden. Auf Basis der erhobenen Daten können die Systeme entwickelt und validiert werden, wodurch die Einbindung und Umsetzung des Vorhabens sichergestellt wird.

Vermarktung und Benefits

Die Erstellung und Bündelung von Flexibilitätspotenzialen eröffnet verschiedene Vermarktungsoptionen. Flexibilitätseinsatzplanungstools und Aggregatordienste können Unternehmen bei der Entwicklung optimaler Vermarktungsstrategien unterstützen. FlexQuartiere mit ESP haben ökonomische und ökologische Vorteile. Die Bündelung von Potenzialen senkt die Markteintrittshürden aufgrund der größeren Leistungen z.B. für Regelenergie. Zudem können flexible Lasten in Zeiten niedriger Preise oder hohen Eigenstromerzeugung betrieben werden, was zu Kosteneinsparungen

führt. Als Beispiel soll die gemeinsame Steuerung von Lasten entsprechend der PV-Stromerzeugung im Quartier dienen. Die Lasten werden je nach Verfügbarkeit des PV-Stroms betrieben, um die Eigennutzung zu erhöhen. Neben den ökonomischen Vorteilen führt die gesteigerte Nutzung von PV-Strom so auch zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Die Regulatorik ist die größte Hürde für das Quartier. Eine direkte Verbindung der Stromnetze der einzelnen Firmen ist nicht gegeben. Der Austausch von Strom ist daher nur über das öffentliche Netz mit den inhärenten Kosten von diesem möglich. Aktuell wird an Lösungen gearbeitet, um diese Hürden zu überwinden. Die ökonomisch-ökologischen Benefits eines FlexQuartiers können sich perspektivisch auf weitere Quartiere übertragen lassen.

(Hypothetische) Anwendung der ESP in SWA-Quartieren

Kurzcharakterisierung

Abseits der industriellen Anwendungsmöglichkeiten der ESP soll im folgenden Beispiel veranschaulicht werden, dass eine solche Plattform darüber hinaus weitere Einsatzpotenziale eröffnet. In der Modellregion Augsburg werden auch verschiedene Mischquartiere auf Flexibilitätspotenziale untersucht. Eines dieser Quartiere ist das Quartier Hochzoll-Mitte im Osten der Stadt Augsburg. Das Quartier ist überwiegend durch diverse Geschäfte des täglichen Bedarfs charakterisiert. Der Wärmeverbrauch des Quartiers wird durch ein wärmegeführtes Blockheizkraftwerk (BHKW) mit integriertem Warmwasser-Pufferspeicher gewährleistet, welcher ausschließlich zum Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch verwendet wird. Dabei wird die maximale Leistungskapazität des BHKWs nur selten vollständig ausgeschöpft. In einem hypothetischen Flexibilitätsszenario könnte der Warmwasser-Pufferspeicher des BHKW genutzt werden, um Flexibilität bereitzustellen. Der Speicher erlaubt es, Wärme zeitlich entkoppelt vom Betrieb des BHKW bereitzustellen, wodurch das BHKW flexibel auf Preissignale oder Netzanforderungen reagieren kann. Zusätzlich könnte überschüssig erzeugter Strom ins Netz eingespeist oder lokal genutzt werden.

Energieflexibilität und Befähigung

Eine ESP, welche auch Gewerbe und Wohnquartiere miteinbezieht, kann solchen Quartieren zahlreiche neue Möglichkeiten eröffnen, indem sie die Voraussetzungen für die Nutzung von Energieflexibilität bereitstellt. BHKWs, Wärmepumpen, Gasheizungen und weitere Systeme können über eine für Quartiere angepasste „Unternehmensplattform“ eingebunden werden, um ihre Betriebsdaten zu erfassen und auszuwerten. In Verbindung mit der MP wird eine präzise Steuerung auf Basis aktueller Netz- oder Marktsignale ermöglicht. Daraus entsteht die Möglichkeit eines Zugangs zu diversen neuen Märkten.

Auf technologischer Seite bedarf es einer Anpassung der Unternehmensplattform auf die Anwendung in Wohn- und Gewerbequartieren. Diese neu geschaffene Plattform soll es ermöglichen, verschiedene Anlagen, wie Wärmepumpen, Gasheizungen und BHKWs, systemübergreifend zu steuern, deren Flexibilität zu bewerten und anzubieten. Die Plattform soll mithilfe einer vorgegebenen Anwendungslogik die automatisierte Steuerung der verschiedenen Systeme in den einzelnen Quartieren ermöglichen.

Vermarktung & Benefits

Die ESP eröffnet Wohn- und Gewerbequartieren vielfältige Möglichkeiten, ihre Energieflexibilität wirtschaftlich zu nutzen. Eine davon ist die Teilnahme am Regelenenergiemarkt, wo die Flexibilität der Quartiere eingesetzt werden kann, um Netzschwankungen auszugleichen und Einnahmen zu generieren. Darüber hinaus können Quartiere Strom über regionale Märkte handeln oder durch Direktvermarktung zusätzliche Erlöse erzielen.

Durch die Erweiterung der ESP auf Wohn- und Gewerbequartiere können eine Vielzahl an Vorteilen entstehen. Wirtschaftlich ermöglicht sie Einsparungen durch optimierten Energieeinsatz sowie zusätzliche Einnahmen aus der Vermarktung von Flexibilität. Gleichzeitig trägt sie ökologisch zur CO₂-Reduktion bei, da erneuerbare Energien besser integriert und fossile Brennstoffe minimiert werden. Insgesamt wird so der Weg zu nachhaltigeren und wirtschaftlich attraktiveren Quartieren geebnet.

6. Fazit

Mit der Entwicklung der ESP wurden Rahmenbedingungen, Architektur- und Datenmodelle, standardisierte Schnittstellen, Rollen- und Stakeholderstrukturen sowie Sicherheitsanforderungen für den automatisierten Energieflexibilitätshandel von der Maschine bis zu den Vermarktungsservices festgelegt. Insbesondere wesentliche Bestandteile der UP, wie beispielsweise energetische Optimierungsservices, sind bereits erfolgreich in der Praxis erprobt und leisten einen wesentlichen Beitrag zu unternehmerischen Kosten- und Emissionseinsparungen.

Das EFDM bildet die Basis für die ökonomische und langfristige Erschließung unterschiedlicher Flexibilitätspotenziale. Das standardisierte Modell verbessert den Informationsaustausch, erleichtert den Zugang zu digitalen Energiedienstleistungen und fördert die Weiterentwicklung von Plattform-Ökosystemen. Bei der Umsetzung einer UP ist zwingend die Referenzarchitektur zu beachten. Bei der Umsetzung einer Unternehmensplattform auf Basis einer bestehenden IIoT Plattform ist zusätzlich der Leitfaden (s.o.) empfehlenswert. Allerdings erlauben der modulare Aufbau und die standardisierten Komponenten der ESP eine bedarfsgerechte Anpassung des Umfangs der Implementierung. Die Erkenntnisse aus der Entwicklung sind in verschiedene Standardisierungsprozesse eingeflossen und sichern so die Zukunftsfähigkeit des Plattformkonzepts. Die Anwendbarkeit wurde in mittelständischen Unternehmen, der energieintensiven Industrie und in Quartieren nachgewiesen.

Damit stellt die ESP ein zentrales Ergebnis des Kopernikus-Projekts SynErgie dar.

7. Literaturverzeichnis

- Bauernhansl, T., Sauer, A., & Kaymakci, C. (2021). *Demonstratoren der Energiesynchronisationsplattform*. <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642373>
- Buhl, H. U., Duda, S., & Schott, P. (2021). *Energieflexibilitätsdatenmodell der Energiesynchronisationsplattform*. <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642370>
- Fraunhofer IPA. (2022). *Energiesynchronisationsplattform – Energieflexibilität nutzen und zur Energiewende beitragen* [youtube.com]. <https://www.youtube.com/watch?v=rPhHICR6TEc>
- Fridgen, G., Potenciano Menci, S., & van Stiphoudt, C. (2021). *Referenzarchitektur der Energiesynchronisationsplattform*. <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642369>
- Industrial Digital Twin Association (October 2024). *Specification of the Asset Administration Shell – Part 2: Application Programming Interfaces (Version 3.0.3)* (IDTA Number: 01002-3-0-3). <https://industrialdigitaltwin.org/en/?specificationpapers=specification-of-the-asset-administration-shell-part-2-application-programming-interfaces-idta-number-01002-3-0-3&utm>
- Kopernikus-Projekt SynErgie. (2025, January 21). *Leitfaden für die Umsetzung energieflexibler IIoT-Plattformen – Schritt für Schritt von der eigenen IIoT-Plattform zur energieflexiblen SynErgie-Unternehmensplattform* [Press release]. <https://synergie-projekt.de/news/leitfaden-fuer-die-umsetzung-energieflexibler-iiot-plattformen>
- Kramer, L., Magin, J., Zangenberg, J., Zaun, M., & Weigold, M. (2025). *Energy-flexible operation of a cleaning machine through mathematical optimization*.
- Leitfaden zur Energiesynchronisationsplattform: Version 1.0.* (2022). <https://synergie-projekt.de/wp-content/uploads/2020/08/SynErgie-ESP-Leitfaden.pdf>
- Oeder, A., Winter, C., & Ahrens, R. (Mai 2022). *Security-Guide*. <https://synergie-projekt.de/wp-content/uploads/2020/08/SynErgie-Security-Guide.pdf>
- Reinhart, G., Bank, L., Brugger, M., Roth, S., Simon, P., Bauernhansl, T., Bauer, D., Colangelo, E., Eigenbrod, H., Grigorjan, A., Pfeilsticker, L., Schel, D., Schulz, F., Fridgen, G., Hering, F., Keller, R., Schott, P., Jarke, M., Ahrens, R., . . . Meyer, B. (2018). *Konzeption Der Energiesynchronisationsplattform*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1412977>
- Rögner, F.-H., & Pfeilschifter, M. (2021). *Markt- und Trendanalyse in der industriellen Teilereinigung 2020*.
- Ronge, K., Oeder, A., & Schimmelpfennig, J. (2021). *IT-Sicherheit der Energiesynchronisationsplattform*. <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642372>
- Sauer, A., Abele, E., & Buhl, H. U. (Eds.). (2019). *Energieflexibilität in der deutschen Industrie / Alexander Sauer, Eberhard Abele, Hans Ulrich Buhl: Vol. 1. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt: Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie)*. Fraunhofer Verlag.
- Sauer, A., Buhl, H. U., Mitsos, A., & Weigold, M. (Eds.). (2022). *Energieflexibilität in der deutschen Industrie: Band 2: Markt- und Stromsystem, Managementsysteme und Technologien energieflexibler Fabriken*. Fraunhofer Verlag; Fraunhofer-Gesellschaft. <https://doi.org/10.24406/publica-258>
- Schilp, J., Bank, L., & Köberlein, J. (2021a). *Executive Summary: Konzept der Energiesynchronisationsplattform – Diskussionspapiere*. <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642368>

- Schilp, J., Bank, L., & Köberlein, J. (2021b). *Optimierung auf der Energiesynchronisationsplattform*. <https://doi.org/10.24406/IGCV-N-642371>
- van Stiphoudt, C., Potenciano Menci, S., Kaymakci, C., Wenninger, S., Bauer, D., Duda, S., Fridgen, G., & Sauer, A. (2025). The Energy Synchronization Platform concept in the model region Augsburg to enable and streamline automated industrial demand response. *Applied Energy*, 388, 125455. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125455>
- VDI (September 2023). *Energieflexible Fabrik; IT-Infrastruktur zum Betrieb energieflexibler Fabriken* (VDI 5207).

Autor:innen

Vincent Kalchschmid (Koordination)

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

Kontakt: vincent.kalchschmid@igcv.fraunhofer.de

Andreas Schlereth

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Kontakt: andreas.schlereth@ipa.fraunhofer.de

Matthias Stöhr

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Kontakt: matthias.stoehr@ipa.fraunhofer.de

Robin Ziegler

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Kontakt: robin.dominic.ziegler@ipa.fraunhofer.de

Dachuan Shi

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Kontakt: dachuan.shi@ipa.fraunhofer.de

Olga Meyer

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Kontakt: olga.meyer@ipa.fraunhofer.de

Robert Förster

FIM Forschungsinstitut für Informationsmanagement
Institutsteil Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT

Kontakt: robert.foerster@fim-rc.de

Fabian Probst

FIM Forschungsinstitut für Informationsmanagement
Institutsteil Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT

Kontakt: fabian.probst@fim-rc.de

Niklas Eiser

FIM Forschungsinstitut für Informationsmanagement
Institutsteil Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT

Kontakt: niklas.eiser@fim-rc.de

Moritz Rindermann

FIM Forschungsinstitut für Informationsmanagement
Institutsteil Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT

Kontakt: moritz.rindermann@fim-rc.de

Simon Rusche

FIM Forschungsinstitut für Informationsmanagement
Institutsteil Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT

Kontakt: simon.rusche@fim-rc.de

Tobias Koch

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

Kontakt: t.koch@ptw.tu-darmstadt.de

Lina Kramer

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

Kontakt: l.kramer@PTW.TU-Darmstadt.de

Jens Schimmelpfennig

Software GmbH

Kontakt: kopernikus-synergie@eep.uni-stuttgart.de

Christian Winter

Software GmbH

Kontakt: kopernikus-synergie@eep.uni-stuttgart.de

Elisa Drießen

GFT Software Solutions GmbH

Kontakt: elisa.driessen@gft.com

Tobias Birkle

GFT Software Solutions GmbH

Kontakt: tobias.birkle@gft.com

Robert Tordy

Virtual Fort Knox AG

Kontakt: robert.tordy@virtualfortknox.de

Koordinierungsstelle des Kopernikus-Projekts SynErgie

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer

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

Kontakt: alexander.sauer@ipa.fraunhofer.de | Tel. +49 711 970 3600

Dr.-Ing. Can Kaymakci

Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP), Universität Stuttgart

Kontakt: kopernikus-synergie@eep.uni-stuttgart.de | Tel. +49 711 970 1241

