



Vorhaben	idFlexNetz
	Schaffung eines IKT-Ökosystems für Vorhersage- und Betriebsmodelle für den netzdienlichen Betrieb steuerbarer Verbraucher und Erzeuger
Titel	Abschlussbericht
Förderkennzeichen	03EI6067A-E
Zuwendungsempfänger	VSE Aktiengesellschaft, Heinrich-Böcking-Straße 10-14, 66121 Saarbrücken
Ausführende Stelle	VSE AG, OE U S
Projektleiter	Alexander Schalk
Bewilligungszeitraum	01.05.2022 – 31.10.2025
Autoren	Dr. Boris Brandherm, Kai Krämer, Thomas Achim Schmeier (DFKI GmbH); Luisa Altmeier, Selina Huwig (energis-Netzgesellschaft mbH); Anna-Lena Peh, Dr. Daniel Rohrbach, Martin Rudolph, Juliane Sauerbrey, Oliver Warweg (Fraunhofer IOSB-AST); Anne Kesselring, Dr. Marian Klobasa (Fraunhofer ISI); Simon Bauer, Frederique Enginger, Stefan Kilb (Schneider Electric); Dr. Carsten Stöcker (Spherity GmbH); Dr. Ralf Derr, Michelle McCarty, Harry Moser, Alexander Schalk (VSE AG); David Thinnes (VSE Verteilnetz)
Erstellungsdatum	30.04.2026

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03EI6067A-E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Einleitung	12
2 Managementzusammenfassung	13
3 AP1 – Einführung und Abstract	14
3.1 Ausgangssituation und Motivation	14
3.2 Gesamtziel des Vorhabens	14
3.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele	15
3.4 Bezug zu förderpolitischen Zielen	16
3.5 Projektstruktur und Arbeitspakete	16
3.6 Zusammenfassung	18
4 AP2 – Anforderungsanalyse	19
4.1 Projektübersicht	19
4.2 Anwendungsfälle	20
4.2.1 PV-Anlage	21
4.2.2 Wärmepumpe	24
4.2.3 Ladesäule/Wallbox	25
4.2.4 Leistungsschalter	25
4.2.5 Digitale Ortsnetzstation inklusive Transformator	27
4.3 Beschreibung der Anforderungen	28
4.3.1 Identitätsframework	28
4.3.2 Ontologien und Key Performance Indikatoren	30
4.3.3 Einfaches Auffinden von Algorithmen und digitalen Zwillingen über den Marktplatz	31
4.3.4 CIM-Konformität	32
4.3.5 Kommunikation von Daten in Legacy-Formaten über den Marktplatz	32
4.3.6 Empfang von Ontologie-annotierten Daten und Überführung in Legacy-Formate	32
4.3.7 Beschreibung einer Prognose	32
4.3.8 Bewertung digitaler Güter	32
4.3.9 Einfaches Integrieren / Andocken von Ressourcen (Gütern)	32
4.3.10 Konvertierung zwischen verschiedenen Beschreibungsformen der gewählten Ontologie	32
4.3.11 Beschreibung / Annotation von Algorithmen eines digitalen Zwillings	33
4.3.12 Digitale Zwillinge	33
4.3.13 Marktplätze – Aktueller Stand	34
5 AP3 – Konzeption	37
5.1 Einleitung	37
5.2 Konzeptionelle Grundlagen	38

5.2.1	Zielbild und Leitprinzipien	38
5.2.2	Fachliches Objektmodell und Rollen	39
5.2.3	Identitäts-, Vertrauens- und Governance-Modell	40
5.2.4	Semantik, Datenmodelle und Bewertungslogik	42
5.3	Architektur	46
5.3.1	Mehrschichtige Architektur	46
5.3.2	Kernprozesse im Datenraum	46
5.3.3	Architektur für die priorisierten Anwendungsfälle	47
5.3.4	Sicherheits-, Betriebs- und Integrationsaspekte	48
5.4	Technologische Bausteine	49
5.4.1	Datenraum-Konnektoren und Protokolle	49
5.4.2	Digitale Zwillinge mit AAS und BaSyx	49
5.4.3	Semantische Mappings mit OEO, CIM/CGMES und JSON-LD	50
5.4.4	Wallets, DIDs, VCs und European Business Wallet	51
5.4.5	Domänensysteme und prototypische Realisierungsbausteine	52
5.4.6	Katalog, Suche und Auswahlassistenz	53
5.5	Zusammenfassung	54
6	AP4 – Umsetzung	57
6.1	IKT-Ökosystem	57
6.1.1	Gaia-X und IDS für das IKT-Ökosystem	57
6.1.2	Dezentrale Identitäten für das IKT-Ökosystem	59
6.2	Architektur des IKT-Ökosystems	62
6.2.1	MVD Digitaler Zwilling Energie	62
6.2.2	Identitätsframework für das IKT-Ökosystem	64
6.2.3	Kopplung von Modellen und Algorithmen mit einem digitalen Zwilling	65
6.2.4	Notwendige Schnittstellen zur prototypischen Realisierung des IKT-Ökosystems	67
6.2.5	Weitere Schnittstellen zur prototypischen Realisierung des IKT-Ökosystems	70
6.2.6	Assistenzsystem zur Auswahl der Vorhersagekomponente	72
6.2.7	Scoring-Verfahren, Metriken und Bewertungsverfahren für Prognosen	75
6.3	Umsetzung der digitalen Güter	76
6.3.1	Schnittstellen zur Interoperabilität und Portabilität digitaler Güter für den Netzbetrieb	76
6.3.2	Abbildung von Anwendungen, Geräten, Modellen und digitalen Zwillingen mittels digitaler Identitäten	76
6.3.3	Implementierung der digitalen Zwillinge als digitale Güter	76
6.3.4	Beschreibung digitaler Güter über KPIs	85
6.3.5	Beschreibungssprache und Ontologie für digitale Güter, Scoring, Metrik und Bewertungsmethoden	87
6.3.6	Konzeption und Entwicklung einer Beschreibungssprache und Ontologie für Scoring, Metrik und digitale Güter	89
6.4	Integration der Teilsysteme	91
6.4.1	Aufbau Testsystem	91
6.4.2	Integration in das FhG-Testsystem	91
6.4.3	Integration des DFKI-Teilsystems in das Testsystem	92
6.4.4	Monitoring des Testsystems	93

6.4.5	Ökonomische Bewertung von Prozessen für Konsumenten und Produzenten der Modelle	93
7	AP5 – Erprobung	98
7.1	Einleitung	98
7.2	Design	98
7.3	Cyber-physische Systeme	114
7.4	Integration	118
7.5	Zusammenfassung und Empfehlungen	120
8	Wirtschaftliche Betrachtung	122
8.1	Geschäftsmodelle und Wertschöpfung	122
8.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	122
8.3	Verwertungsstrategien	123
9	AP6 – Ausblick	124
9.1	Herstellung der Allgemeingültigkeit der Ergebnisse	124
9.2	Wissens- und Ergebnistransfer	127
10	Abschließende Zusammenfassung	130
11	Glossar	131
	Literaturverzeichnis	134

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Integration von Anwendungen mit dezentralem Marktplatz für Modelle und Geräte.....	20
Abbildung 2: Beziehungen cyber-physischer Assets	21
Abbildung 3: Sequenzdiagramm „PV-Anlage (<100 kW)“	23
Abbildung 4: Sequenzdiagramm „PV-Prognose“	24
Abbildung 5: Sequenzdiagramm „Wärmepumpe“	25
Abbildung 6: Sequenzdiagramm „Leistungsschalter“	27
Abbildung 7: Ökosystem eines Datenmarktplatzes und seine Stakeholder	35
Abbildung 8: Anwendungsfälle für die Demonstration im Gesamtkonzept.....	37
Abbildung 9: Überprüfung von Vertrauensketten auf der Kontroll- und Datenebene	41
Abbildung 10: Konzeption vom Asset zum Datenmodell.....	43
Abbildung 11: Anwendungsfall PV-Anlage – Digitale Zwillinge der typischen Komponenten im Ortsnetz vereinfachen Netzplanung und Genehmigungsprozesse.....	43
Abbildung 12: Beispiel Use-Case PV-Anlage für den Anwendungsfall Messwerte & Prognose. Komponenten zur Interaktion über den idFlexNetz-Datenraum.	48
Abbildung 13: OEO-annotierte Prognose für eine Einzel; auf Dach PV-Anlage.....	51
Abbildung 14: Wallet-basierte Architektur mit Identität als Basisbaustein des Datenraums	52
Abbildung 15: Vorhersagealgorithmus als Graph in der erweiterten Open Energy Ontology mit Eingabe- und Ausgabedaten	53
Abbildung 16: Datenraum mit seinen Elementen und zwei der über Konnektoren verbundenen Elemente im Zusammenspiel mit dem Marktplatz.....	54
Abbildung 17: Industriebatterie als digitales Gut mit Elementen der Vertrauensinfrastruktur sowie Autorisierungs- und Herkunftsnachweisen	55
Abbildung 18: Prototyp eines digitalen Produktpasses für eine unterbrechungsfreie Stromversorgung	56
Abbildung 19: Das IKT-Ökosystem des Projekts idFlexNetz ist eine heterogene Systemlandschaft	58
Abbildung 20: Übersicht-Schaubild. Integration aller Komponenten zur Umsetzung der ausgewählten Anwendungsfälle in den Datenraum.	58
Abbildung 21: Vernetzte Identitätsökosysteme: Vertikale Trust-Domains (grün) sind branchenspezifisch, während horizontale Trust-Domains (blau) übergreifende Identitätslösungen wie die European Business Wallet bieten. idFlexNetz verbindet vertikale und horizontale Strukturen.	60
Abbildung 22: Architektur des Anwendungsfalls der digitalen Zwillinge.....	62
Abbildung 23: Sequenzdiagramm zur Implementierung des Austauschs digitaler Zwillinge über den Datenraum. Farben symbolisieren die verschiedenen Services. Grün: EDC-Datenraum-Konnektoren mit Erweiterung. Grau: unabhängige Services als Schnittstelle zur Kommunikation mit dem Backend.	

Blau: Die Backend-Systeme. (*) Rolle nach IDS-RAM 4; (#) Eclipse Dataspace Connector (EDC) mit PowerFactory-Erweiterung, (~) Eclipse Dataspace Connector (EDC) mit AAS-Erweiterung	63
Abbildung 24: Unterscheidung Bereitstellung Angebotsinformationen und transferierte Daten (angebotene Daten).....	66
Abbildung 25: Architektur des Anwendungsfalls Messwertzeitreihenaustausch	66
Abbildung 26: Das Sequenzdiagramm zeigt die Implementierung der Messwertzeitreihen. Die Farben symbolisieren die verschiedenen Services. Grün: EDC-Datenraum-Konnektoren mit Erweiterung. Grau: unabhängige Services als Schnittstelle zur Kommunikation mit dem Backend. Blau: Das Backend-System. (*) Rolle gemäß IDS-RAM 4; (#) EDC mit PowerFactory-Erweiterung	67
Abbildung 27: Architektur des Anwendungsfalls Messwertzeitreihenaustausch – Prognosebereitstellung.....	67
Abbildung 28: Semantische Mappings innerhalb der EDC-Erweiterung für die semantische Integration von heterogenen Systemen in das Datenökosystem Energiedatenraum	68
Abbildung 29: Beispielhafte Benutzeroberfläche eines digitalen Marktplatzes mit Haupt- und Unterkategorien.....	69
Abbildung 30: Detaillierte Darstellung eines Assets mit technischen Daten und digitalem Zwilling.	69
Abbildung 31: Übersicht über im Betrieb befindliche Netzkomponenten.....	70
Abbildung 32: Mittels der Asset-ID können die Assets im EDC gezielt gesucht und nach einer Verhandlung ausgetauscht werden.	71
Abbildung 33: Reiter „Capabilities Overview“ mit Auflistung möglicher Fähigkeiten, die einem digitalen Zwilling zugeordnet werden können.....	71
Abbildung 34: Die einem digitalen Zwilling zugeordneten Fähigkeiten aus unterschiedlichen Kategorien	72
Abbildung 35: Modell	72
Abbildung 36: Integration	73
Abbildung 37: Kontrolle	73
Abbildung 38: Berechnung	73
Abbildung 39: Daten	73
Abbildung 40: Mensch-Maschine-Interaktion	74
Abbildung 41: Beispiel eines digitalen Zwillings für einen industriellen Infrarot-Heizstrahler	74
Abbildung 42: Knowledge Graph, der den zusammenhängenden Graphen einer Entität mit kontextuellen Informationen darstellt.....	75
Abbildung 43: Beispiel eines digitalen Zwillings für einen industriellen Infrarot-Heizstrahler und dessen Score	75
Abbildung 44: UML-Diagramm des Transformer-Modells – CIM – IEC 61970-301	77
Abbildung 45: UML-Diagramm des einfacheren Stufenschalter-Modells – CIM – IEC 61970-301	78
Abbildung 46: AASx-Struktur am Beispiel eines Transformators	79

Abbildung 47: UML-Diagramm des einfacheren Switch-Modells – CIM – IEC 61970-301	79
Abbildung 48: Diagramm der Ringkabelschaltanlage	80
Abbildung 49: AASx-Struktur am Beispiel einer Ringkabelschaltanlage	80
Abbildung 50: AASx-Struktur des Ringkabelschaltanlage-CIM-Submodells per Funktion der Schaltanlage (Beispiel I_Cell_IN1).....	81
Abbildung 51: AASx-Struktur am Beispiel einer Remote Terminal Unit.....	81
Abbildung 52: Einfaches PV-Anlagen-Modell – CIM – IEC 61970-301	82
Abbildung 53: AASx-Struktur am Beispiel einer PV-Anlage.....	82
Abbildung 54: Klassen-Diagramm Metering: MeteringEndDevice – CIM – IEC 61968-11	83
Abbildung 55: AASx-Struktur am Beispiel einer Ladesäule.....	84
Abbildung 56: AASx-Struktur am Beispiel einer Wärmepumpe.....	84
Abbildung 57: Die Asset Administration Shell als Unterklasse in der OpenEnergyOntology	87
Abbildung 58: Digitaler Zwilling (links) als Graph der Ontologie mit (rechts) seiner AAS und deren Submodellen.....	88
Abbildung 59: Übereinstimmung des „Nameplating“ mit dem IDTA- und dem HSU-Template.....	88
Abbildung 60: Neue Fähigkeitsklassen unterteilt in die fünf Hauptgruppen „Computing“, „Control“, „Data“, „Model“ und „Human Machine Interaction“.....	89
Abbildung 61: In der OEO definierte Prognosefehler für die Entity OEO_00010233 („forecast error“).	90
Abbildung 62: Issues, die bereits vom Entwicklungsteam der OEO bearbeitet wurden.....	90
Abbildung 63: Noch offene Issues, die bereits bei der OEO eingegangen sind.	91
Abbildung 64: Virtuelle und physische Maschinenumgebung des Testsystems	92
Abbildung 65: Klassifizierung der Marktteilnehmer und Mehrwerte durch Marktplatzstruktur.....	97
Abbildung 66: Ende-zu-Ende Vertrag und Policy-Flow.....	101
Abbildung 67: Datenfluss innerhalb der MVDs der Use-Cases „Digitaler Zwilling“ und „Vorhersage“	102
Abbildung 68: Datenfluss beim Angebot, bei der Vertragsverhandlung und beim Datentransfer von Messwerten	103
Abbildung 69: Bereitstellung digitaler Zwillinge über die BaSyx-Schnittstellen und die Frontends.....	104
Abbildung 70: Spezifische Angebotserstellung.....	105
Abbildung 71: Grafische Benutzerschnittstelle des EDC – Es werden die Vertragsdefinitionen angezeigt.....	106
Abbildung 72: Dashboard für die Datenkonsumentenseite mit den vollständigen Datentransfers	106
Abbildung 73: Semantik-Mapping Datenfluss.....	107
Abbildung 74: Semantisches Mapping - Expanded Algorithm Flow	107
Abbildung 75: AAS (Typ/Instanz/Identifier (abstrahierte Struktur))	108

Abbildung 76: Testsystem zur Evaluierung des IKT-Ökosystems und zur Risikoabschätzung	109
Abbildung 77: Gegenüberstellung der Ziel-CIM mit ausgewählten AAS.....	110
Abbildung 78: Überblick über die implementierte Architektur des IKT-Ökosystems.....	111
Abbildung 79: Capabilities Overview	113
Abbildung 80: Zeitreihen	114
Abbildung 81: Ontologie als interoperabler Datenknoten für andere Softwaresysteme	119

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Prüfung und Genehmigung einer PV-Anlage	21
Tabelle 2: Integration einer PV-Anlage in operative Tools und laufenden Netzbetrieb	22
Tabelle 3: Verbesserung laufender Netzführung	23
Tabelle 4: Bereitstellung und Nutzung PV-Prognose.....	24
Tabelle 5: Bereitstellung höherwertiger digitaler Zwillinge für Wärmepumpen	24
Tabelle 6: Beschaffung und Integration eines Leistungsschalters.....	25
Tabelle 7: Bereitstellung höherwertiger digitaler Zwillinge für Leistungsschalter	26
Tabelle 8: Beschaffung und Integration einer digitalen Ortsnetzstation.....	27
Tabelle 9: Bereitstellung höherwertiger digitaler Zwillinge für digitale Ortsnetzstationen	28
Tabelle 10: Klassen digitaler Güter, deren Kerninhalt und typische Nutzung im Projektkontext.....	39
Tabelle 11: Benötigte Eingabedaten für die PV-Prognose einer PV-Anlage	44
Tabelle 12: Benötigte Wetterdaten für die PV-Prognose einer PV-Anlage	45
Tabelle 13: Ausgabedaten der PV-Prognose für eine PV-Anlage.....	45
Tabelle 14: Architekturebenen mit Hauptaufgabe und essenziellen Konzeptkomponenten.....	46
Tabelle 15: Anwendungsfall PV-Anlage: notwendige und optionale Daten für Netzbetreiber und Prognoseanbieter	50
Tabelle 16: Die bereitgestellten Managed Identity Wallet-Instanzen und idFlexNetz-Business Partner Number (BPN) für die Projektbeteiligten.....	59
Tabelle 17: Rollenbasiertes Zugriffs- und Sicherheitskonzept.....	76
Tabelle 18: Digitale Zwillinge und ihre Metadaten	84
Tabelle 19: Interoperabilitätstest.....	109

Abkürzungsverzeichnis

AAS – Asset Administration Shell
AASx – Asset Administration Shell Exchange (Dateiformat)
API – Application Programming Interface
AP – Arbeitspaket
B2B – Business-to-Business
BDEW – Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BFO – Basic Formal Ontology
BNetzA – Bundesnetzagentur
BPN – Business Partner Number
CGMES – Common Grid Model Exchange Specification
CIM – Common Information Model
CoC – Code of Conduct
DCP – Dataspace Communication Protocol
DFKI – Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz
DID – Decentralized Identifier
DLT – Distributed Ledger Technology
DSO – Distribution System Operator (Verteilnetzbetreiber)
EDC – Eclipse Dataspace Components / Connector
EDM – Energiedatenmanagement
EEG – Erneuerbare Energien Gesetz
EIDAS – Electronic Identification, Authentication and Trust Services
EIV – Einsatzverantwortlicher
EMS – Energiemanagementsystem
EM-KPI – Energy-Management Key Performance Indicator
EUBW – European Business Wallet
EUDI – European Digital Identity
FhG – Fraunhofer-Gesellschaft
GIS – Geoinformationssystem
IDS – International Data Spaces
IDSA – International Data Spaces Association
IDTA – Industrial Digital Twin Association
IKT – Informations- und Kommunikationstechnologie
IoT – Internet of Things
IT – Informationstechnologie
JSON-LD – JavaScript Object Notation for Linked Data
KPI – Key Performance Indicator
KYC – Know Your Customer
LEI – Legal Entity Identifier
LPID – Legal Person ID
MaStR – Marktstammdatenregister
MAPE – Mean Absolute Percentage Error
MIW – Managed Identity Wallet
MP-ID – Marktpartner-ID
MVD – Minimum Viable Dataspace
NAP – Netzanschlusspunkt
OEM – Original Equipment Manufacturer
OEO – Open Energy Ontology
OPC UA – Open Platform Communications Unified Architecture

OWL – Web Ontology Language
P2P – Peer-to-Peer
PID – Personal Identifier
PKI – Public Key Infrastructure
PV – Photovoltaik
RDF – Resource Description Framework
RD – Redispatch
REST – Representational State Transfer
RMSE – Root Mean Square Error
RMU – Ring Main Unit (Ringkabelschaltanlage)
RTU – Remote Terminal Unit
SAREF – Smart Appliances REference Ontology
SAREF4ENER – SAREF for Energy
SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition
SE – Schneider Electric
SMGW – Smart Meter Gateway
SSN – Semantic Sensor Network Ontology
TLS – Transport Layer Security
TPM – Trusted Platform Module
TÜV – Technischer Überwachungsverein
VC – Verifiable Credential
VDE – Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VNB – Verteilnetzbetreiber
VSE – VSE Aktiengesellschaft
VM – Virtuelle Maschine
W3C – World Wide Web Consortium

1 Einleitung

Das vorliegende Dokument stellt den Abschlussbericht des Vorhabens idFlexNetz dar und wurde zwischen den Jahren 2022 und 2025 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.

Dieser Abschlussbericht folgt dabei dem in der Anlage 1 zum NKBF 98 gegebenen Muster. Der Bericht ist unter Einbindung aller Partner gemeinschaftlich erstellt worden. Die Punkte Erfolgskontrollbericht und Berichtsblatt bzw. Document Control Sheet werden durch gesondert abgegebene Dokumente je Partner erfüllt.

2 Managementzusammenfassung

Das idFlexNetz-Projekt entwickelte ein innovatives IKT-Ökosystem für den souveränen Austausch digitaler Güter im Energiesektor, einschließlich eines Marktplatzes auf Basis von Gaia-X- und IDS-Prinzipien. Digitale Zwillinge und Modelle wurden als handelbare digitale Güter etabliert und deren Identität und Authentizität durch dezentrale Identitäten abgesichert.

Das Projekt folgte einem phasenorientierten Ansatz von der Anforderungsanalyse über die Konzeption und Umsetzung bis zur Evaluation und zum Transfer, mit Fokus auf Umsetzung und Erprobung. Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele umfassen eine Referenzarchitektur für ein IKT-Ökosystem mit Marktplatz, die Integration dezentraler Identitäten, die Modellierung und den Austausch digitaler Zwillinge, Mechanismen zur Zugriffskontrolle, Ansätze zur Qualitätsbewertung digitaler Güter sowie die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle.

Die komplementären Kompetenzen der Partner ermöglichten die Entwicklung eines ganzheitlichen Systems. Die VSE steuerte ihre Expertise im Netzbetrieb und in der Projektkoordination bei. Das DFKI brachte seine Kompetenzen in Künstlicher Intelligenz, Ontologien, Prognosemodellen und digitalen Zwillingen ein. FhG IOSB-AST trug seine Expertise in Dateninteroperabilität und -integration und Energiemanagementsystemen bei. Schneider Electric brachte seine Kompetenzen als Anlagenhersteller und in digitalen Zwillingen ein. Spherity steuerte seine Expertise zu dezentralen Identitäten und zur Blockchain-Technologie bei.

Die Lösungen leisten einen wesentlichen Beitrag zur Bewältigung zentraler Herausforderungen der Energiewende. Ein effizienter und sicherer Datenaustausch ermöglicht Netzbetreibern, ihre Netze besser zu planen und zu betreiben. Anlagenherstellern erschließen sich neue Geschäftsmodelle. Dienstleister können innovative Services anbieten. Die Orientierung an offenen Standards und die Wahrung der Datensouveränität schaffen die Grundlage für eine breite Akzeptanz und Verbreitung der Lösungen, deren Ergebnisse systematisch dokumentiert und disseminiert wurden. Das Projekt setzt förderpolitische Ziele der Bundesregierung im Bereich der Digitalisierung der Energiewende und der europäischen Datenstrategie um.

3 AP1 – Einführung und Abstract

3.1 Ausgangssituation und Motivation

Die Energiewende stellt den deutschen Energiesektor vor fundamentale Herausforderungen. Der zunehmende Anteil dezentraler, volatiler Erzeugungsanlagen aus erneuerbaren Energien erfordert eine grundlegende Transformation der Netzinfrastruktur und der Betriebsführung. Traditionelle Energieversorgungsstrukturen, die auf zentrale Großkraftwerke und unidirektionale Energieflüsse ausgelegt waren, stoßen an ihre Grenzen. Die Integration von Millionen dezentraler Erzeugungsanlagen, Speichersystemen und flexiblen Lasten erfordert neue Konzepte für das Netzmanagement.

3.2 Gesamtziel des Vorhabens

Das übergeordnete Ziel des idFlexNetz-Projektes bestand in der Entwicklung und Erprobung eines IKT-Ökosystems für den souveränen Austausch digitaler Güter im Energiesektor. Dieses Ökosystem sollte als Energiedatenraum konzipiert werden, der auf offenen Standards basiert und die Interoperabilität zwischen verschiedenen Systemen und Akteuren gewährleistet. Im Zentrum standen die Vision, Modelle und digitale Zwillinge als eigenständige digitale Güter zu etablieren, die mit dezentralen Identifikatoren versehen sind und deren Authentizität kryptographisch nachgewiesen werden kann.

Ein zentrales Teilziel war die Schaffung einer technischen Infrastruktur, die den Anforderungen an Datensouveränität, Datenschutz und IT-Sicherheit entspricht. Dabei sollen die Prinzipien der International Data Spaces Association (IDSA) sowie die Architekturkonzepte von Gaia-X angewendet werden. Die entwickelte Infrastruktur sollte es ermöglichen, dass Datenbereitsteller die volle Kontrolle über ihre Daten behalten und selbst festlegen können, unter welchen Bedingungen diese genutzt werden dürfen.

Ein weiteres Teilziel bestand in der Entwicklung und Erprobung konkreter Anwendungsfälle, die den praktischen Nutzen des Energiedatenraums demonstrieren. Dabei sollten insbesondere Anwendungsfälle im Bereich „Netzplanung und Netzführung“ adressiert werden, die für Verteilnetzbetreiber von hoher Relevanz sind. Die Bereitstellung von Messwerten und Prognosen für dezentrale Erzeugungsanlagen sowie der Austausch digitaler Zwillinge von Netzkomponenten wurden als prioritäre Anwendungsfälle identifiziert.

Darüber hinaus verfolgte das Projekt das Ziel, wirtschaftlich tragfähige Geschäftsmodelle für den Betrieb eines Energiedatenraums zu entwickeln. Es sollte untersucht werden, welche Wertschöpfungsmöglichkeiten sich durch den Handel mit digitalen Gütern ergeben und wie diese Wertschöpfung zwischen den beteiligten Akteuren verteilt werden kann. Dabei sollten auch Fragen der Preisbildung für digitale Güter und der Gestaltung von Plattformökonomien adressiert werden.

Ein wichtiges Ziel war zudem, die Standardisierung und Interoperabilität im Energiesektor zu fördern. Indem bestehende Standards wie die Asset Administration Shell genutzt und neue Standards für den Datenaustausch entwickelt wurden, wurden die digitalen Infrastrukturen im Energiesektor weiter harmonisiert. Dies sollte die Grundlage für eine breite Akzeptanz und Verbreitung der entwickelten Lösungen schaffen.

Schließlich verfolgte das Projekt das Ziel, die Ergebnisse in die relevanten Standardisierungsgremien und Fachcommunities einzubringen und so einen nachhaltigen Transfer der Projektergebnisse zu

gewährleisten. Durch Publikationen, Vorträge und die Beteiligung an Standardisierungsaktivitäten sollte die Sichtbarkeit der Projektergebnisse erhöht und deren Übernahme durch weitere Akteure gefördert werden.

3.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele des idFlexNetz-Projektes lassen sich in mehrere Themenbereiche gliedern. Ein erster Schwerpunkt lag auf der Entwicklung einer Referenzarchitektur für Energiedatenräume. Diese Architektur sollte die verschiedenen Ebenen eines Datenraums von den Datenquellen über die Konnektoren bis hin zu den Anwendungen definieren. Dabei sollten bestehende Architekturkonzepte wie die IDS-Referenzarchitektur und die Gaia-X-Architektur berücksichtigt und auf die spezifischen Anforderungen des Energiesektors zugeschnitten werden.

Ein zweiter Schwerpunkt betraf die Integration dezentraler Identitäten in das Datenraum-Ökosystem. Es sollte untersucht werden, wie Decentralized Identifiers (DID) und Verifiable Credentials eingesetzt werden können, um die Identität und Authentizität digitaler Güter nachzuweisen. Dabei sollten insbesondere die Möglichkeiten der Distributed Ledger Technology für die Verwaltung von Identitäten und die Dokumentation von Transaktionen erforscht werden. Die Entwicklung eines Konzepts zur Vergabe und Verwaltung von DIDs für digitale Zwillinge war ein zentrales technisches Arbeitsziel.

Ein dritter Schwerpunkt lag auf der Entwicklung von Methoden für die Modellierung und den Austausch digitaler Zwillinge. Die Asset Administration Shell wurde als Standardformat für die Repräsentation digitaler Zwillinge gewählt. Es sollte untersucht werden, wie verschiedene Arten von Informationen, insbesondere Zeitreihendaten wie Prognosen, in das AAS-Format integriert werden können. Dabei sollten die Arbeiten der Industrial Digital Twin Association (IDTA) berücksichtigt und eigene Beiträge (z.B. „Queryable AAS Graphs for AI Agents: An Event-Driven Knowledge Graph Integration for AAS Environments“) zur Weiterentwicklung des Standards geleistet werden.

Ein vierter Schwerpunkt betraf die Entwicklung von Mechanismen zur Zugriffskontrolle und zur Durchsetzung von Nutzungsbedingungen (Usage Policies). Es sollte erforscht werden, wie Usage Policies definiert und technisch durchgesetzt werden können, sodass Datenbereitsteller die Kontrolle über die Nutzung ihrer Daten behalten. Dabei sollten die Konzepte der IDS-Architektur für Usage Control angewendet und für die spezifischen Anforderungen des Energiesektors erweitert werden.

Ein fünfter Schwerpunkt lag auf der Entwicklung von Methoden zur Bewertung der Qualität und Vertrauenswürdigkeit digitaler Güter. Es sollte untersucht werden, welche Qualitätsmerkmale für digitale Zwillinge und Prognosemodelle relevant sind und wie diese Merkmale gemessen und kommuniziert werden können. Dabei sollten auch Konzepte für Reputationssysteme und Zertifizierungsverfahren entwickelt werden.

Ein sechster Schwerpunkt betraf die Entwicklung von Geschäftsmodellen für Datenräume. Es sollte erforscht werden, welche Erlösmodelle für den Betrieb eines Energiedatenraums geeignet sind und wie die Wertschöpfung zwischen den verschiedenen Akteuren verteilt werden kann. Dabei sollten insbesondere die Besonderheiten mehrseitiger Plattformen und die Rolle von Netzwerkeffekten untersucht werden.

Ein siebter Schwerpunkt lag auf der Entwicklung von Methoden für die Evaluation der entwickelten

Lösungen. Es sollten Kriterien und Verfahren für die Bewertung der Benutzerfreundlichkeit, der technischen Leistungsfähigkeit, der IT-Sicherheit und der Interoperabilität definiert werden. Die Durchführung systematischer Evaluierungen sollte die Qualität der Projektergebnisse sicherstellen und Erkenntnisse für die Weiterentwicklung liefern.

3.4 Bezug zu förderpolitischen Zielen

Das idFlexNetz-Projekt stand in engem Bezug zu den förderpolitischen Zielen der Bundesregierung im Bereich der Digitalisierung der Energiewende. Die Förderinitiative „Digitalisierung der Energiewende“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie zielte darauf ab, durch den Einsatz digitaler Technologien die Integration erneuerbarer Energien zu erleichtern, die Effizienz des Energiesystems zu steigern und neue Geschäftsmodelle zu ermöglichen. Das idFlexNetz-Projekt trug zu all diesen Zielen bei.

Durch die Entwicklung eines Energiedatenraums wurde die Grundlage für eine verbesserte Integration dezentraler Erzeugungsanlagen geschaffen. Der souveräne Austausch von Messwerten, Prognosen und digitalen Zwillingen ermöglicht Netzbetreibern, ihre Netze effizienter zu planen und zu betreiben. Dies trägt dazu bei, die Kosten der Energiewende zu senken und die Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

Das Projekt stand zudem in engem Bezug zur europäischen Datenstrategie und zur Gaia-X-Initiative. Die Bundesregierung unterstützt den Aufbau einer souveränen europäischen Dateninfrastruktur, die auf europäischen Werten wie Datenschutz, Transparenz und Offenheit basiert. Das idFlexNetz-Projekt setzte diese Vision im Energiesektor um und trägt damit zur Stärkung der digitalen Souveränität Europas bei.

Darüber hinaus adressierte das Projekt die förderpolitischen Ziele in den Bereichen Standardisierung und Interoperabilität. Die Bundesregierung setzt sich für die Entwicklung und Verbreitung offener Standards ein, um Vendor Lock-in zu vermeiden und Innovationen zu fördern. Durch die Anwendung bestehender Standards wie der Asset Administration Shell sowie die Entwicklung neuer Standards für den Datenaustausch trug das Projekt zu diesem Ziel bei.

Das Projekt unterstützte auch die förderpolitischen Ziele im Bereich der IT-Sicherheit. Die zunehmende Digitalisierung des Energiesektors erhöht die Anfälligkeit für Cyberangriffe. Die Entwicklung sicherer Infrastrukturen für den Datenaustausch sowie die Anwendung kryptographischer Verfahren zur Authentifizierung und Integritätssicherung tragen zur Erhöhung der Cybersicherheit im Energiesektor bei.

Schließlich stand das Projekt in Bezug zu den förderpolitischen Zielen im Bereich der Forschung und Innovation. Durch die Zusammenarbeit von Forschungseinrichtungen, Energieversorgungsunternehmen und Technologieanbietern wurde der Transfer von Forschungsergebnissen in die Praxis gefördert. Die Entwicklung von Demonstratoren und deren Erprobung in der produktiven IT-Umgebung der Partner stellten sicher, dass die Projektergebnisse praxistauglich sind und einen konkreten Nutzen für die beteiligten Akteure bieten.

3.5 Projektstruktur und Arbeitspakete

Das idFlexNetz-Projekt war in sechs Arbeitspakete gegliedert, die aufeinander aufbauten und gemeinsam zur Erreichung der Projektziele beitrugen. Die Projektstruktur folgte einem klassischen

Phasenmodell, das von der Anforderungsanalyse über die Konzeption und Umsetzung bis zur Evaluation und zum Transfer reichte.

Arbeitspaket 1 umfasste die Projektleitung und die Öffentlichkeitsarbeit. Die VSE Aktiengesellschaft übernahm die Koordination des Projektkonsortiums und war verantwortlich für die Organisation regelmäßiger Abstimmungsrunden, die Überwachung der Meilensteine und die Berichterstattung gegenüber dem Projektträger. Darüber hinaus wurden im Rahmen dieses Arbeitspakets Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit durchgeführt, um die Projektergebnisse bekannt zu machen und den Austausch mit relevanten Stakeholdern zu fördern.

Arbeitspaket 2 widmete sich der Anforderungsanalyse. In diesem Arbeitspaket wurden die relevanten Stakeholder identifiziert und deren Bedarfe erhoben. Auf Basis dieser Bedarfserhebung wurden funktionale und nichtfunktionale Anforderungen an das zu entwickelnde IKT-Ökosystem definiert. Zudem wurde der Stand der Wissenschaft und Technik analysiert und die Neuheit des Lösungsansatzes herausgearbeitet. Die Ergebnisse dieses Arbeitspakets bildeten die Grundlage für die nachfolgenden Konzeptions- und Umsetzungsarbeiten.

Arbeitspaket 3 befasste sich mit der Konzeption der Architektur. Es wurden die konzeptionellen Grundlagen erarbeitet, eine mehrschichtige Architektur für den Energiedatenraum entwickelt und die erforderlichen technologischen Bausteine identifiziert. Dabei wurden bestehende Standards und Referenzarchitekturen berücksichtigt und an die spezifischen Anforderungen des Energiesektors angepasst. Die Konzeptionsphase mündete in einer detaillierten Spezifikation der zu entwickelnden Komponenten und deren Zusammenspiel.

Arbeitspaket 4 bildete einen Schwerpunkt des Projektes und umfasste die praktische Umsetzung des IKT-Systems. In diesem Arbeitspaket wurden die konzeptionierten Komponenten implementiert, die definierten Anwendungsfälle umgesetzt und Demonstratoren aufgebaut. Die Umsetzungsarbeiten erfolgten in enger Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern, wobei jeder Partner seine spezifischen Kompetenzen einbrachte. Darüber hinaus wurden in diesem Arbeitspaket Geschäftsmodelle für den Marktplatzbetrieb entwickelt.

Arbeitspaket 5 konzentrierte sich auf die umfassende Erprobung der entwickelten Lösungen. Es wurden systematische Tests zu Design und Usability, zur Integration Cyber-physischer Systeme, zur IT-Sicherheit sowie zur Systemintegration durchgeführt. Die Demonstratoren wurden in realen Testumgebungen erprobt und hinsichtlich ihrer Funktionalität evaluiert. Die Evaluierungen erfolgten anhand definierter Kriterien und unter Einbeziehung der relevanten Stakeholder. Die Ergebnisse der Erprobung flossen in die Weiterentwicklung der Komponenten ein und lieferten wichtige Erkenntnisse für die Skalierung der Lösungen.

Arbeitspaket 6 befasste sich mit dem Transfer der Projektergebnisse und der Identifikation von Skalierungspotenzialen. Es wurden Strategien für die Verbreitung der Ergebnisse entwickelt, Transferaktivitäten durchgeführt und Empfehlungen für die Weiterentwicklung formuliert. Dabei wurden insbesondere die Möglichkeiten für die Übertragung der Lösungen auf andere Anwendungsbereiche untersucht. Die Transferaktivitäten umfassten die Beteiligung an Standardisierungsgremien, die Veröffentlichung wissenschaftlicher Publikationen und die Durchführung von Workshops und Konferenzbeiträgen.

Die Arbeitspakete waren zeitlich gestaffelt, wobei die Arbeitspakete 1 und 6 über die gesamte Projektlaufzeit liefen, während die Arbeitspakete 2 bis 5 sequenziell bzw. mit zeitlichen Überlappungen bearbeitet wurden. Diese Struktur ermöglichte eine iterative Vorgehensweise, bei der Erkenntnisse aus späteren Phasen in frühere Phasen zurückfließen konnten.

3.6 Zusammenfassung

Das idFlexNetz-Projekt adressierte die Herausforderungen der Digitalisierung der Energiewende durch die Entwicklung eines souveränen Energiedatenraums. Die Ausgangssituation war durch einen hohen Bedarf an innovativen Lösungen für den Datenaustausch im Energiesektor gekennzeichnet, dem ein Mangel an geeigneten, standardisierten Infrastrukturen gegenüberstand. Das Projekt verfolgte das übergeordnete Ziel, ein IKT-Ökosystem zu schaffen, das den souveränen Austausch digitaler Güter ermöglicht und dabei die Prinzipien der Datensouveränität, des Datenschutzes und der IT-Sicherheit wahrt.

Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele umfassten die Entwicklung einer Referenzarchitektur für Energiedatenräume, die Integration dezentraler Identitäten, die Modellierung und den Austausch digitaler Zwillinge, die Entwicklung von Mechanismen zur Zugriffskontrolle, die Bewertung der Qualität digitaler Güter sowie die Entwicklung von Geschäftsmodellen. Das Projekt stand in engem Bezug zu den förderpolitischen Zielen der Bundesregierung im Bereich der Digitalisierung der Energiewende und trägt zur Umsetzung der europäischen Datenstrategie bei.

Die Projektstruktur umfasste sechs Arbeitspakete, die von der Anforderungsanalyse über die Konzeption und Umsetzung bis zur Evaluation und zum Transfer reichten. Die Arbeitspakete bauten aufeinander auf und ermöglichten eine iterative Vorgehensweise. Die Schwerpunkte lagen auf der praktischen Umsetzung des IKT-Systems in Arbeitspaket 4 und der umfassenden Erprobung in Arbeitspaket 5. Die Projektergebnisse wurden systematisch dokumentiert und in die relevanten Fachcommunities eingebracht, um einen nachhaltigen Transfer zu gewährleisten.

Die Zusammenarbeit im Projektkonsortium erwies sich als äußerst fruchtbar. Jeder Partner brachte seine spezifischen Kompetenzen ein und trug damit zum Gesamterfolg bei. Die VSE steuerte ihre Expertise im Netzbetrieb und in der Projektkoordination bei. Das DFKI brachte seine Kompetenzen in den Bereichen Künstliche Intelligenz, Ontologien, Prognosemodelle und digitale Zwillinge ein. Das Fraunhofer IOSB-AST trug mit seiner Expertise in Energiemanagementsystemen, Dateninteroperabilität und -integration bei. Schneider Electric brachte seine Erfahrung als Anlagenhersteller und seine Kenntnisse über digitale Zwillinge ein. Spherity steuerte seine Expertise in den Bereichen dezentrale Identitäten und Blockchain-Technologie bei. Diese komplementären Kompetenzen ermöglichten, ein ganzheitliches System zu entwickeln, das alle relevanten Aspekte eines Energiedatenraums abdeckt.

Die im Projekt entwickelten Lösungen haben das Potenzial, einen signifikanten Beitrag zur Bewältigung der Herausforderungen der Energiewende zu leisten. Durch die Ermöglichung eines effizienten und sicheren Datenaustauschs können Netzbetreiber ihre Netze besser planen und betreiben, Anlagenhersteller können neue Geschäftsmodelle erschließen, und Dienstleister können innovative Services anbieten. Die konsequente Orientierung an offenen Standards und die Wahrung der Datensouveränität schaffen die Voraussetzungen für eine breite Akzeptanz und Verbreitung der Lösungen.

4 AP2 – Anforderungsanalyse

4.1 Projektübersicht

Durch die Digitalisierung werden sektorübergreifende Lösungen möglich, welche mit dem Ziel der Dekarbonisierung die Sektoren Energie, Wärme, Strom, Gas und Mobilität dezentral und hochdynamisch lokale Angebote von Energie mit dem zunehmend flexibleren Verbrauch abstimmen.

Dies erfordert für den Netzbetrieb den flexiblen Einsatz von Modellen zur Abbildung der vorhandenen Betriebsmittel und Assets sowie von Algorithmen zur Betriebsführung dieser Assets. Beispiele für Algorithmen sind die Vorhersage der lokalen Einspeisung von PV-Strom sowie die Berechnung von Steuervorgaben für den netzdienlichen Einsatz lokaler steuerbarer Verbraucher oder Speicher. Beispiele für Modelle sind spezialisierte und angelernte Modelle zur Simulation und Betriebsführung von Netzbetriebsmitteln. Diese Berechnungsmodelle und Algorithmen sind in der Regel eng an die von den Akteuren genutzten Systeme gekoppelt.

Mit der Digitalisierung stehen jedoch unterschiedliche Ansätze der Datenanalyse und Berechnung sowie der Modellbildung sowohl konkurrierend als auch ergänzend von verschiedenen Akteuren zur Verfügung, so dass gerade vor dem Hintergrund einer Dezentralisierung der Energieversorgung eine zunehmende Spezialisierung der Berechnungsmodelle zu erwarten ist. So sind Vorhersagemodelle für die Schwäbische Alb in Berlin eventuell nicht nutzbar, ähneln aber gegebenenfalls denen für den Bayerischen Wald. So sind z.B. die durch einen Data Scientist mit spezieller Erfahrung im Anwendungsfeld erstellten Modelle einer Wärmepumpe gegebenenfalls besser modelliert als die vom Hersteller der Pumpe. Da Algorithmen in der Regel ebenfalls das Modell eines realen Prozesses abbilden, wird im Weiteren ausschließlich von Modellen gesprochen.

Ziel des geplanten Vorhabens ist die Schaffung eines IKT-Ökosystems für Modelle für den netzdienlichen Betrieb steuerbarer Verbraucher und Erzeuger. Dazu werden die Modelle als digitale Zwillinge abgebildet und durch einen dezentralen Identifikator (DID) als digitales Gut handelbar gemacht.

Ein solches Ökosystem ermöglicht den Anbietern solcher Modelle neue Geschäftsmodelle. Für die Netzbetreiber reduzieren sich die Einführungskosten sowie das Projektrisiko. Des Weiteren erhalten Netzbetreiber Zugriff auf die neuesten Modelle. Das Ökosystem vergrößert die Vielfalt an Anbietern und deren Spezialisierung und verringert durch die Standardisierung des Austauschs die Abhängigkeit von einem Anbieter. Weiterhin ermöglicht es über eine Plattform ein Risiko-Scoring, Benchmarking und Bewertung der Modelle durch die Anwender als Nachfrager/Konsumenten.

In Abbildung 1 ist die Integration von Anwendungen mit dezentralem Marktplatz für Modelle und Geräte schematisch dargestellt. Wenn man die Abbildung von unten nach oben anschaut, stellt es sich wie folgt dar: Geräte im Feld, wie Speicher-, Erzeugungs- oder Verbrauchergeräte, werden sowohl anhand ihrer Geokoordinaten als auch als Betriebsmittel in der entsprechenden Netztopologie verortet. Ein Gerät im Feld ist dabei mit „seinem“ jeweiligen digitalen Zwilling assoziiert. Über eine offene, standardisierte Programmierschnittstelle (API) können das Gerät im Feld und sein assoziierter digitaler Zwilling miteinander kommunizieren (z.B. Sensordaten auslesen oder eine Wartung anfordern). Im digitalen Zwilling sind Informationen zum assoziierten Gerät hinterlegt, weitere Modelldaten, relevante Marktstammdaten oder Messdaten sowie ein Modell-Bewertungs-Score. Prognosemodelle werden durch ihre Modellparameter, die beschreibenden Zusatzinformationen sowie die geografischen

Eigenschaften beschrieben. Jedes Modell ist ebenfalls mit seinem jeweiligen digitalen Zwilling assoziiert und über offene Schnittstellen können diese mit verschiedenen Anwendungen kommunizieren. Im digitalen Zwilling sind Informationen zum Prognosemodell hinterlegt, wie z.B. dezentraler Identifikator und Modelldaten.

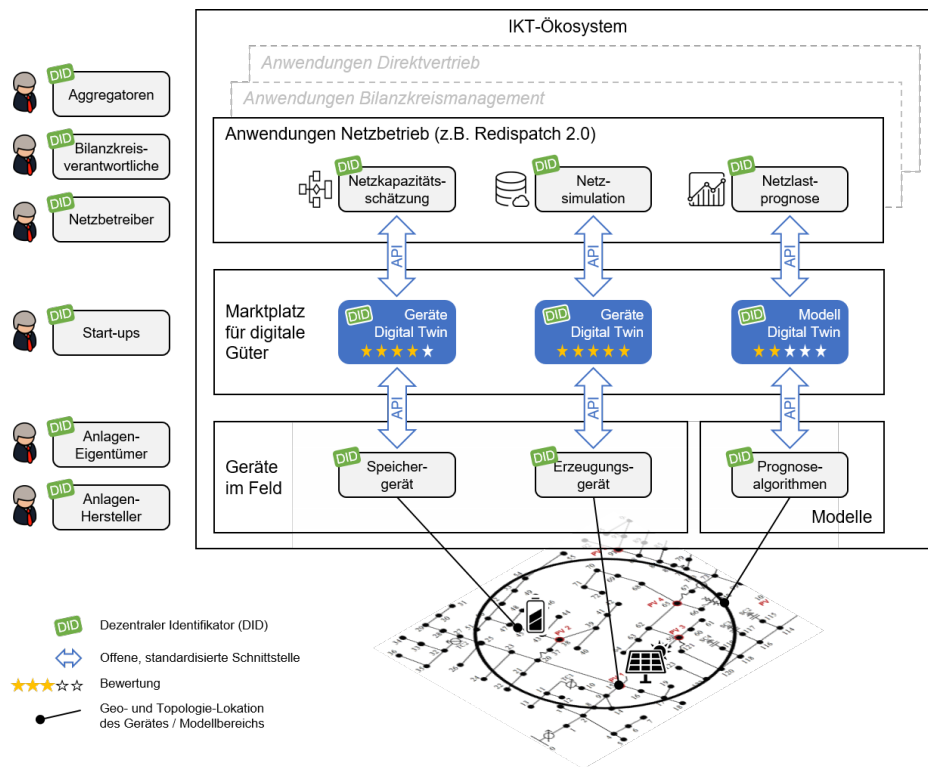


Abbildung 1: Integration von Anwendungen mit dezentralem Marktplatz für Modelle und Geräte

Mit den digitalen Zwillingen lassen sich verschiedene Anwendungen zum Netzbetrieb durch den Netzbetreiber (Netzkapazitätsschätzung, Netzsimulation, Netzlastprognosen) in verschiedenen Ausprägungen und Szenarien aufsetzen, um beispielsweise besonderen Bedingungen vor Ort gerecht zu werden.

Die Modelle und ihre Repräsentanz als digitale Zwillinge stellen somit digitale Güter dar, welche in verschiedenen Anwendungen eingesetzt und von Marktakteuren angeboten oder nachgefragt werden können. Im Projekt erfolgt der Einsatz unter den Gesichtspunkten des Netzbetriebs. Die digitalen Güter können daneben auch weiteren Marktakteuren über das Ökosystem angeboten werden. Zu diesen Marktakteuren zählen beispielsweise die Eigentümer der Anlagen, Bilanzkreisverantwortliche oder Virtual-Power-Plant-Aggregatoren, um nur einige zu nennen.

Zur Realisierung eines vertrauenswürdigen Handelns der digitalen Güter bedarf es dezentraler Identifikatoren, die mit der sogenannten „Identity Trust Fabric“ verankert sind. Diese Verankerung erfolgt mit dem Ziel, die Zuordnung von Schlüsseln mit dem dezentralen Identifikator überprüfbar und somit vertrauensvoll zu machen. Zudem ermöglicht sie eine standardisierte Integration in bestehende IKT-Ökosysteme.

4.2 Anwendungsfälle

Um die konkreten Eigenschaften der digitalen Zwillinge präziser beschreiben zu können, wird in

idFlexNetz zwischen *typeAsset* und *instanceAsset* eines physischen Assets unterschieden. Abbildung 2 veranschaulicht die Beziehungen zwischen *typeAsset*, *instanceAsset* und *Physical Asset*.

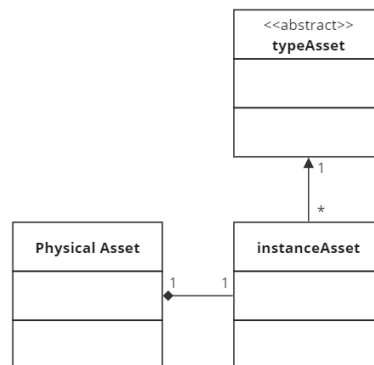


Abbildung 2: Beziehungen cyber-physischer Assets

4.2.1 PV-Anlage

Unter einer PV-Anlage versteht man eine Zusammenschaltung von PV-Modulen, die an einen Wechselrichter angeschlossen sind. Im Folgenden werden drei Anwendungsfälle für PV-Anlagen beschrieben, die einen möglichen zukünftigen Ablauf des idFlexNetz-Ökosystems darstellen (siehe Abbildung 3).

Genehmigung und Integration einer PV-Anlage mit einer Nennleistung unter 100 kW

Es werden Anlagen in der Niederspannung mit einer elektrischen Nennleistung $< 100 \text{ kW}^1$ betrachtet. Diese sind nach dem derzeitigen Stand der Regulatorik im Redispatch 2.0-Framework nicht relevant, d.h., es entstehen keine Datenmeldepflichten, insbesondere für Stammdaten und Planungsdaten (vgl. BK6-20-059 BNetzA).

Tabelle 1: Prüfung und Genehmigung einer PV-Anlage

Use-Case-Name	Netzplanung: Prüfung und Genehmigung einer PV-Anlage
Prozessziel	Der digitale Zwilling der PV-Anlage ist auf dem Marktplatz verfügbar und kann im Rahmen der Netzplanung von Marktteilnehmern genutzt werden.
Use-Case-Beschreibung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Hersteller bietet <i>typeAsset</i> seines Produkts auf den Marktplatz. 2. <ol style="list-style-type: none"> a) Installateur ruft Informationen von <i>typeAsset</i> vom Marktplatz ab b) Anschlussnehmer ruft Informationen von <i>typeAsset</i> vom Marktplatz ab und reichert <i>typeAsset</i> mit weiteren Daten an und erzeugt dadurch <i>instanceAsset</i> 3. <ol style="list-style-type: none"> a) Installateur beantragt den Anschluss der Anlage bei VNB. b) Anschlussnehmer beantragt den Anschluss der Anlage bei VNB.

¹ Anmerkung: Keine Direktvermarktung nötig, wenngleich sinnvoll, denn Vermarktung außerhalb EEG kann höhere Vergütung erzielen. Die bürokratischen Hürden sind derzeit zu hoch, sodass sich Direktvermarktung für Kleinanlagen bislang nicht lohnt. Einen Anreiz können Aggregator / Virtuelle Kraftwerke setzen.

	<p>4. VNB integriert <i>instanceAsset</i> in Netzberechnung und prüft Anschlussfähigkeit am Netzanschlusspunkt (NAP) mittels technischer Grenzwerte (Netzanschlusskonzept / Festlegung des Netzanschlusspunktes).</p> <p>a) Grenzwerte eingehalten: Genehmigung möglich.</p> <p>b) nicht <i>weiter betrachtet</i>: Grenzwerte nicht eingehalten</p> <p>5. a) VNB versendet Genehmigung zur Netzintegration der Anlage auf Basis der Netzberechnung an Installateur.</p> <p>b) VNB versendet Genehmigung zur Netzintegration der Anlage auf Basis der Netzberechnung an Anlagenbetreiber (Freigabe/Zuweisung anderer Verknüpfungspunkt).</p>
--	---

Tabelle 2: Integration einer PV-Anlage in operative Tools und laufenden Netzbetrieb

Use-Case-Name	Netzbetrieb: Integration PV-Anlage in operative Tools und laufenden Netzbetrieb
Prozessziel	Die PV-Anlage (<i>instanceAsset</i>) ist in den operativen Tools beim VNB integriert und kann im laufenden Netzbetrieb genutzt werden.
Use-Case-Beschreibung	<p>6. Die Anlage wird gebaut. <i>instanceAsset</i> wird auf Basis von VDE-AR-N 4105² mit Informationen angereichert. Anschlussnehmer zeigt Inbetriebnahme bei VNB an. VNB pflegt Daten des <i>instanceAsset</i> „<i>as built</i>“ in IT-Systeme z.B. EEG-Datenbank/GIS ein.</p> <p><i>Nicht weiter betrachtet: Anlagenbetreiber meldet Daten des instanceAsset der BNetzA zur Eintragung ins Marktstammdatenregister (MaStR).³</i></p>

Der in den Anwendungsfällen beschriebene Ablauf ist im Sequenzdiagramm in Abbildung 3 ersichtlich.

² Der Anwendungsbereich der VDE-AR-N 4105 ist das Niederspannungsnetz. Für Anwendungen von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz gilt VDE-AR-N 4110.

³ Zu prüfen mit BNetzA: Automatische Meldung MaStR: *instanceAsset* meldet Daten ins MaStR via Blockchain als Schnittstelle zw. Anlage und MaStR: a) über TPM im SMGW, b) über den Mehrwert-Konnektor des *instanceAssets* in Cloud. Die Blockchain dient in diesem Fall als Schnittstelle, um die Anlage für den Registrierungsprozess zu identifizieren und die Verbindung mit dem MaStR aufzubauen. Dadurch wird der Registrierungsprozess im MaStR initiiert. Die Anlagendaten selbst sind lokal bei der Anlage bzw. *instanceAsset* gespeichert und werden nach dem Verbindungsaufbau an die Client-Server-Datenbank des MaStR zur automatischen Registrierung übermittelt.

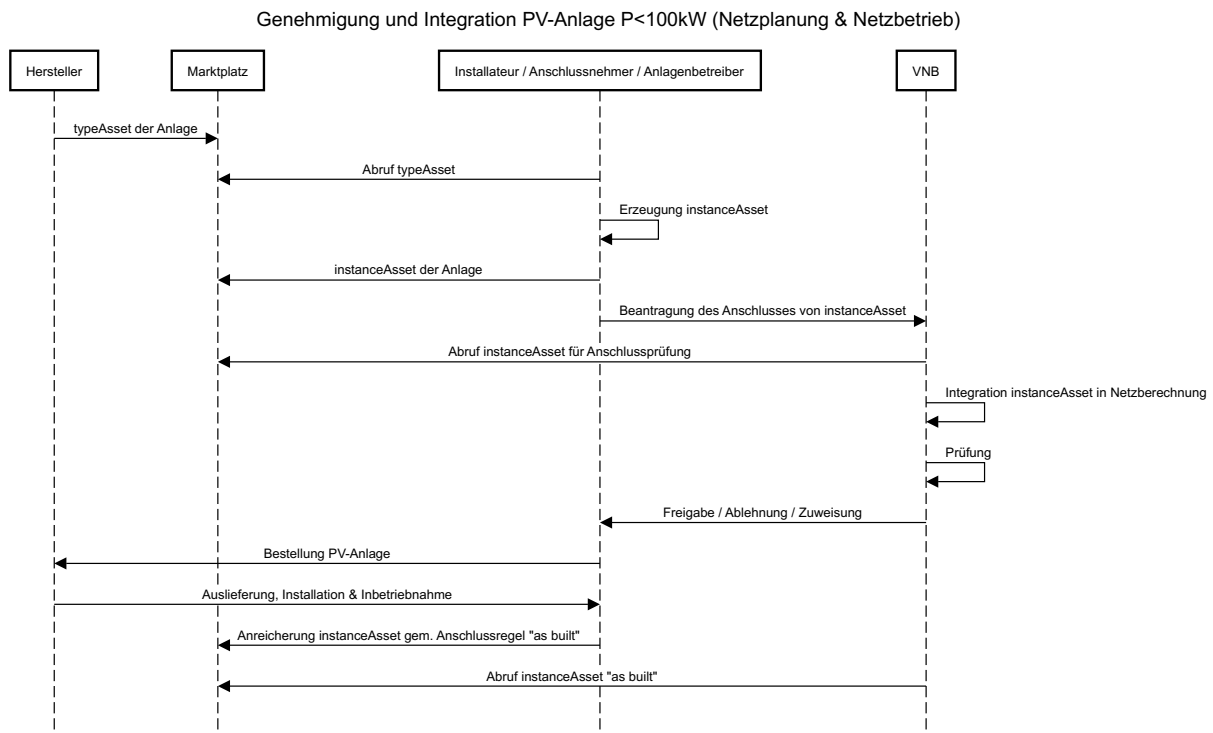


Abbildung 3: Sequenzdiagramm „PV-Anlage (<100 kW)“

Bereitstellung höherwertiger digitaler Zwillinge für PV-Anlage mit Nennleistung unter 100 kW

Zur Erstellung bzw. zur Verbesserung von Netzzustandsprognosen der Niederspannung oder von Prognosen des Flexibilitätsbedarfs kann der VNB auf höherwertige digitale Zwillinge zugreifen.

Tabelle 3: Verbesserung laufender Netzführung

Use-Case-Name	
Prozessziel	Verbesserung der Berechnungen innerhalb der operativen Tools des VNB mit Hilfe von Methoden des Marktplatzes.
Use-Case-Beschreibung	VNB holt Zusatzinformation / Funktionen (z.B. Prognosen) vom Marktplatz zur Verbesserung der Berechnungen innerhalb der operativen Tools der Netzführung.

Bereitstellung höherwertiger digitaler Zwillinge für PV-Anlage mit Nennleistung über 100 kW

Der Anwendungsfall gilt für PV-Anlagen mit einer elektrischen Nennleistung $P_{el,Nenn} > 100$ kW. Nach aktuellem Stand fallen diese PV-Anlagen in den Anwendungsbereich des Redispatch 2.0 und sind somit von besonderer Bedeutung für den VNB. Im Zuge dessen wird u.a. die Rolle *Einsatzverantwortlicher (EIV)*⁴ relevant.

Beispielhaft für alle möglichen weiteren Algorithmen/Methoden, die auf dem Marktplatz angeboten werden können, wird an dieser Stelle die Prognose der PV-Erzeugung (PV-Prognose) beschrieben.

⁴ Der EIV plant und führt den Einsatz einer technischen Ressource durch und übermittelt die zugehörigen Fahrpläne.

Tabelle 4: Bereitstellung und Nutzung PV-Prognose

Use-Case-Name	Bereitstellung und Nutzung PV-Prognose
Prozessziel	Eine fertige PV-Prognose wird dem EIV zur Verfügung gestellt. Dieser erstellt und übermittelt einen Fahrplan an den VNB.
Use-Case-Beschreibung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Softwareentwickler „Wetter“ liefert Wetterprognosen auf den Marktplatz. 2. Softwareentwickler „PV-Prognose“ stellt sein PV-Prognosemodell auf den Marktplatz. 3. EIV ruft PV-Prognosemodell vom Marktplatz ab. 4. Wetterprognose liefert Eingabedaten zu PV-Prognose. PV-Prognose liefert Ausgabe. EIV erstellt Fahrplan für PV-Anlage (PV-Fahrplan) u.a. auf Basis von PV-Prognose. 5. EIV übergibt PV-Fahrplan an VNB.

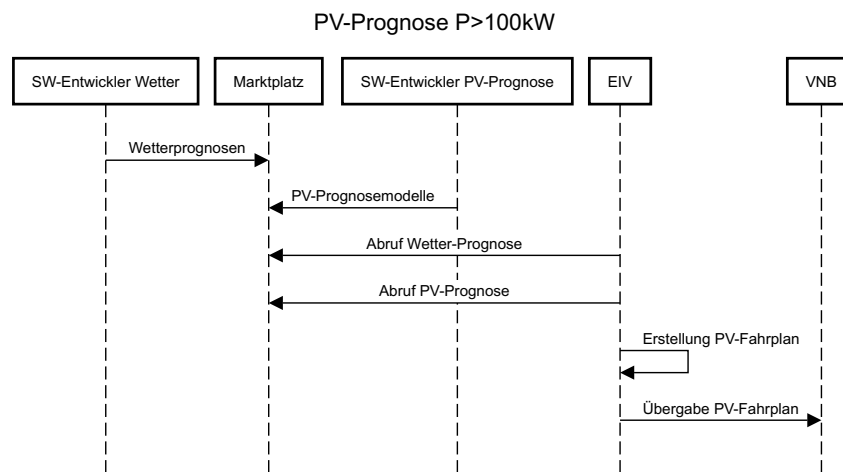


Abbildung 4: Sequenzdiagramm „PV-Prognose“

4.2.2 Wärmepumpe

Genehmigung und Integration einer Wärmepumpe

Der Anwendungsfall entspricht schematisch dem der PV-Anlage.

Bereitstellung höherwertiger digitaler Zwillinge für Wärmepumpen

In Abhängigkeit von den Entwicklungen im Zusammenhang mit Redispatch 3.0 wird der Anwendungsfall in diesem Kontext weiter untersucht.

Tabelle 5: Bereitstellung höherwertiger digitaler Zwillinge für Wärmepumpen

Use-Case-Name	Wärmepumpe für Prognose (ggf. Simulationsmodelle) zur Netzführung
Prozessziel	Der digitale Zwilling der Wärmepumpe wird um eine der auf dem Marktplatz verfügbaren Prognosen (& ggf. Simulationsmodelle) dritter Anbieter (bspw. Softwareentwickler) ergänzt und kann im Rahmen der Netzführung von Marktteilnehmern genutzt werden

Use-Case-Beschreibung	<ol style="list-style-type: none"> Ein dritter Anbieter (z.B. Softwareentwickler) erweitert das auf dem Markt- platz vorhandenen digitalen Zwilling Modell (<i>typeAsset</i>) um Prognose- und Simulationsmodelle. Der Fokus liegt auf der Prognose des Verhaltens der Wärmepumpe entsprechend des Wetters. Hier nicht betrachtet wird das Ver- halten bei Überlast, Preissignale, Lastverläufe etc. VNB nutzt die Prognose- & Simulationsmodelle für Optimierungsmaßnahmen
-----------------------	---

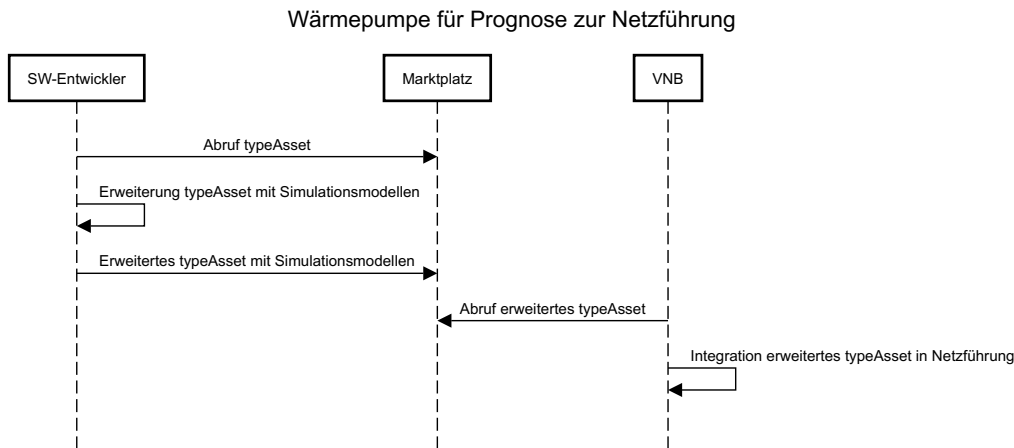


Abbildung 5: Sequenzdiagramm „Wärmepumpe“

4.2.3 Ladesäule/Wallbox

Die im folgenden beschriebenen Anwendungsfälle sind sowohl für öffentliche als auch für private Ladesäulen/Wallboxen anwendbar.

Genehmigung und Integration einer Wallbox/Ladesäule

Der Anwendungsfall entspricht schematisch dem der PV-Anlage.

Bereitstellung höherwertiger digitaler Zwillinge für Ladesäule/Wallbox

Der Anwendungsfall entspricht schematisch dem der Wärmepumpe.

4.2.4 Leistungsschalter

Beschaffung und Integration eines Leistungsschalters

Tabelle 6: Beschaffung und Integration eines Leistungsschalters

Use-Case-Name	Leistungsschalter für Netzplanung
Prozessziel	Der digitale Zwilling des Leistungsschalters ist auf dem Marktplatz verfügbar und kann im Rahmen der Netzplanung von den Marktteilnehmern genutzt werden.

Use-Case-Beschreibung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Hersteller bietet <i>typeAsset</i> auf dem Marktplatz an. Relevante Daten können bspw. Hersteller, Typ/Art, Nennspannung, Nennstrom, Kurzschlussstrom, Blitzstoßspannung, Steuerspannung sein. 2. VNB ruft Informationen von <i>typeAsset</i> vom Marktplatz ab. 3. VNB nutzt <i>typeAsset</i>, um eine Neubeschaffung für den Austausch eines defekten Leistungsschalters (LS) zu prüfen oder einen Netzausbau zu planen. <ol style="list-style-type: none"> a. Leistungsschalter kann eingesetzt werden b. Leistungsschalter kann nicht eingesetzt werden => neue Auswahl des LS durch den VNB 4. <i>InstanceAsset</i> wird erzeugt: VNB bestellt den Leistungsschalter anhand <i>typeAsset</i> bei dem Hersteller 5. Hersteller fertigt den bestellten Leistungsschalter und liefert ihn an den VNB. 6. Hersteller erweitert <i>instanceAsset</i> um die bei der Werksabnahme ermittelten Prüfwerte und CAD-Modelle. 7. VNB integriert das finale Leistungsschaltermodell <i>instanceAsset</i> in seine Netznachbildung.
-----------------------	--

Bereitstellung höherwertiger digitaler Zwillinge für Leistungsschalter

Tabelle 7: Bereitstellung höherwertiger digitaler Zwillinge für Leistungsschalter

Use-Case-Name	Leistungsschalter für Prognose- & Simulationsmodelle zur Netzführung und Netzoptimierung
Prozessziel	<p>Die digitalen Zwillinge des Leistungsschalters werden durch auf dem Marktplatz verfügbaren Prognose & Simulationsmodelle von dritten Anbietern (Softwareentwicklern) ergänzt und kann im Rahmen der Netzführung von Marktteilnehmern genutzt werden.</p> <p>Alternativ: Softwareentwickler kann auf dem Marktplatz vorhandene Modelle nutzen, diese erweitern und neue einstellen. Der VNB kann die auf dem Marktplatz vorhandenen Modelle für seine operativen Tools einsetzen.</p>
Use-Case-Beschreibung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Softwareentwickler erweitert das auf dem Marktplatz vorhandene Modell (<i>typeAsset</i>) um Prognose- & Simulationsmodelle (Verhalten bei Überlast, Alterungsprozesse etc.) 2. VNB nutzt die Prognose- & Simulationsmodelle für Optimierungsmaßnahmen

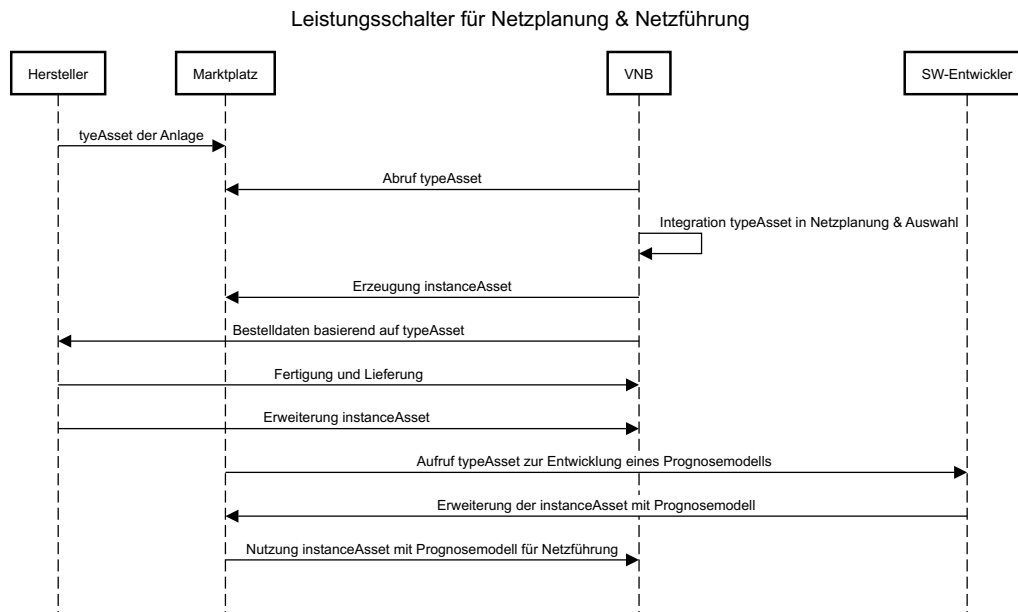


Abbildung 6: Sequenzdiagramm „Leistungsschalter“

4.2.5 Digitale Ortsnetzstation inklusive Transformator

Der Anwendungsfall entspricht schematisch dem des Leistungsschalters (vgl. Kapitel 4.2.4).

Beschaffung und Integration einer digitalen Ortsnetzstation

Tabelle 8: Beschaffung und Integration einer digitalen Ortsnetzstation

Use-Case-Name	Digitale Ortsnetzstation für Netzplanung
Prozessziel	Der digitale Zwilling einer digitalen Ortsnetzstation inkl. Transformator ist auf dem Marktplatz verfügbar und kann im Rahmen von Netzplanung von den Marktteilnehmern genutzt werden.
Use-Case-Beschreibung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Hersteller bietet <i>typeAsset</i> seines Produkts auf dem Marktplatz an. Relevante Daten können sein: Nennleistung, Spannungsebene, Schaltgruppe, Stufenschalter, Kühlungsart. Hersteller kann ebenfalls Richtwerte der Transformatorkenngrößen wie u_k, P_0, P_k, usw. angeben. 2. Der VNB ruft Informationen von <i>typeAsset</i> vom Marktplatz ab. 3. VNB nutzt <i>typeAsset</i>, um eine Neubeschaffung für den Austausch einer alten Ortsnetzstation zu prüfen oder einen Netzausbau / Neubeschaffung einer Ortsnetzstation zu planen. <ol style="list-style-type: none"> a. Trafo kann eingesetzt werden b. sonst zurück zu 1 (Auswahl eines anderen Trafomodells) 4. VNB bestellt den Transformator anhand des ausgewählten <i>typeAsset</i> bei dem Hersteller. 5. Hersteller fertigt die digitale Ortsnetzstation und liefert sie an den VNB. 6. Hersteller erweitert das auf dem Marktplatz vorhandene Modell um die bei der Werksabnahme ermittelten Werte (z.B. Prüfdaten, CAD-Modelle). Hersteller erzeugt <i>instanceAsset</i>. 7. VNB erweitert und integriert <i>instanceAsset</i> in seine Netznachbildung.

Bereitstellung höherwertiger digitaler Zwillinge für digitale Ortsnetzstationen

Tabelle 9: Bereitstellung höherwertiger digitaler Zwillinge für digitale Ortsnetzstationen

Use-Case-Name	Transformator Prognose & Simulationsmodelle für Netzführung
Prozessziel	Der digitale Zwilling des Transformators wird durch auf dem Marktplatz verfügbaren Prognose & Simulationsmodelle von dritten Anbietern ergänzt und kann im Rahmen der Netzführung von Marktteilnehmern genutzt werden.
Use-Case-Beschreibung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Softwareentwickler erweitert das auf dem Marktplatz vorhandene Modell (typeAsset) um Prognose- & Simulationsmodelle (Verhalten bei Überlast, Alterungsprozesse, Temperaturverläufe, Witterungsprozesse, etc.) 2. VNB nutzt die Prognose- & Simulationsmodelle für Optimierungsmaßnahmen

4.3 Beschreibung der Anforderungen

4.3.1 Identitätsframework

Ein wirksames Identitätsframework und ein konsistentes Vertrauensmodell sind grundlegend für jede digitale Industrieanwendung. Ein Identitätsframework umfasst Technologien und Richtlinien zur Verwaltung und Absicherung digitaler Identitäten und stellt damit Sicherheit, Datenschutz und Compliance sicher. Das Vertrauensmodell definiert die notwendigen Rollen, Anwendungsfälle sowie technische und organisatorische Komponenten, um digitales Vertrauen herzustellen, und legt die Mechanismen zur Erreichung bestimmter Vertrauensniveaus fest. Da Vertrauen für die Akzeptanz digitaler Identitäten entscheidend ist, muss das Modell rechtliche, organisatorische und technische Anforderungen konsistent verbinden. Es sollte pyramidenförmig aufgebaut sein, um unterschiedliche Vertrauensniveaus flexibel abzubilden – von regulatorischen Anforderungen über relevante Vertrauensdomänen bis hin zum höchsten Niveau gemäß eIDAS 2.0.

Im Folgenden sollen die Anforderungen an das idFlexNetz-Identitätsframework beschrieben werden:

1. Nutzung von dezentralen Identitätstechnologien
2. Etablierung von Vertrauensketten
3. Integration in Vertrauensmodelle und Vertrauenslisten
4. Integration mit Gaia-X-Datenräumen
5. Onboarding-Prozess
6. Issuer-Funktion
7. Verifier-Funktion

Nutzung dezentraler Identitätstechnologien

Die Nutzung dezentraler Identitätstechnologien wie W3C Decentralized Identifiers (DIDs) und Verifiable Credentials (VCs) ist ein zentraler Aspekt des Identitätsframeworks. Diese Technologien ermöglichen die Verwaltung und Verifizierung digitaler Identitäten.

Zum Arbeitsumfang gehören unter anderem:

- **Integration von DIDs und VCs als Wallet-Funktion** mit anderen idFlexNetz-Komponenten.
- **Entwicklung von Richtlinien und Verfahren** zur Nutzung und Verwaltung von DIDs und VCs.

Etablierung von Vertrauensketten

Die Etablierung von Vertrauensketten für Autorisierungs- und Herkunftsnachweise ist ein wesentlicher Aspekt des Identitätsframeworks. Diese Vertrauensketten gewährleisten die Authentizität und Integrität von Identitäten.

Zum Arbeitsumfang gehören unter anderem:

- **Entwicklung von Verfahren zur Vertrauenskettenbildung.**
- **Integration von Vertrauensketten in bestehende Prozesse:** Integration sehr einfacher/kurzer Vertrauensketten in andere idFlexNetz-Prozesse.

Integration in Vertrauensmodelle und Vertrauenslisten

Die Integration mit bestehenden Vertrauensmodellen und Vertrauenslisten für autorisierte Aussteller innerhalb definierter Vertrauensdomänen, wie Trust Service Provider, BNetzA, TÜV oder BDEW, ist ein wichtiger Aspekt des Identitätsframeworks.

Zum Arbeitsumfang gehören unter anderem:

- **Analyse bestehender Vertrauensmodelle und -listen:** Eine gründliche Analyse der bestehenden Vertrauensmodelle und -listen ist erforderlich, um zu verstehen, wie sie funktionieren und in das Identitätsframework integriert werden können.
- **Entwicklung von Integrationsstrategien:** Auf der Grundlage der Analyse werden Strategien zur Integration der Vertrauensmodelle und -listen in das Identitätsframework entwickelt.

Integration mit Gaia-X-Datenräumen

Die Möglichkeit der Integration von Autorisierungs- und Herkunftsnachweisketten in Gaia-X-Datenräume ist ein wichtiger Aspekt des Identitätsframeworks. Dies gewährleistet die Interoperabilität und den sicheren Datenaustausch.

Zum Arbeitsumfang gehören unter anderem:

- **Analyse der Gaia-X-Datenräume:** Eine gründliche Analyse der Gaia-X-Datenräume ist erforderlich, um zu verstehen, wie sie funktionieren und wie sie in das Identitätsframework integriert werden können.
- **Entwicklung von Integrationsstrategien:** Auf der Grundlage der Analyse werden Strategien für die Integration der Autorisierungs- und Herkunftsnachweisketten in die Gaia-X-Datenräume entwickelt.

Onboarding-Prozess

Der Aufbau eines Prozesses für das Onboarding autorisierter juristischer Personen als Teilnehmer des Ökosystems ist ein wichtiger Aspekt des Identitätsframeworks.

Zum Arbeitsumfang gehören unter anderem:

- **Entwicklung** eines effektiven und effizienten **Onboarding-Prozesses** für autorisierte juristische Personen.
- **Implementierung des Onboarding-Prozesses als Mockup** in andere idFlexNetz-Komponenten.

Issuer-Funktion

Die Bereitstellung einer Issuer-Funktion für Ökosystem-Teilnehmer, um verifizierbare Aussagen über digitale Güter in Form eines Verifiable Credentials auszugeben, ist ein wichtiger Aspekt des Identitätsframeworks.

Zum Arbeitsumfang gehören unter anderem:

- **Entwicklung** einer effektiven und effizienten **Issuer-Funktion**.
- **Implementierung der Issuer-Funktion** in bestehende Systeme und Prozesse.

Verifier-Funktion

Die Bereitstellung einer Verifier-Funktion, die Autorisierungs- und Herkunftsnachweisketten in Bezug auf Organisationen und Digitale Güter innerhalb verschiedener Vertrauensdomänen überprüfen kann, ist ein wichtiger Aspekt des Identitätsframeworks.

Zum Arbeitsumfang gehören unter anderem:

- **Entwicklung** einer effektiven und effizienten **Verifier-Funktion**.
- **Implementierung der Verifier-Funktion** in bestehende Systeme und Prozesse.

4.3.2 *Ontologien und Key Performance Indikatoren*

Für den idFlexNetz-Marktplatz soll eine Beschreibungssprache zur Handelbarkeit digitaler Güter entwickelt werden. Digitale Güter in diesem Sinne können a) digitale Zwillinge physischer Assets, b) Software, Algorithmen oder Services sein.

Durch Ontologien und deren Spezifikation kann eine vereinheitlichte und gemeinsame Kommunikationsebene für Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) Systeme integriert werden. Da die Teilnehmer des Diskurses in einem Fachbereich wissen, welche Bedeutung die spezifischen Begriffe haben, ist mithilfe der Ontologie eine Kommunikation ohne Missverständnisse und in klar definierten Abläufen und Aussagen möglich [2].

Literaturrecherche zu Ontologien

Basic Formal Ontology (BFO): Die BFO ist eine domänenneutrale obere Ontologie, die grundlegende Kategorien für die Modellierung wissenschaftlicher Informationen bereitstellt. Sie dient als Grundlage für zahlreiche fachliche Ontologien wie bspw. für die OEO.

Open Energy Ontology (OEO): Die OEO ist eine energiedomänenspezifische Ontologie auf Basis der BFO und beschreibt Modelle, Daten, Einheiten, Geräte sowie Prozesse im Energiesystem. Sie ist nicht CIM-basiert.

Common Information Model (CIM): Die CIM-Ontologie ist ein umfassender, UML-basierter Standard zur Modellierung von IT- und Energiesystemobjekten sowie deren Beziehungen. Sie definiert ein gemeinsames Vokabular für zahlreiche technische Domänen.

SAREF und SAREF4ener: SAREF beschreibt Kernkonzepte für die Smart-Device-Interoperabilität, während SAREF4ener speziell Smart-Home-Energieanwendungen und deren Steuerung durch einen CEM abbildet. Beide Ontologien sind nicht CIM-basiert.

Smart Energy Domain Ontology (SARGON): SARGON stellt ein offenes semantisches Modell für Smart-Grid- und Gebäudeautomationssysteme bereit. Sie berücksichtigt CIM und IEC 61850 und bietet ein erweiterbares Begriffsmodell.

EM-KPI-Ontologie: Die EM-KPI-Ontologie modelliert Energie-, Gebäude-, Versorgungs- und Wetterdaten sowie KPIs für ein mehrstufiges Energiemanagement. Sie kombiniert KPI-Konzepte mit Energiemanagementstrukturen und setzt teilweise CIM-Begriffe ein.

Energy Resources Ontology (ERO): Die ERO beschreibt Energieressourcen und wird innerhalb der EM-KPI-Ontologie verwendet. Sie ist nur minimal dokumentiert.

DTDl Ontology for Energy Grid: Die CIM-basierte DTDL-Energieontologie beschreibt Netzkomponenten und deren Beziehungen und gliedert sie in die Bereiche Generation, Prosumer, Core und Wire. Es existieren jedoch keine OWL/RDF-Versionen für Tools wie Protégé, weshalb diese Ontologie für das Projekt idFlexNetz ausscheidet.

Semantic Sensor Network Ontology (SSN): SSN beschreibt Sensoren, Beobachtungen, Messattribute und Aktoren in strukturierter Form. Sie wird häufig in Smart-Home- und IoT-Ontologien wiederverwendet.

OpenADR Ontology: Die OpenADR-Ontologie standardisiert den Informationsaustausch für Demand-Response-Szenarien und die Integration verteilter Energieressourcen. Sie unterstützt ein sicheres, bidirektionales Messaging zwischen Versorgern und Endgeräten.

Weitere Ontologien (OEMA, BOnSAI, ThinkHOME, ProSGV3): Diese Ontologien adressieren jeweils Teilaspekte des Energiesektors, sind jedoch schlecht dokumentiert und überwiegend nur in wissenschaftlichen Arbeiten beschrieben.

Mathematical Modelling Ontology (MAMO): MAMO ist eine Ontologie zur Beschreibung mathematischer Modelle und stammt ursprünglich aus den Lebenswissenschaften. Sie wird u. a. in der EM-KPI-Ontologie zur Modellierung von Berechnungsstrukturen verwendet.

4.3.3 Einfaches Auffinden von Algorithmen und digitalen Zwillingen über den Marktplatz

Mithilfe einer passenden Ontologie muss eine Möglichkeit geschaffen werden, die vorhandenen Ressourcen (Assets, digitale Zwillinge und Algorithmen) der Teilnehmenden auf dem idFlexNetz-Marktplatz einfach und gleichberechtigt über einen Broker aufzufinden. Im Ergebnis der Suche müssen wichtige Informationen zu Assets oder Algorithmen bereitgestellt werden. Die Beschreibung des Angebots steht in der Asset-Beschreibung. Kann eine Ressource auf dem Marktplatz nicht einfach gefunden

werden, so wird sie künftig keine Relevanz haben. Beispielsweise kann die Prozesskette nur mithilfe einer guten Suche effektiv zusammengestellt werden.

4.3.4 CIM-Konformität

Die physischen Assets werden CIM-konform beschrieben.

4.3.5 Kommunikation von Daten in Legacy-Formaten über den Marktplatz

Aufzeigen von Methoden wie vorhandene Legacy-Daten (Altdaten) mithilfe einer Ontologie annotiert werden können, um diese dann versenden zu können. Falls nicht dargestellt werden kann, wie Legacy-Systeme (Altsysteme / bzw. Systeme in aktuell noch gängigen Formaten) in den Marktplatz integriert werden können, könnte die Anzahl der Teilnehmenden eine erforderliche Schwelle eventuell nicht überschreiten.

4.3.6 Empfang von Ontologie-annotierten Daten und Überführung in Legacy-Formate

Es sollte aufgezeigt werden, wie die mit der im Marktplatz verwendeten Ontologie annotierten Daten (bspw. Zeitreihen von Energiemengen) auf vorhandene Legacy-Formate (bspw. in relationalen Datenbanken) gemappt werden könnten. Sollte nicht gezeigt werden können, wie vorhandene Legacy-Systeme auf Empfangsseite verwendet werden könnten, so könnte die Anzahl der Kunden auf dem idFlexNetz-Marktplatz gering ausfallen.

4.3.7 Beschreibung einer Prognose

Mithilfe der Ontologie soll es möglich sein, eine Prognose zu beschreiben. Mithilfe der Ontologie soll es möglich sein, Prognosemodelle sowie deren Eingabeparameter und Ausgaben zu beschreiben.

4.3.8 Bewertung digitaler Güter

Mithilfe der Ontologie soll es möglich sein, Bewertungen zu annotieren, d.h. die Ontologie soll Entitäten zur Beschreibung von Bewertungen enthalten. Wenn die Ontologie dies nicht bietet, könnten Bewertungen ggf. in einem anderen Format gespeichert werden. Allerdings erschwert dies die Möglichkeit bspw. bei einer Suche nach einem passenden digitalen Zwilling, Metainformationen zur Bewertung mitzuliefern, ohne dass explizit danach gefragt wurde.

4.3.9 Einfaches Integrieren / Andocken von Ressourcen (Gütern)

Die Einstiegshürde, am idFlexNetz-Marktplatz mitzumachen, sollte möglichst gering sein. So müssen vorhandene Güter diskriminierungsfrei mithilfe der Ontologie beschrieben werden können, um am Marktplatz einen Wert zu erhalten.

4.3.10 Konvertierung zwischen verschiedenen Beschreibungsformen der gewählten Ontologie

Bei der Annotation von Daten mithilfe der gewählten Ontologie für den idFlexNetz-Marktplatz kann es beispielsweise vorkommen, dass Zeitreihen in äquidistanten Ein-Minuten-Abständen beschrieben

werden, das gesuchte Format hingegen in äquidistanten Fünfzehn-Minuten-Abständen. Hierfür sollte beschrieben werden, wie sich ein in der Ontologie beschriebenes Format in ein anderes umformatieren lässt. Eine Möglichkeit wäre, konkrete Konvertierungsdienste für unterschiedliche Daten und Datenformate anzubieten. Gibt es keine Möglichkeiten einer Konvertierung, so müsste die Ontologie, wenn bei dem Beispiel von Zeitabständen geblieben wird, bspw. auf einheitlich äquidistante Zeitabstände beschränkt werden oder die Orchestrierung/Erstellung von Prozessketten wäre nur mit identisch beschriebenen Daten möglich.

4.3.11 Beschreibung / Annotation von Algorithmen eines digitalen Zwillings

Algorithmen digitaler Zwillinge lassen sich mithilfe der Ontologie annotieren. Dieser Algorithmus muss nicht notwendigerweise eine Schnittstelle nach außen haben. Durch die Beschreibungen von Algorithmen wird der Wert des digitalen Zwillings am Marktplatz darstellbar.

4.3.12 Digitale Zwillinge

Klassen

Es müssen sich auf dem Marktplatz verschiedene Klassen digitaler Zwillinge anbieten lassen. Mit „Klasse“ ist hier, vereinfacht ausgedrückt, der Reifegrad der digitalen Zwillinge gemeint. Die einfachste Form eines digitalen Zwillings wäre ein typisches digitales Produktdatenblatt. Die ausgereifteste Form eines digitalen Zwillings wäre ein intelligenter Zwilling, der (fast) autonom handeln kann.

Kennzeichnung

Es muss möglich sein, digitale Zwillinge auf dem Marktplatz mit ihrer Klasse zu kennzeichnen. So erhält z.B. ein digitaler Zwilling der Klasse „static twin“ auf dem Marktplatz auch diese Kennzeichnung.

Überführung in ein digitales Gut

Ein digitales Gut beschreibt digitale Daten, die gehandelt werden können. Um digitale Zwillinge auf dem Marktplatz handeln zu können, müssen diese die Voraussetzungen für ein digitales Gut mitbringen:

- ein Gut kann dem Marktplatz und von dort anderen Marktteilnehmern zur Verfügung gestellt werden
- digitaler Zwilling verfügt über einen DID zur eindeutigen Identifikation im Ökosystem
- Transaktionsdaten müssen gespeichert und nachvollziehbar sein
- Der digitale Zwilling kann einem digitalen Warenkorb hinzugefügt werden

Dateninteroperabilität

Daten zwischen den digitalen Zwillingen müssen interoperabel sein, d.h. sie müssen z.B. über eine API und/oder eine gemeinsame Sprache (unterstützt durch eine Ontologie) miteinander kommunizieren können. Dies könnte z.B. über eine API und/oder eine gemeinsame Sprache oder Ontologie erfolgen. Eine fehlende Dateninteroperabilität erschwert die Zusammenarbeit digitaler Zwillinge im Ökosystem sowie die Interaktion mit Anwendungssystemen.

Datenportabilität

Mithilfe der Datenportabilität muss es innerhalb des Ökosystems z.B. möglich sein, einen digitalen Zwilling mit einem anderen digitalen Zwilling zu „verschmelzen“ oder einen digitalen Zwilling mit weiteren Daten anzureichern.

Reifegradmodell für digitale Zwillinge

Eine Möglichkeit zur Bewertung digitaler Zwillinge ist ein Reifegradmodell, das technologische Optionen für digitale Zwillinge aufzeigt. Die Bewertung ist ein Score, der über verschiedene Kategorien misst, wie viele Fähigkeiten ein digitaler Zwilling zu wichtigen Bereichen wie Kontext, Daten, Berechnung, Modell und Kontrolle mitbringt [29].

4.3.13 Marktplätze – Aktueller Stand

Für den Handel digitaler Güter sollen Marktplätze genutzt werden, um eine einfache, skalierbare Nutzung digitaler Zwillinge sowie softwarebasierter Services zu ermöglichen und eine breite Entwicklergemeinschaft einzubinden. Während App-Marktplätze wie der Apple App Store oder Google Play Store bereits etabliert sind, existieren für Anwendungen und digitale Zwillinge im Stromnetzbereich bislang nur erste Ansätze. Der Aufbau des Amazon-Marktplatzes zeigt typische technische Komponenten solcher Plattformen: Ein Elasticsearch-Cluster verteilt Such- und Analysedaten automatisch über mehrere Knoten, während Cassandra als verteilte NoSQL-Datenbank arbeitet, bei der jeder Knoten Lese- und Schreiboperationen übernehmen kann. Redis dient als schneller In-Memory-Speicher für Datenstrukturen, und MongoDB bietet sowohl replizierte Konfigurationen zur Ausfallsicherheit als auch Sharding zur Leistungssteigerung. Kafka verarbeitet Datenströme in Echtzeit und ermöglicht Ereignis- und Log-Aggregation, während Spark parallele, verteilte Berechnungen auf Daten durchführt. Ein Load Balancer verteilt schließlich Anfragen effizient auf mehrere Ressourcen, um Leistung und Stabilität des Gesamtsystems sicherzustellen.

Industrie-4.0-Marktplätze sind virtuelle Industriemarktplätze für den vollständig autonomen Handel mit Dienstleistungen sowie physischen und digitalen Waren. Hierfür müssen Industrie-4.0-Komponenten miteinander kommunizieren, Aufgaben aushandeln sowie Dienstleistungen anbieten und Zahlungen veranlassen können. Die Industrie-4.0-Komponenten fungieren dabei als unabhängige Dienstleister und Verbraucher. Die Distributed-Ledger-Technologie ermöglicht eine vertrauliche, manipulations-sichere Datenübertragung und fungiert zugleich als Zahlungssystem. Durch ECLASS ist es möglich, standardisierte Stammdaten auszutauschen, was zwingend erforderlich ist, wenn verschiedene Maschinen und Sensoren zusammenarbeiten und Daten austauschen sollen [31].

Ein KI-Marktplatz ist ein Ort, auf dem verschiedene KI-Modelle, -Algorithmen und -Dienste entwickelt und ausgetauscht werden können. Es ist geplant, dass sich Unternehmen mit Anbietern vernetzen können, die ihnen eine maßgeschneiderte KI-Lösung liefern [32].

BentoNet ist ein Marktplatz für digitale Lösungen für Smart Grids, Smart City, Aggregate, Regelenergie, Sektorenkopplung und E-Mobilität. Der Handel erfolgt durch direkte Kontaktaufnahme zwischen Anbietern und Nachfragern [33].

Datenmarktplätze erleichtern den kommerziellen B2B-Austausch von Daten und senken die

Transaktionskosten, indem sie verschiedene Datenquellen kombinieren und eine Verbindung zwischen Datenanbietern und Dateneinkäufern herstellen [34]. Abbildung 7 zeigt das Ökosystem eines Datenmarktplatzes. Die Beschriftung „Vertikale Kooperation“ bezieht sich auf das Zusammenspiel innerhalb einer Hierarchie, z.B. vom Sensor in einer Fabrik über die Fabrik bis hin zum Datenmarktplatz. Die Beschriftung „Horizontale Kooperation“ bezieht sich auf die Vernetzung entlang der Wertschöpfungskette.

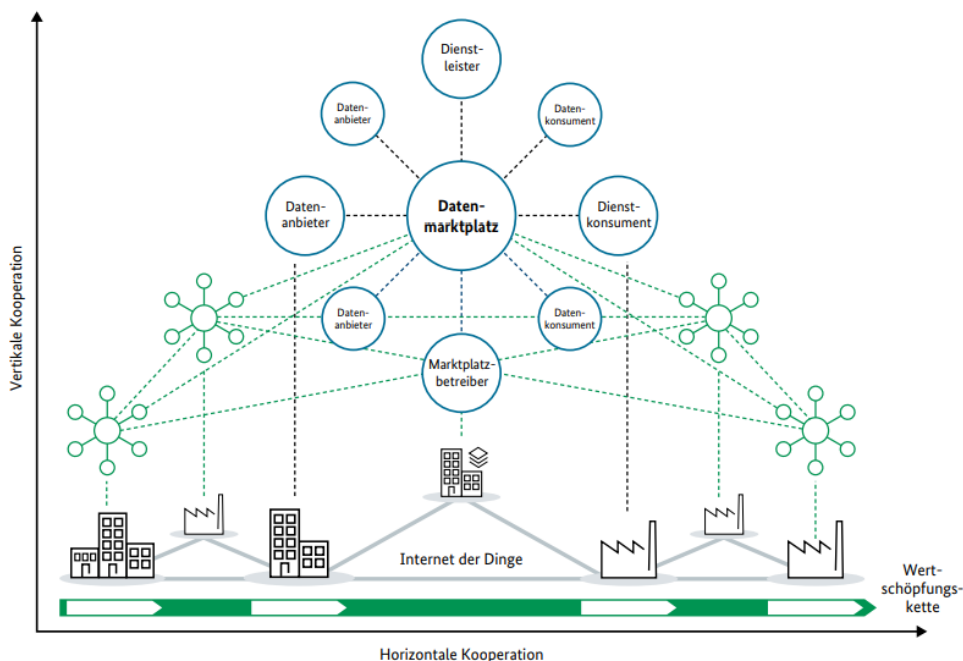


Abbildung 7: Ökosystem eines Datenmarktplatzes und seine Stakeholder

4.3.13.1 Handel von digitalen Gütern und bestehende Marktplätze

Die **SE Exchange Plattform** stellt eine Entwickler-Plattform dar, auf der Schneider Electric gemeinsam mit anderen Entwicklern neue Produkte entwickeln kann. Eine Einbindung bestehender IoT-Datenplattformen und der damit verbundenen Softwareprodukte ist möglich. Anforderungen an einen Marktplatz, die bereits auf der SE Exchange erfüllt werden, sind: Authentifizierung, Zertifizierung sowie Bezahlprozesse, Suchfunktionen und Filter. Produkte, die im SE Exchange Marktplatz verfügbar sind, umfassen zum einen Erweiterungen, Lösungen für bestehende SE Produkte wie z.B. für EcoStruxure Grid aber auch unabhängig davon.

Die **SAP Business Technology Plattform** ermöglicht sowohl die gemeinsame Entwicklung von Lösungen als auch die Einbindung von Lösungen anderer Anbieter und Entwickler. Eine einfache Einbindung in bestehende Datenplattformen ist möglich. Auch hier werden grundsätzliche Anforderungen an einen Marktplatz (u.a. Authentifizierung, Zertifizierung, Abrechnungsprozesse, Such- und Filterfunktionen) erfüllt.

4.3.13.2 Technische Anforderungen

Integrierbarkeit von Gütern: Digitale Güter müssen sich schnell in den Marktplatz integrieren lassen.

Dabei soll vor allem auf den Ansatz selbstintegrierender Güter gesetzt werden, welche mithilfe von Ontologien einfach in die Suche und das Schema des Marktplatzes integriert, werden können.

Zahlung: Der Marktplatz braucht ein System zur Verwaltung der Zahlungsströme. Hier erhalten sowohl Konsumenten als auch Anbieter Informationen bspw. zu Zahlungen oder Einnahmen. Verschiedene Zahlungsanbieter müssen in den Marktplatz integriert werden können, um Kunden unterschiedliche Bezahlungsmöglichkeiten anzubieten.

Reporting: Der Marktplatz braucht ein Reporting-System. Der Marktplatzbetreiber benötigt Informationen, um den Betrieb des Marktplatzes zu überwachen, Entscheidungen zu treffen und dessen Erfolg zu verfolgen. Der Erfolg lässt sich bspw. am Transaktionsvolumen, am Umsatz, an der Nutzeraktivität sowie an Bewertungen und Feedback messen. Ein Anbieter auf dem Marktplatz benötigt Informationen, um den Erfolg seiner Produkte zu überwachen und die Verkaufszahlen zu optimieren. Die Informationen umfassen z.B. Verkaufsleistungen, Bestandsmanagement und Transaktionshistorien. Ein Kunde auf dem Marktplatz benötigt Informationen, um seine Einkäufe nachzuverfolgen und Bestellungen zu verwalten.

4.3.13.3 Geschäftsmodelle für digitale Zwillinge und aktuelle Erlöse

Eine erste wirtschaftliche Bewertung des Status quo und die Identifikation der wirtschaftlichen Effekte und möglicher Geschäftsmodelle zeigen, dass für den Handel mit digitalen Zwillingen bereits mehrere Vermarktungsmodelle etabliert sind. Verbreitete Preismodelle umfassen dabei:

- Abo-Modelle
- Fixe Preise bzw. Einmalzahlungen
- Kostenfreie Testversionen mit anschließendem Abo
- Bereitstellung von Weiterbildungen, Trainings bzw. Implementierungsservice

Datenprodukte wie z.B. die Strompreisvorhersage für den Spotmarkt in Spanien werden für 9.000 \$ angeboten. Anbieter anderer Vorhersageprodukte geben Preise nur auf Anfrage bekannt. Insgesamt ist eine transparente Darstellung möglicher Preise und Erlösmöglichkeiten bisher nur sehr eingeschränkt gegeben. Substanzielle Erlöse lassen sich daher insbesondere durch eine große Verbreitung und die einfache Skalierung digitaler Zwillinge erzielen. Für die weitere Bewertung möglicher Erlöse ist daher auch die Bewertung des erzielbaren Nutzens für potenzielle Käufer digitaler Zwillinge ein wichtiger Schritt.

5 AP3 – Konzeption

5.1 Einleitung

Arbeitspaket 3 überführt die in AP2 erhobenen Anforderungen in ein umsetzbares Architektur- und Technologiekonzept für den idFlexNetz-Datenraum. Ziel war die Festlegung eines fachlich tragfähigen Sollbilds, das die nachfolgenden Umsetzungs- und Erprobungsarbeiten in AP4 und AP5 strukturiert. Im Mittelpunkt standen zwei Klassen digitaler Güter:

1. digitale Zwillinge physischer Assets sowie
2. digitale Modelle, Prognosen und Datenprodukte, die im Netzbetrieb, in der Netzplanung und im Asset Management genutzt werden können.

Das Konzept wurde so entwickelt, dass es mit bestehenden Systemen der Energiewirtschaft integrierbar ist, um später eine verhältnismäßig einfache Adaption zu ermöglichen, und offen genug für weitere Teilnehmer, die im Laufe der Zeit an einem solchen Marktplatz teilnehmen möchten. In dem Konzept wurden zwei Anwendungsfälle für das Zusammenwirken mit dem Marktplatz betrachtet:

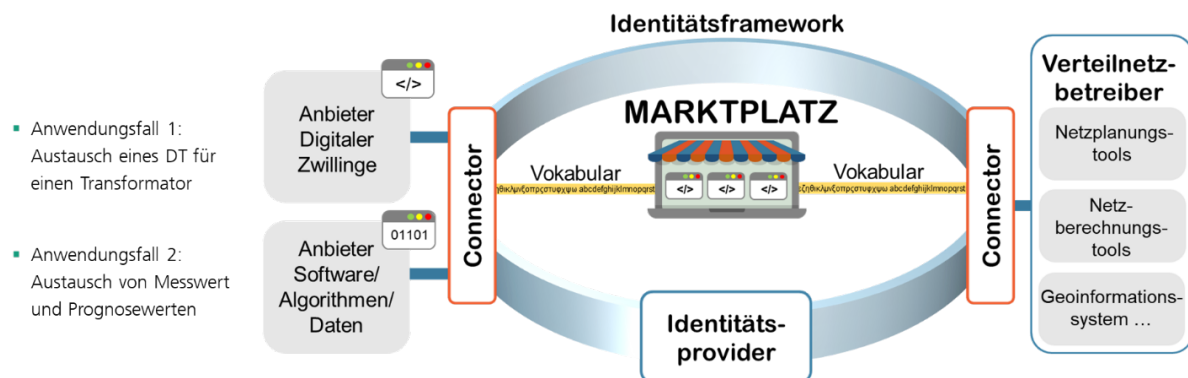


Abbildung 8: Anwendungsfälle für die Demonstration im Gesamtkonzept

Da das Konzept offen für weitere Akteure und Anwendungsfälle sein soll, wurden offene ökosystembasierte Basislösungen aus Gaia-X-Projekten wie Catena-X oder Manufacturing-X untersucht, um neue Marktteilnehmer, zusätzliche Datenquellen und spätere Datenraumverbünde ohne grundlegenden Umbau aufnehmen zu können.

Ein wichtiges konzeptionelles Fundament des idFlexNetz-Projektes bildeten die Prinzipien der Datensouveränität. Datensouveränität bedeutet, dass Datenbereitsteller die Kontrolle über ihre Daten behalten und selbst entscheiden können, wem sie welche Daten zu welchen Bedingungen zur Verfügung stellen. Dies steht im Gegensatz zu zentralisierten Ansätzen, bei denen Daten an eine zentrale Plattform übertragen werden und der Datenbereitsteller die Kontrolle verliert. Bei der Konzeptentwicklung wurden zudem Interoperabilität, Sicherheit und ökonomische Aspekte berücksichtigt.

Daraus ergab sich ein föderiertes Zielbild. Daten und digitale Güter verbleiben grundsätzlich bei den jeweiligen Anbietern. Der Datenraum ist ein Marktplatzsystem, das von allen Akteuren auf Basis der Prinzipien digitaler Souveränität und der Europäischen Datenstrategie betrieben wird und nicht nur von einem einzelnen Akteur. Im idFlexNetz-Projekt wurde eine föderale Architektur realisiert, bei der jeder Akteur einen eigenen Konnektor betreibt, der als Schnittstelle zum Datenraum dient. Die

Konnektoren kommunizieren direkt miteinander ohne eine zentrale Vermittlungsinstanz. Dabei wurden Services für bestimmte Funktionen wie die Suche nach Datenquellen und die Verwaltung von Identitäten vorgesehen.

Der Datenraum schafft so einen standardisierten Rahmen für Auffindbarkeit, Vertrauensbildung, Vertragsanbahnung, kontrollierten Datentransfer und nachgelagerte Integration in Fachanwendungen. Der im Bericht verwendete Begriff „Marktplatz“ ist daher als Such-, Auswahl- und Interaktionsschicht zu verstehen, nicht als zentrale Datenhaltung.

Die Konzeption orientiert sich an offenen, in Europa entwickelten Standards. So wird die European Business Wallet als europäische Zielarchitektur für Unternehmensidentitäten berücksichtigt, ohne die Projektarchitektur von einer einzelnen proprietären Wallet-Implementierung abhängig zu machen. Dieselbe Vorgehensweise wurde auf die anderen Projektkomponenten wie Kataloge, Mappings und Backend-Anbindungen angewandt, um sie an offenen Standards auszurichten.

5.2 Konzeptionelle Grundlagen

5.2.1 Zielbild und Leitprinzipien

Das konzeptionelle Zielbild von idFlexNetz ist ein sicherer und interoperabler Energiedatenraum für den Austausch digitaler Güter zwischen Netzbetreibern, Anlagenherstellern, Installateuren, Modellanbietern und weiteren Marktteilnehmern. Die Architektur wurde so ausgelegt, dass sie sowohl technische als auch organisatorische Anforderungen abbildet. Maßgeblich sind dabei folgende Leitprinzipien:

1. **Datensouveränität:** Jeder Teilnehmer behält die Kontrolle über seine Daten, Modelle und digitalen Zwillinge. Zugriffe erfolgen nur auf Basis klar definierter Nutzungsregeln und nach expliziter Freigabe.
2. **Föderation statt Zentralisierung:** Der Datenraum verbindet autonome Systeme. Er ersetzt deren Fachlogik und Datenhaltung nicht. Dadurch bleibt die betriebliche Verantwortung bei den jeweiligen Akteuren.
3. **Standardbasierte Interoperabilität:** Für Repräsentation, Semantik, Identität und Datentransfer werden offene Standards bevorzugt. Dies reduziert Integrationskosten und senkt das Risiko proprietärer Abhängigkeiten.
4. **Security und Compliance by Design:** Identitätsprüfung, Autorisierung, Nachvollziehbarkeit, Widerruf und Herkunftsnachweise werden nicht nachträglich ergänzt, sondern als Teil der Grundarchitektur integriert.
5. **Retrofitfähigkeit:** Bestehende Systeme und Legacy-Formate müssen anschlussfähig bleiben. Die Architektur nutzt deshalb Konnektoren, Adapter und semantische Mappings, statt einheitliche Backend-Systeme zu erzwingen.
6. **Trennung von Angebotsinformationen und Nutzdaten:** Für Suche und Auswahl werden nur die erforderlichen Metadaten veröffentlicht. Sensible Betriebsdaten, Zeitreihen oder vollständige digitale Zwillinge werden erst nach Auswahl, Policy-Prüfung und Vertragsabschluss übertragen.

Diese Leitprinzipien adressieren die in AP2 identifizierten Anforderungen an Auffindbarkeit, Vertrauenswürdigkeit, geringe Einstiegshürden sowie fachliche Anschlussfähigkeit. Zugleich schaffen sie die Grundlage dafür, dass die in AP4 prototypisch umgesetzten Anwendungsfälle nicht als isolierte Demonstratoren, sondern als wiederverwendbare Muster für einen skalierbaren Energiedatenraum

verstanden werden können.

Neben dem technischen Datenaustausch muss die Architektur auch Nutzungsrechte, Verantwortlichkeiten und Qualitätsaussagen zu digitalen Gütern übermitteln. Für idFlexNetz sind daher sowohl die Übertragung eines Datenobjektes als auch die menschen- und maschinenlesbare und -interpretierbare Beschreibung, wer dieses Objekt bereitstellt, in welchem Kontext es gültig ist, welche Qualität es besitzt und unter welchen Bedingungen es genutzt werden darf, relevant.

5.2.2 Fachliches Objektmodell und Rollen

Fachlich unterscheidet idFlexNetz zwischen physischen Assets, deren digitalen Repräsentationen, Datenprodukten und algorithmischen bzw. modellbasierten Services. Diese Unterscheidung ist wichtig, weil sich daraus unterschiedliche Lebenszyklen, Verantwortlichkeiten und Integrationspfade ergeben. Ein Hersteller stellt Typ- und/oder Instanzzwillinge bereit. Für nach Kundenwunsch produzierte Produkte (Engineered to Order) werden Instanzzwillinge entwickelt und bereitgestellt. Ein Installateur oder Netzbetreiber ergänzt diese Typ- oder Instanzzwillinge um z.B. spezifische Daten zum Aufstellungsort. Ein Prognoseanbieter verarbeitet wiederum Mess- oder Wetterdaten und erzeugt daraus ein neues digitales Gut in Form einer Prognose oder eines Modells.

Die Rollen im IKT-Ökosystem werden aus Gründen der Praktikabilität einfach gehalten, damit die Architektur sowohl für Experten als auch für nicht fachlich spezialisierte Stakeholder verständlich bleibt. Zentrale Rollen sind der Anbieter eines digitalen Guts, der nachfragende Nutzer, ein Katalog- oder Broker-Dienst zur Auffindbarkeit, Issuer- und Verifier-Funktionen für Vertrauensnachweise sowie die jeweiligen Backend-Systeme, in denen die fachliche Verarbeitung stattfindet. Tabelle 10 fasst die wichtigsten Klassen digitaler Güter im Projektkontext zusammen.

Tabelle 10: Klassen digitaler Güter, deren Kerninhalt und typische Nutzung im Projektkontext

Klasse des digitalen Gutes	Kerninhalt	Typische Anbieterrolle	Typische Nutzung im Projekt
Typzwilling	Technische Typbeschreibung, Dokumente, Schnittstellen, Semantik.	Hersteller / OEM	Auswahl geeigneter Betriebsmittel, Vorprüfung.
Instanzzwilling	Konkrete Asset-Ausprägung mit Standort-, Anlagen- oder Netzbezug.	Installateur, Betreiber, VNB	Netzanschluss, Netzsimulation, Betrieb, Assetmanagement
Mess- und Zustandsdaten	Zeitreihen, Messwerte, Ereignisse.	Betreiber, VNB	Prognose, Plausibilisierung, Monitoring.
Modell- oder Prognosedienst	Verarbeitung mit definierten Ein-/Ausgängen und Qualitätswerten.	Software-/Modellanbieter	Netzstatus- und Einspeiseprognozen.

In dem Projekt haben wir zwischen Typ und Instanz unterschieden:

- Für die Netzplanung reicht häufig ein herstellerbezogener Typzwilling als Ausgangspunkt.
- Für den Netzbetrieb und die Integration in operative Prozesse werden hingegen zusätzliche Instanzinformationen zu einer Seriennummer benötigt, etwa Standort, installierte Leistung, Parametrierung, Betriebszustand oder Historie. Das Konzept sieht deshalb vor, beide Sichten trennbar, aber miteinander verknüpfbar zu behandeln.

Ein weiterer Aspekt der Einführung kryptographischer Mechanismen ist die Bewertung der Vertrauenswürdigkeit einer Aussage: Ein digitaler Zwilling oder eine Prognose wird nicht allein dadurch

vertrauenswürdig, dass er technisch übertragbar ist und dass Daten in einem bestimmten Format vorliegen, denn bösartige Akteure können Daten manipulieren, oder fehlerhafte Prozesse können sie verfälschen. Die Vertrauenswürdigkeit entsteht erst durch zusätzliche Angaben zur Herkunft, zur Rolle des Anbieters, zu Zertifizierungen, zu Bewertungsmetriken oder zu den Nutzungsbedingungen. Diese Angaben sollen nicht nur als einfache Datensätze dokumentiert, sondern auch als strukturierte, maschinenlesbare und kryptographisch verifizierbare Nachweise behandelt werden.

5.2.3 Identitäts-, Vertrauens- und Governance-Modell

Das Identitätsmodell des idFlexNetz-Datenraums muss mehrere Ebenen abdecken. Relevante Identitätsträger sind juristische Personen, technische Systeme, Dienste, Konnektoren und – je nach Anwendungsfall – auch digitale Güter selbst. Diese Ebenen dürfen fachlich nicht vermischt werden. Eine Unternehmensidentität begründet beispielsweise noch keinen Zugriff auf jedes Asset. Umgekehrt kann ein Asset zwar eindeutig identifiziert sein, aber ohne nachgewiesene Rolle des anfragenden Akteurs nicht freigegeben werden.

Konzeptionell wurde deshalb ein vertrauensbasiertes Onboarding-Modell vorgesehen. Teilnehmer des Ökosystems werden zunächst als Organisationen identifiziert. Anschließend erhalten sie prüfbare Nachweise, die von vertrauenswürdigen Ausstellern stammen und in einer Wallet verwaltet werden. Solche Nachweise können die rechtliche Identität, die Marktrolle, eine Mitgliedschaft, den Herstellerstatus, Konformitätsaussagen, KYC-/Sanktionsprüfungen oder weitere domänenspezifische Berechtigungen abdecken. Für die Zugriffsentscheidung im Datenraum reicht eine Login-Authentifizierung nicht aus, stattdessen werden weitere kontextbezogene digitale Berechtigungsnachweise in Form von Verifiable Credentials geprüft.

Für natürliche Personen bleibt der europäische EUDI-Kontext relevant. Für juristische Personen und organisationsbezogene B2B-Prozesse wird die European Business Wallet (EUBW) als europäische Zielarchitektur berücksichtigt. Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung ist dieser Rahmen auf EU-Ebene noch in weiterer regulatorischer und technischer Konkretisierung. Für idFlexNetz ist dies kein Widerspruch, sondern eine Designvorgabe: Das Projekt benötigt eine EUBW-kompatible Unternehmens-Wallet-Logik, ohne sich frühzeitig auf eine proprietäre Zwischenlösung festzulegen.

Technisch basiert das Identitätsmodell auf dezentral auflösbaren Identifikatoren und verifizierbaren Nachweisen. Für die prototypische Auflösung ist eine pragmatische webbasierte DID-Variante zweckmäßig. Das zugrunde liegende Verifikationsregister wird technologieoffen behandelt. Ein solches Register kann webbasiert, registerbasiert oder – sofern in einer Vertrauensdomäne sinnvoll – auch DLT-basiert umgesetzt sein. Im Projekt haben wir webbasierte Mechanismen umgesetzt.

Zum Governance-Modell gehört ferner die Festlegung von Trust Anchors, Ausstellerrollen, Prüfpfaden und Widerrufsmechanismen. Autorisierung und Herkunftsnachweis werden nicht als einmalige Vorabprüfung verstanden. Sie müssen im Betrieb wiederholt und automatisiert verifizierbar sein. Daraus folgt die Notwendigkeit von Status- und Revokationsprüfungen, nachvollziehbaren Transaktionsprotokollen und klar definierten Verantwortlichkeiten dafür, wer welche Aussage über wen oder was machen darf.

Praktische Umsetzung – Vertrauen, Vertrauensketten und Datenraumkonnektoren

Ein Vertrauensmodell besteht aus Richtlinien, Standards, Prozessen und Kriterien zur Einhaltung, die von Beteiligten eines Ökosystems befolgt werden. Es dient dazu, gegenseitiges Vertrauen zu schaffen, die Sicherheit von Autorisierungsmechanismen sowie die Echtheit verifizierbarer Aussagen oder Zertifikate zu gewährleisten. Vertrauensmodelle werden basierend auf den regulatorischen und wirtschaftlichen Bedingungen einer spezifischen Anwendungsdomäne und den jeweiligen Anwendungsfällen entwickelt.

Kontroll- und Datenebene sind Schlüsselkonzepte für sichere Datenzugänge und den sicheren Datenaustausch bei digitalen Zwillingen. Die Kontrollebene steuert die Zugangsberechtigungen und Sicherheitsrichtlinien, während die Datenebene den eigentlichen Datenverkehr und -austausch handhabt. Verifiable Credentials sind digitale Zertifikate, die die Echtheit und Integrität von Daten bescheinigen.

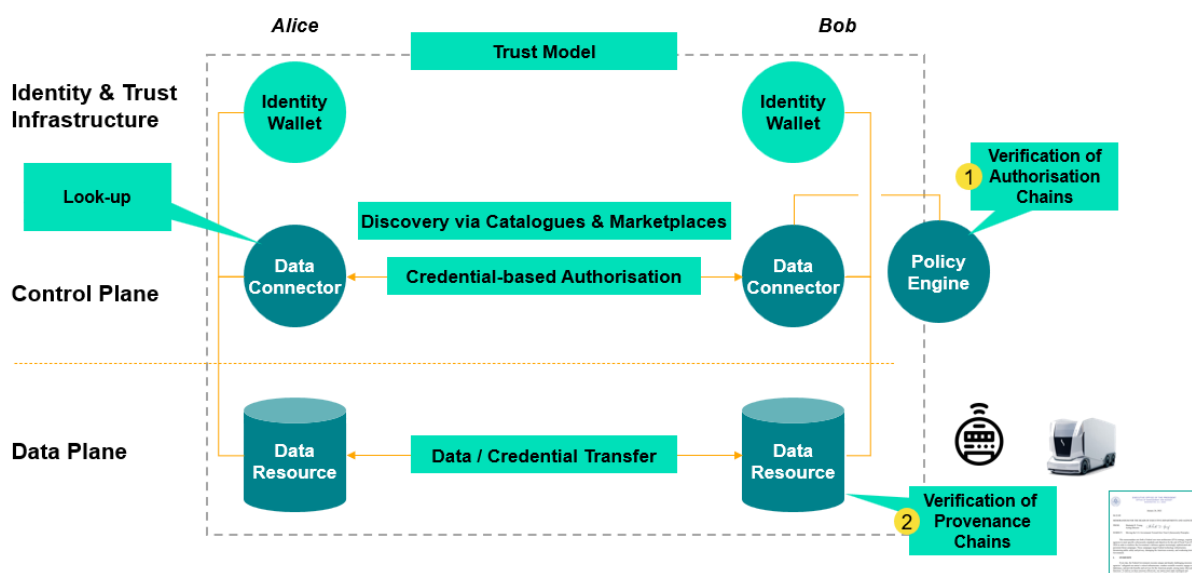


Abbildung 9: Überprüfung von Vertrauensketten auf der Kontroll- und Datenebene

Autorisierungs-Credentials auf der Kontrollebene sichern API-Endpunkte und stellen sicher, dass nur berechnigte Akteure auf Daten zugreifen, was für kritische Infrastrukturen essenziell ist. Herkunftsnachweise verifizieren, ob Daten authentisch sind und tatsächlich von einer vertrauenswürdigen Quelle stammen. Autorisierungsketten werden von Autorisierungsmechanismen auf der Kontrollebene überprüft. Diese Ketten sind Folgen von Berechtigungen, die bestimmen, wer auf bestimmte Daten oder Ressourcen zugreifen darf. Sie stellen sicher, dass insbesondere in kritischen Infrastrukturen nur autorisierte Personen oder Systeme Zugriff erhalten. Durch die Verwendung von Autorisierungsketten lassen sich komplexe Zugriffssteuerungen effektiv verwalten und die Sicherheit von Daten und Systemen gewährleisten.

Auf der Datenebene stellen verifizierbare Herkunftsnachweise sicher, dass die Daten authentisch sind. Sie ermöglichen die Überprüfung, ob Stammdaten oder Betriebshandbücher tatsächlich vom Hersteller stammen oder ob Zertifikate über eine Anlage vom TÜV stammen. Dies schafft Transparenz und Sicherheit, indem es bestätigt, dass die Informationen echt sind und von einer vertrauenswürdigen Quelle stammen, was für die Entscheidungsfindung und Compliance-Kontrollen unerlässlich ist.

Herkunftsnachweisketten sind essenziell, um die Authentizität und Integrität von Daten in digitalen Zwillingen zu sichern. Sie bestehen aus einer Abfolge verifizierbarer Credentials, die von einer anerkannten Quelle, dem Trust Anchor, ausgehen und die Herkunft und Echtheit jedes Elements der Kette bestätigen. Diese Kette bildet einen vertrauenswürdigen Pfad vom Ursprung der Daten bis zum Endnutzer, wobei jeder Schritt transparent und nachprüfbar ist. Dies gewährleistet, dass nur authentische, verifizierte Daten für Entscheidungen und Prozesse genutzt werden und schützt so vor Manipulation oder Fehlinformationen.

Eine Vertrauenskette ist ein Mechanismus zur Herstellung von Vertrauen, bei dem die Autorisierung oder ein Herkunftsnachweis von Identitäten, Prozessen oder Systemen durch eine Reihe vertrauenswürdiger autorisierter Entitäten bis hin zu einem allgemein bekannten (well-known) Trust Anchor einer Vertrauensdomäne erfolgt. Beispiele für Vertrauensdomänen sind der Bund, eIDAS, TÜV, dena, oder BDEW Codes & Services.

5.2.4 Semantik, Datenmodelle und Bewertungslogik

Ein Datenraum erzeugt fachlichen Mehrwert immer dann, wenn gleichzeitig Daten transportiert und fachlich bzw. semantisch auch gleich interpretiert werden können. Im Energiesektor ist dies anspruchsvoll, weil unterschiedliche Datenwelten zusammengeführt werden müssen: Netzmodelle, technische Stammdaten, AAS-Submodelle, Zeitreihen, Wetterdaten, Prognosen, Dokumente sowie marktbezogene Austauschformate. Die Konzeption unterscheidet deshalb zwischen syntaktischer und semantischer Interoperabilität.

Für die standardisierte digitale Repräsentation physischer Assets wird die Asset Administration Shell verwendet. Für domänenspezifische Begriffe und Beziehungen wird eine energiewirtschaftliche Ontologie benötigt. Hierzu wurde die Open Energy Ontology (OEO) für Energiesysteme untersucht, die Geräte, Prozesse, Modelle, Zeitreihen, Einheiten und Zusammenhänge im Energiesystem strukturiert beschreibbar macht.

Für netzbezogene Struktur- und Austauschmodelle wurde das Common Information Model (CIM) verwendet, insbesondere wenn Zielsysteme wie PowerFactory oder andere Netzberechnungswerkzeuge eingebunden werden.

Die Konzeption sieht daher kein Datenmodell für alle Zwecke vor. Stattdessen werden mehrere komplementäre Sichten kombiniert: Im Projekt wurden OEO und CIM als fachliche Semantiken verwendet. JSON-LD diente als Struktur für semantisch annotierte Austauschobjekte und Verifiable Credentials im Datenraum. AAS wurde ergänzend im Backend-System verwendet.

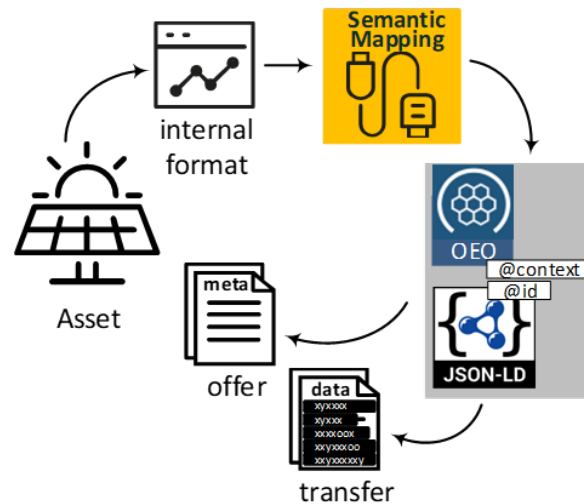


Abbildung 10: Konzeption vom Asset zum Datenmodell

Für Asset-Modelle und Systemprognosen reicht eine rein technische Beschreibung in Form statischer Stammdaten nicht aus. Erforderlich sind zusätzliche Angaben zu Eingangs- und Ausgangsgrößen, zeitlicher Auflösung, Zeitreihen, Gültigkeitsbereich, Version, Aktualität, Trainings- oder Kalibrierungsbezug sowie Metriken. Historische Mess- und Ereignisdaten können als digitales Produktgedächtnis eines Assets dienen. Dadurch entsteht die Grundlage, Prognosemodelle gezielt auszuwählen, anlagenspezifisch zu trainieren oder ihre Eignung für einen konkreten Netzbetriebszweck nachvollziehbar zu bewerten.

Beispiel PV-Prognose

Die für den PV-Prognose-Algorithmus benötigten Daten gliedern sich grob in (a) Ist-Daten, historische Ist-Daten und Stammdaten einer PV-Anlage und (b) Wetterdaten (Wettervorhersage, historische Wettervorhersagen, an der Anlage gemessene Ist-Daten und an der Anlage gemessene historische Daten).

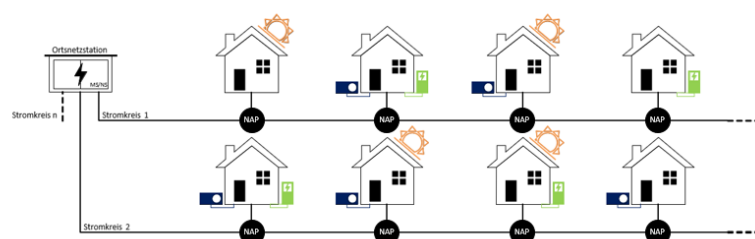


Abbildung 11: Anwendungsfall PV-Anlage – Digitale Zwillinge der typischen Komponenten im Ortsnetz vereinfachen Netzplanung und Genehmigungsprozesse

Als Eingabedaten für den Algorithmus werden die in Tabelle 11 aufgeführten Daten einer PV-Anlage (bspw. Ist-Daten, historische Ist-Daten, Stammdaten) benötigt.

Tabelle 11: Benötigte Eingabedaten für die PV-Prognose einer PV-Anlage

Datenursprung	Messwert/ Datenpunkte	Einheit	Eigenschaft	Messge- nauigkeit	Meldeintervall	Signal (analog / digital)
PV-Anlagen (Ist-Daten)	Erzeugung / Einspeisung	kWh		typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
PV-Anlagen (Ist-Daten)	Drosselung	%		typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
PV-Anlagen (Ist-Daten)	Modultemperatur	°C		typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
PV-Anlagen (historische Ist-Daten)	Erzeugung / Einspeisung	kWh	Zeitraum: letzten x Monate	typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
PV-Anlagen (historische Ist-Daten)	Drosselung	%	Zeitraum: letzten x Monate	typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
PV-Anlagen (historische Ist-Daten)	Modultemperatur	°C	Zeitraum: letzten x Monate	typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
PV-Anlagen (Stammdaten)	Standort	Straße und Hausnummer oder Flurstück, PLZ und Ort oder Gemarkung, Bundesland Breitengrad, Längengrad, Höhe über Normalnull		typisch		digital
PV-Anlagen (Stammdaten)	Größe	[m ²], Anzahl Module		typisch		digital
PV-Anlagen (Stammdaten)	installierte Nennleistung (PV- Peak)	kW_p		typisch		digital
PV-Anlagen (Stammdaten)	Abweichung von der Südausrichtung	°		typisch		digital
PV-Anlagen (Stammdaten)	Dachneigung	°		typisch		digital
PV-Anlagen (Stammdaten)	Modultyp			typisch		digital
PV-Anlagen (Stammdaten)	Wechselrichter			typisch		digital

Des Weiteren werden für den PV-Prognose-Algorithmus als Eingabe die in Tabelle 12 aufgeführten Wetterdaten (Wettervorhersage, historische Daten Wettervorhersage, an der Anlage gemessene Ist-Daten, an der Anlage gemessene historische Ist-Daten) benötigt.

Tabelle 12: Benötigte Wetterdaten für die PV-Prognose einer PV-Anlage

Datenursprung	Messwert/ Datenpunkte	Einheit	Eigenschaft	Messge- nauigkeit	Meldeintervall	Signal (analog / digital)
Wetterdaten Wettervorhersage	Globalstrahlung (Global Horizontal Irradiance (GHI))	W/m ²	Zeitraum: für den nächsten Tag / für die nächsten 3 Tage	typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
Wetterdaten Wettervorhersage	Diffuse Strahlung (Diffuse Horizontal Irradiance (DFI))	W/m ²	Zeitraum: für den nächsten Tag / für die nächsten 3 Tage	typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
Wetterdaten Wettervorhersage	Temperatur	°C	Zeitraum: für den nächsten Tag / für die nächsten 3 Tage	typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
Wetterdaten Wettervorhersage	Windgeschwindigkeit	m/s	Zeitraum: für den nächsten Tag / für die nächsten 3 Tage	typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
Wetterdaten (historische Daten - Wettervorhersage)	Globalstrahlung (Global Horizontal Irradiance (GHI))	W/m ²	Zeitraum: letzten x Monate	typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
Wetterdaten (historische Daten - Wettervorhersage)	Diffuse Strahlung (Diffuse Horizontal Irradiance (DFI))	W/m ²	Zeitraum: letzten x Monate	typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
Wetterdaten (historische Daten - Wettervorhersage)	Temperatur	°C	Zeitraum: letzten x Monate	typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
Wetterdaten (historische Daten - Wettervorhersage)	Windgeschwindigkeit	m/s	Zeitraum: letzten x Monate	typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
Wetterdaten (Ist-Daten - an der Anlage gemessene Daten)	Globalstrahlung (Global Horizontal Irradiance (GHI))	W/m ²		typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
Wetterdaten (Ist-Daten - an der Anlage gemessene Daten)	Diffuse Strahlung (Diffuse Horizontal Irradiance (DFI))	W/m ²		typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
Wetterdaten (Ist-Daten - an der Anlage gemessene Daten)	Globalstrahlung in der Ebene des PV- Moduls	W/m ²		typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
Wetterdaten (Ist-Daten - an der Anlage gemessene Daten)	Temperatur	°C		typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
Wetterdaten (Ist-Daten - an der Anlage gemessene Daten)	Windgeschwindigkeit	m/s		typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
Wetterdaten (historische Ist-Daten - an der Anlage gemessene Daten)	Globalstrahlung (Global Horizontal Irradiance (GHI))	W/m ²	Zeitraum: letzten x Monate	typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
Wetterdaten (historische Ist-Daten - an der Anlage gemessene Daten)	Diffuse Strahlung (Diffuse Horizontal Irradiance (DFI))	W/m ²	Zeitraum: letzten x Monate	typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
Wetterdaten (historische Ist-Daten - an der Anlage gemessene Daten)	Globalstrahlung in der Ebene des PV- Moduls	W/m ²	Zeitraum: letzten x Monate	typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
Wetterdaten (historische Ist-Daten - an der Anlage gemessene Daten)	Temperatur	°C	Zeitraum: letzten x Monate	typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital
Wetterdaten (historische Ist-Daten - an der Anlage gemessene Daten)	Windgeschwindigkeit	m/s	Zeitraum: letzten x Monate	typisch	15-Minuten-Intervall, (1-Stunde-Intervall, 3-Stunden-Intervall)	digital

Der PV-Prognose-Algorithmus liefert als Ausgabe die in der folgenden Tabelle aufgeführten Daten:

Tabelle 13: Ausgabedaten der PV-Prognose für eine PV-Anlage

Datenursprung	Messwert/ Datenpunkte	Einheit	Eigenschaft	Messge- nauigkeit	Meldeintervall	Signal (analog / digital)
Vorhersage Erzeugung PV- Anlage	Erzeugung / Einspeisung	kWh	Prognose	keine	Intervall wie Ursprungsdaten	digital

5.3 Architektur

5.3.1 Mehrschichtige Architektur

In der idFlexNetz-Architektur werden fachliche Verantwortungen, Sicherheitsfunktionen und technische Schnittstellen voneinander getrennt. Die Architektur vermeidet die Abhängigkeit von zentralen Plattformkomponenten. Stattdessen koppelt sie Komponenten, unter Kontrolle der Marktplatzteilnehmer, über definierte Protokolle wie Datenraum-Protokolle, Policies und sichere Identitäten. Dies erhöht die Erweiterbarkeit und reduziert die Abhängigkeit einzelner Teilnehmer voneinander.

Die Übersicht in Tabelle 14 beschreibt die wesentlichen Architekturebenen und deren Aufgaben.

Tabelle 14: Architekturebenen mit Hauptaufgabe und essenziellen Konzeptkomponenten

Ebene	Hauptaufgabe	Essenzielle Konzeptkomponenten
Backend	Fachdaten erzeugen, puffern und nutzen.	EMS/EDM, AAS-Umgebung, Modellservices, Feldschnittstellen.
Semantik	Digitale Güter standardisiert beschreiben.	Semantische IDs, OEO, CIM/CGMES.
Konnektor/ Transfer	Katalog, Vertrag, Policy und Datentransfer ausführen.	EDC, Kontroll- und Datenebene, Erweiterungen.
Katalog	Angebote auffindbar machen.	Broker/Katalog.
Trust	Onboarding und Nachweise prüfen.	Wallets, DIDs, VCs, Issuer/Verifier.
Fachanwendungen	Daten in Fachprozesse übernehmen und verarbeiten.	PowerFactory, Prognose-Services, Frontends, betriebliche Prozesse.

Einfache Aggregations-, Plausibilisierungs- oder Pufferschritte können anlagen- oder standortnah erfolgen. Rechenintensive Prognosen, Katalogdienste, semantische Auswertungen oder Netzsimulationen können in zentralen Backend-Systemen oder in kontrollierten Cloud-Umgebungen betrieben werden. Das Konzept trennt daher nicht starr zwischen Edge und Cloud, sondern beschreibt definierte Verantwortungs- und Datenübergänge.

Wesentlich ist ferner, dass der „Marktplatz“ logisch aus Katalog-, Vertrauens- und Interaktionsdiensten besteht. Er verwaltet keine vollständigen Betriebsdaten. Er verweist auf Angebote, Endpunkte und Metadaten. Damit bleibt die Architektur anschlussfähig an souveräne Datenraumprinzipien und zugleich wirtschaftlich handhabbar.

5.3.2 Kernprozesse im Datenraum

Onboarding und Vertrauensaufbau. Ein Teilnehmer wird als Organisation identifiziert, erhält eine Wallet und verfügt über verifizierbare Nachweise. Diese Nachweise bilden die Grundlage für spätere Policy-Entscheidungen im Datenraum.

Publikation eines Angebots. Der Anbieter erstellt aus seinen internen Daten ein veröffentlichungsreifes Angebot. Dazu werden Discovery-Metadaten erzeugt, semantisch annotiert und im Katalog publiziert. Das eigentliche digitale Gut verbleibt zunächst im Verantwortungsbereich des Anbieters.

Suche und Auswahl. Der Nachfrager durchsucht den Katalog nach geeigneten Gütern. Die Auswahl

kann nach Asset-Klasse, technischen Merkmalen, Zielanwendung, Qualitätswerten, Zeitauflösung, Semantik, Hersteller oder weiteren Kriterien erfolgen.

Vertragsbezug und Policy-Prüfung. Vor der eigentlichen Übertragung werden die Nutzungsbedingungen geprüft. Zugriffsentscheidungen berücksichtigen sowohl statische Vertragsregeln als auch dynamisch vorgelegte Nachweise aus der Wallet des anfragenden Akteurs.

Datentransfer und Mapping. Nach erfolgreicher Prüfung wird das digitale Gut oder das Datenprodukt übertragen. Dabei können interne Formate des Anbieters in standardisierte Transferobjekte überführt werden. Ebenso kann auf Empfängerseite eine Rückführung in das jeweils benötigte Zielformat erfolgen.

Integration in Fachanwendungen. Das empfangene Objekt wird in nachgelagerten Systemen genutzt, etwa in einem Netzberechnungstool, einer Prognosepipeline, einem Asset-Management-Prozess oder einer Benutzeroberfläche. Erst an dieser Stelle entsteht der unmittelbare betriebliche Nutzen.

5.3.3 Architektur für die priorisierten Anwendungsfälle

Im Anwendungsfall „Digitaler Zwilling“ beginnt die Kette typischerweise beim Hersteller. Dieser stellt einen Typ- oder Instanzzwilling für das Betriebsmittel oder eine Anlage bereit. Der Zwilling wird in einer AAS-Umgebung geführt und ist über standardisierte Schnittstellen referenzkonform verknüpft. Ein Installateur oder Netzbetreiber kann den Zwilling nach erfolgreicher Suche und Policy-Prüfung abrufen, instanzspezifisch anreichern und anschließend in ein Zielsystem wie PowerFactory überführen. Für die Netzplanung muss neben der AAS-Sicht auch eine netztechnisch verwertbare Repräsentation verfügbar sein, wie z. B. in CIM/CGMES.

Für den Anwendungsfall „Messwerte und Prognosen“ geht die Kette typischerweise von einem Betreiber oder Netzbetreiber aus, der Messwertzeitreihen bereitstellt. Diese Daten werden semantisch beschrieben und als Datenprodukt bereitgestellt. Ein Prognoseanbieter kann die Zeitreihen nach Freigabe beziehen, daraus Prognosen erzeugen und diese wiederum als eigenständiges digitales Gut veröffentlichen. Der Netzbetreiber oder ein anderes Fachsystem kann die Prognose anschließend in die operative Umgebung zurückübernehmen. Konzeptionell entstehen damit zwei getrennte, aber miteinander verknüpfte Angebotsketten: eine für Eingangsdaten und eine für das darauf aufbauende Prognoseprodukt.

Die Konzeption berücksichtigt ausdrücklich die in der Energiewirtschaft bestehende heterogene Softwarelandschaft. Ein Hersteller muss nicht dieselben Modelle oder Datenformate verwenden wie ein Netzbetreiber. Der Datenraum dient gerade dazu, diese Heterogenität durch standardisierte Beschreibungen, Vertragslogik und Mappings beherrschbar zu machen.

Systemarchitektur im idFlexNetz Datenraum Akteure; EDC-Extensions für Anwendungssystem; Rollen - Use Case – PV-Anlage -

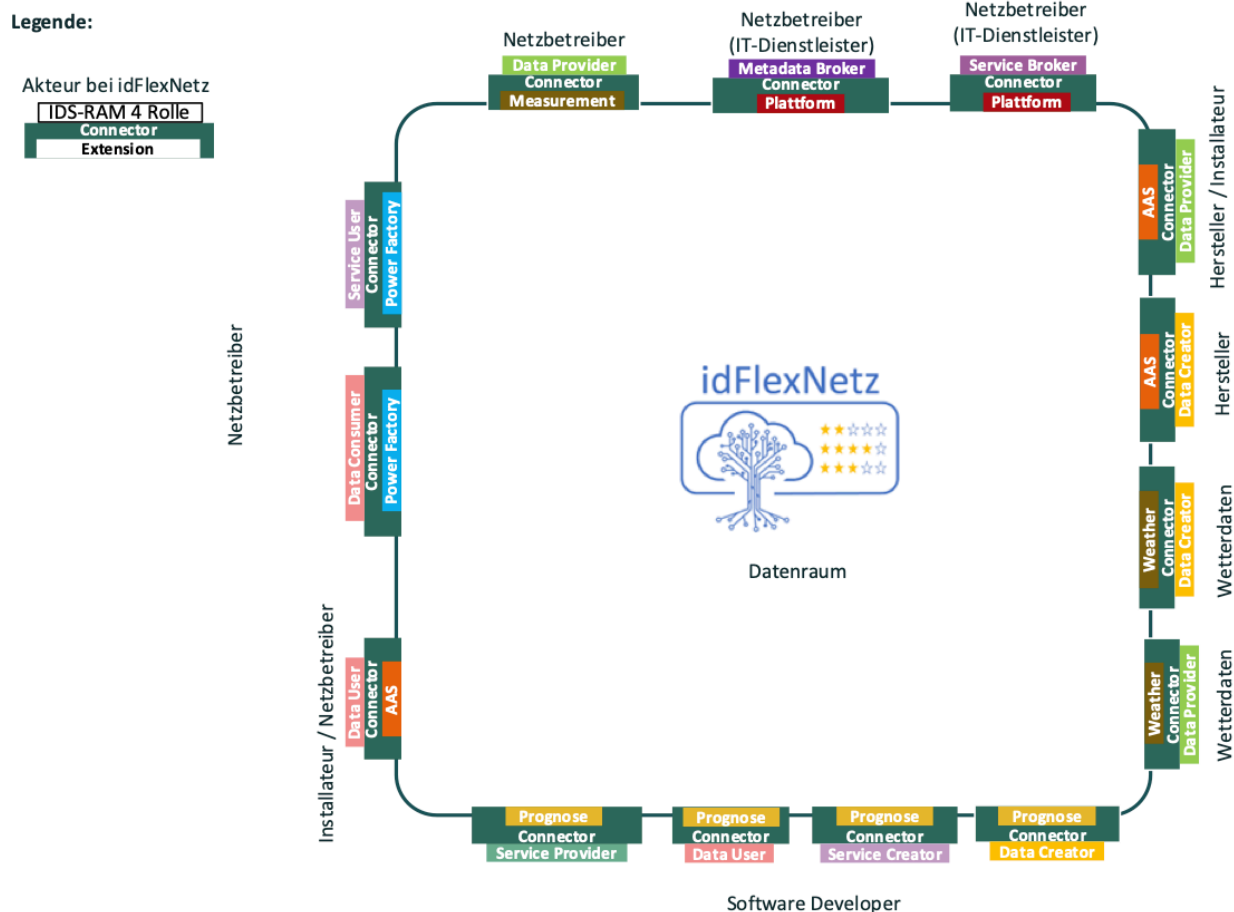


Abbildung 12: Beispiel Use-Case PV-Anlage für den Anwendungsfall Messwerte & Prognose. Komponenten zur Interaktion über den idFlexNetz-Datenraum.

5.3.4 Sicherheits-, Betriebs- und Integrationsaspekte

Das Sicherheitskonzept folgt einer mehrschichtigen Logik. In diesem Sicherheitskonzept sind netzwerkseitig gesicherte Verbindungen vorgesehen. Auf Identitätsebene sollen die beteiligten Akteure und Systeme mittels nachprüfbarer Nachweise authentifiziert werden. Auf Autorisierungsebene werden Policies ausgewertet, die Rollen, Berechtigungen, Herkunftsaussagen oder Compliance-Nachweise berücksichtigen können. Auf Datenebene wird die Integrität durch Signaturen, nachvollziehbare Herkunft und versionierte Austauschobjekte abgesichert.

Für den Betrieb ist es wichtig, dass Verfügbarkeit und Nachvollziehbarkeit berücksichtigt werden. Dazu gehören Logging, Fehlerbehandlung, Wiederholbarkeit von Transfers, Versionierung von AAS-Paketen und Mappings sowie definierte Verfahren zum Umgang mit widerrufenen Nachweisen. Diese Aspekte umfassen: Sicherheit, Auditierbarkeit und spätere Skalierung.

Integrationsseitig wurde ein Retrofit-Ansatz verfolgt. Das Konzept geht nicht von einer vollständigen Ersetzung vorhandener Systeme aus. Vielmehr werden die bestehenden Systeme über Konnektoren, REST-Schnittstellen, Adapter und semantische Mappings miteinander verbunden. Feldnahe Kommunikationsprotokolle wie OPC UA oder bestehende Backend-Schnittstellen bleiben daher relevant. Sie

werden durch die Datenraumarchitektur ergänzt, nicht ersetzt.

5.4 Technologische Bausteine

5.4.1 Datenraum-Konnektoren und Protokolle

Als technischer Kernbaustein der Datenraumteilnahme wurden die Eclipse Dataspace Components (EDC) ausgewählt. EDC eignet sich, weil der Ansatz offen, erweiterbar und mit europäischen Datenraumstandards kompatibel ist. Fachlich übernimmt der Konnektor die Rolle eines kontrollierten Übergabepunkts zwischen dem internen Backend und dem externen Datenraum.

Konzeptionell trennt EDC zwischen Kontroll- und Datenebene. In der Kontrollebene werden Angebote verwaltet, Kataloge abgefragt, Vertragsflüsse durchgeführt und Policies ausgewertet. In der Datenebene erfolgt der eigentliche Datentransfer. Diese Trennung ist für idFlexNetz wichtig, weil dadurch Metadaten, Verträge, Identitätsprüfungen und Nutzdaten sauber voneinander abgegrenzt werden können.

Für die Interoperabilität im Datenaustausch ist das Dataspace-Protokoll maßgeblich. Es deckt die Kernschritte Katalogabfrage, Vertragsverhandlung und Transferprozess ab. Für Wallet- und Credential-basierte Vertrauensnachweise ergänzt eine DCP-kompatible Interaktion die Architektur. Dadurch werden Identitäts- und Berechtigungsnachweise nicht außerhalb des Datenraums improvisiert, sondern als integrierbarer Teil der Protokollkette behandelt.

Im Projektkontext sind EDC-Erweiterungen ein entscheidendes Architekturmittel. Sie binden konkrete Fachsysteme an, etwa AAS-Umgebungen, Zeitreihendienste oder Netzberechnungstools. Gleichzeitig kapseln sie Mapping-Logik, Endpunktsteuerung und formatspezifische Verarbeitung. Die Konzeption sieht deshalb keine generischen „Einheits-Erweiterungen“ vor, sondern domänenspezifische Erweiterungen mit klar definiertem Verantwortungsbereich.

5.4.2 Digitale Zwillinge mit AAS und BaSyx

Für die Repräsentation digitaler Zwillinge wurde die Asset Administration Shell als Referenzmodell gewählt. Die AAS bietet eine standardisierte Struktur für technische Merkmale, Dokumente, Betriebsinformationen, Schnittstellen und weitere Submodelle. Damit eignet sie sich besonders für den Austausch hersteller- und anlagenbezogener Informationen über Organisationsgrenzen hinweg.

Für die prototypische Realisierung ist BaSyx als offene AAS-Umgebung naheliegend. BaSyx stellt Repository-, Discovery- und API-Funktionen bereit und erleichtert die Bereitstellung sowie den Zugriff auf AAS-Inhalte. Im Konzept dient BaSyx nicht als zentraler Eigentümer der digitalen Zwillinge, sondern als technische Laufzeitumgebung für die standardkonforme Verwaltung und Auslieferung von AAS-Inhalten.

Wichtig ist die Unterscheidung zwischen AAS-Inhalt und Datenraumanbindung. Die AAS beschreibt das Asset. Der Zugriff von außen wird im idFlexNetz-Konzept jedoch primär über den Konnektor und dessen Policy-Logik abgesichert. Für die ersten Ausbaustufen reicht die Veröffentlichung von Angebotsmetadaten mit Verweisen auf die jeweiligen Provider-Endpunkte aus.

Für den Transport und die Weitergabe kompletter Zwillinge muss berücksichtigt werden, dass

Zielsysteme nicht immer direkt AAS sprechen. Deshalb sieht die Konzeption explizite Export- und Transformationspfade vor, etwa in Form von JSON-LD oder CIM/XML.

5.4.3 Semantische Mappings mit OEO, CIM/CGMES und JSON-LD

Die semantische Schicht ist der Schlüssel zur Kopplung heterogener Systeme. Im Konzept übernimmt die OEO die Rolle eines domänenspezifischen Vokabulars für die Beschreibung, Suche und den Austausch energiebezogener Objekte, Zeitreihen und Modelle. Für netztechnische Strukturmodelle bleibt CIM/CGMES unverzichtbar, da Netzplanung und Netzberechnung darauf aufbauen.

Daraus folgt ein mehrformatiger Ansatz. Ein und dasselbe digitale Gut kann in unterschiedlichen Sichten angeboten werden, sofern die semantischen Beziehungen eindeutig und verlustarm beschrieben sind. Ein Hersteller kann beispielsweise einen digitalen Zwilling intern als AAS führen, ihn im Katalog über OEO-bezogene Discovery-Metadaten beschreiben und für einen Netzbetreiber zusätzlich eine CIM-konforme Repräsentation für den Import in ein Netzberechnungstool bereitstellen.

JSON-LD ist im Konzept besonders für Transferobjekte mit semantischem Kontext geeignet. Mittels der Syntax lassen sich Nutzdaten zusammen mit referenzierbaren Kontexten übertragen. Für Zeitreihen, Prognosen und einfache semantische Austauschobjekte ist dies vorteilhaft. Gleichwohl muss klar hervorgehoben werden, dass nicht jede Abbildung zwischen AAS, OEO und CIM verlustfrei ist. Deshalb gehören Mapping-Regeln, Versionsstände und Regressionstests selbst zu den architekturelevanten Artefakten.

Legacy-Formate wie CSV, proprietäre Datenbankschemata oder interne Servicedatenmodelle werden damit nicht obsolet. Sie bleiben innerhalb der Backend-Systeme bestehen. Die Aufgabe der Datenraumarchitektur besteht darin, diese Formate an den Schnittstellen nachvollziehbar und wiederholbar in standardisierte Angebots- und Transferobjekte zu überführen.

Ziel der Entwicklung des Daten-Architektur Kontextes ist die Beschreibung der Datenarchitektur im Projekt. Die Frage ist, welche Architektur bzw. welches Format müssen die Daten haben, die zwischen den verschiedenen Akteuren und Systemen im Datenraum ausgetauscht und in den Datenquellen und -senken gespeichert werden.

Beispiel: Anwendungsfall PV-Anlage

Für den Anwendungsfall PV-Anlage ergeben sich die in Tabelle 15 aufgeführten notwendigen und optionalen ontologisch beschriebenen Dateninhalte.

Tabelle 15: Anwendungsfall PV-Anlage: notwendige und optionale Daten für Netzbetreiber und Prognoseanbieter

Inhalt	Netzbetreiber	Prognoseanbieter
ID	notwendig	notwendig
Name	notwendig	notwendig
Anlagenanschrift (Straße, Hausnummer, PLZ, Stadt)	notwendig	Geokoordinate
Anschlussspannung (in kV)	notwendig	optional
Nennleistung (in kW)	notwendig	notwendig

Ausrichtung der Anlage (in Azimuthwinkel)	optional
Eingang: Endogene Zielzeitreihe (PV-Leitungszeitreihe in kW)	notwendig
Direktstrahlung in kW (als Zeitreihe)	notwendig
Diffusstrahlung in kW (als Zeitreihe)	notwendig
Temperatur in °C (als Zeitreihe)	notwendig
Ausgang: Endogene Zielzeitreihe (PV-Leitungszeitreihe in kW)	notwendig
Verschattung in Raumwinkel	optional
Schneebedeckung (als Zeitreihe)	optional
max. Scheinleistung	optional
Hersteller (Umrichter)	optional
Typ (Umrichter)	optional
Voll- oder Überschusseinspeisung	optional

Zur Überprüfung der vollständigen Beschreibbarkeit mit einer gewählten Ontologie wurde die Ontologie „Open Energy Ontology“ (OEO) in der bis dahin aktuellen Version 1.16.1 verwendet. Dies deckt auch noch nicht beschreibbare Dateninhalte ab.

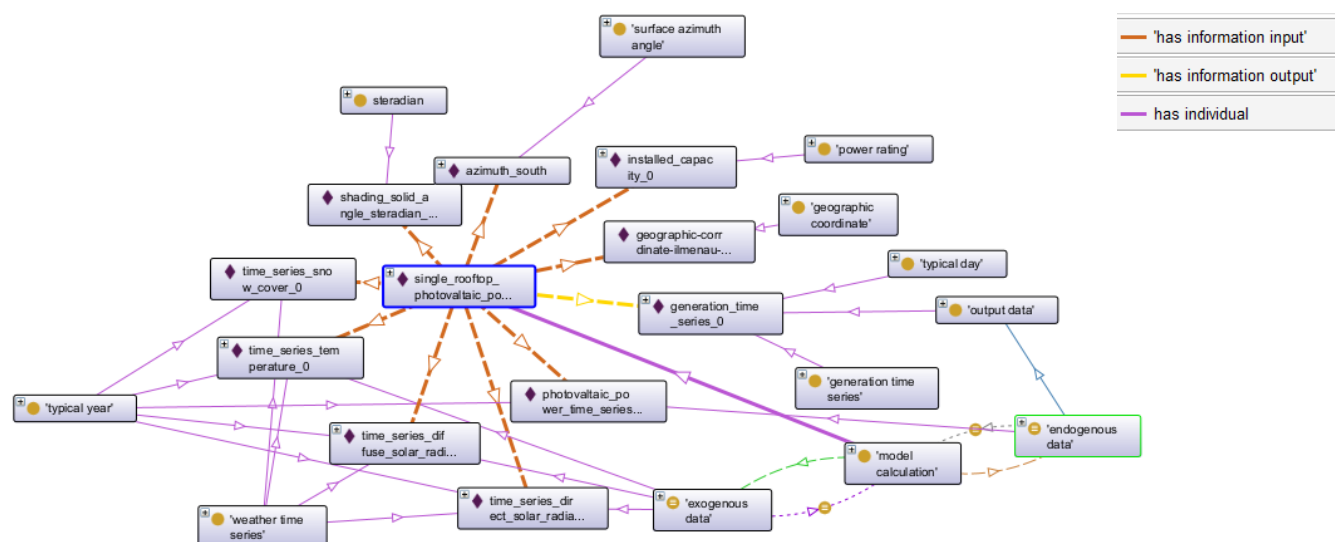


Abbildung 13: OEO-annotierte Prognose für eine Einzel; auf Dach PV-Anlage

In Abbildung 13 wird ein Prognosemodell mithilfe der „Open Energy Ontology“ (OEO) beschrieben. Individuen sind mit einer lila Raute und Entitäten mit einem gelben Kreis gekennzeichnet. Die Analyse der „Open Energy Ontology“ ergab, dass sie gut für einen Energiedatenraum geeignet ist – jedoch sind Ergänzungen für die Anwendungsfälle im idFlexNetz-Datenraum notwendig. In Version 2.1.0 wurden einige dieser Ergänzungen vorgenommen. Der entsprechende Ausschnitt der OEO 2.1.0 ist in Abbildung 16 dargestellt.

5.4.4 Wallets, DIDs, VCs und European Business Wallet

Für Identität und Vertrauen wurde ein Wallet-basiertes Modell vorgesehen. Die Wallet hält Identifikatoren und verifizierbare Nachweise vor und ermöglicht deren kontrollierte Präsentation gegenüber Konnektoren und Prüfdiensten. Im B2B-Kontext des Projekts stehen dabei Unternehmens- und

Systemidentitäten im Vordergrund. Relevante Nachweise betreffen etwa die rechtliche Identität, Mitgliedschaften, Markttrollen, Berechtigungen oder Konformitätserklärungen.

Dezentrale Identifikatoren und Verifiable Credentials bilden die technische Grundlage. Sie erlauben eine prüfbare, maschinenlesbare und transportierbare Identitätsdarstellung ohne zentrale Benutzerverwaltung im Datenraum selbst. Für idFlexNetz ist wichtig, dass diese Nachweise nicht isoliert genutzt werden, sondern mit Policy-Entscheidungen, Kataloglogik und Transaktionsflüssen zusammenspielen.

Die European Business Wallet (EUBW) ist in diesem Zusammenhang die fachlich relevante europäische Zielarchitektur für Unternehmensidentitäten. Das Konzept von idFlexNetz ist deshalb EUBW-kompatibel ausgelegt. Das betrifft insbesondere den Onboarding-Gedanken mit authentischen Quellen, die Verwendung überprüfbarer Unternehmensnachweise, die Möglichkeit des Widerrufs und die Interoperabilität zwischen unterschiedlichen Datenraum-Infrastrukturen. Für natürliche Personen und Vertretungsrechte bleibt die Kopplung zum EUDI-Umfeld perspektivisch wichtig, insbesondere wenn spätere Ausbaustufen eMandate oder rollenbezogene Delegation berücksichtigen.

Für das Projekt bedeutet dies praktisch: Es wird auf eine Wallet-basierte Unternehmensidentität gesetzt, die sich in europäische Vertrauensrahmen einfügen lässt. Damit wird ein wesentlicher Konzeptfehler älterer, rein technologiegetriebener Identitätsentwürfe vermieden: Identität ist kein isolierter Zusatzdienst, sondern ein Basisbaustein des Datenraums (siehe Abbildung 14).



Wallet-basierte Architektur

Technische Innovationen

- ✓ Controller für Features des Digitale Gutes
- ✓ Integration von IoT-Sensoren
- ✓ Wallets & Vertrauensketten
- ✓ Nutzung von Gaia-X, Catena-X Datenraum-Technologie
- ✓ Risk Scoring von Daten
- ✓ Cyber-Sicherheit

Nicht-technische Innovationen

- ✓ Vertragsbeziehungen
- ✓ Effizientes Onboarding
- ✓ Mehrwerte
- ✓ Business Modell
- ✓ Integration mit Marktplätzen und Kreislaufwirtschaft

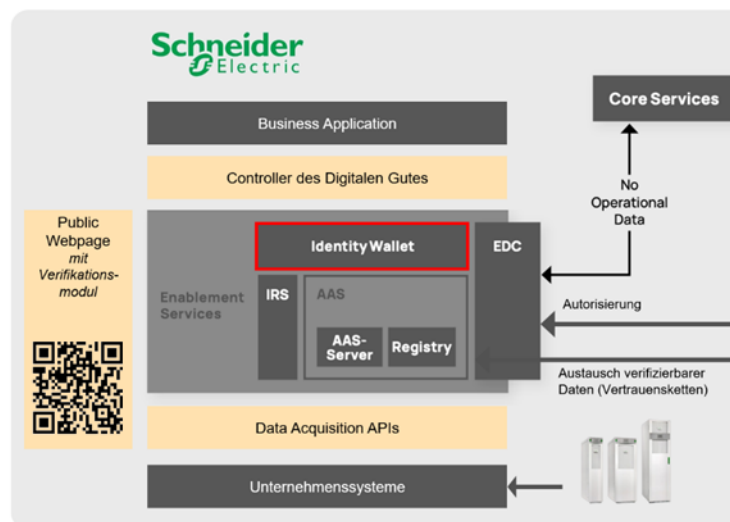


Abbildung 14: Wallet-basierte Architektur mit Identität als Basisbaustein des Datenraums

5.4.5 Domänensysteme und prototypische Realisierungsbausteine

Die Konzeption wurde nicht im luftleeren Raum erstellt, sondern entlang der im Projekt priorisierten Fachsysteme konkretisiert. Für Zeitreihen- und Prognoseflüsse sind Energiemanagement- und Energiedatenmanagementsysteme relevant. Für digitale Zwillinge wurde eine AAS-Laufzeitumgebung vorgesehen. Für Netzsimulation und Netzplanung ist die Anbindung eines Werkzeugs wie PowerFactory entscheidend. Ergänzend werden Katalog- und Suchfunktionen durch grafenbasierte Komponenten und

einfache Frontends unterstützt.

Diese Auswahl ist prototypisch (siehe Beispiel zum Vorhersagealgorithmus) und deckt die für idFlexNetz zentrale Integrationskette ab: Messwerte und Prognosen aus operativen Energiesystemen, digitale Zwillinge aus AAS-Umgebungen sowie Nutzung in Netzberechnungs- und Planungswerkzeugen. Aus konzeptioneller Sicht sind diese Systeme jedoch austauschbar, solange die Datenraumkoppelung über definierte Standards, Mappings und Policies erfolgt. In Abbildung 15 ist beispielhaft ein Vorhersagealgorithmus in der erweiterten Open Energy Ontology (OEO) mit Eingabedaten (siehe „meteoData“) und Ausgabedaten (siehe „forecastData“) dargestellt. In der Abbildung sind die Eingabedaten als Wetterzeitreihe mit ihren Eigenschaften, Parametern und Einheiten detaillierter als die Ausgabedaten dargestellt. Die Ausgabedaten wurden in der Abbildung der Übersichtlichkeit halber nicht weiter detailliert.

Für die Anbindung an den Netzbetrieb ist insbesondere relevant, dass Zielsysteme nicht zwangsläufig JSON-LD oder AAS direkt verarbeiten. Daher muss die Architektur Export- und Importpfade in fachlich akzeptierte Zielformate unterstützen. Für Netzmodelle ist dies insbesondere für CIM/CGMES der Fall. Für Prognosen und Zeitreihen können zusätzlich einfache, marktnahe Austauschformate sinnvoll sein, sofern ihre semantische Bedeutung an der Datenraumschnittstelle eindeutig erhalten bleibt.

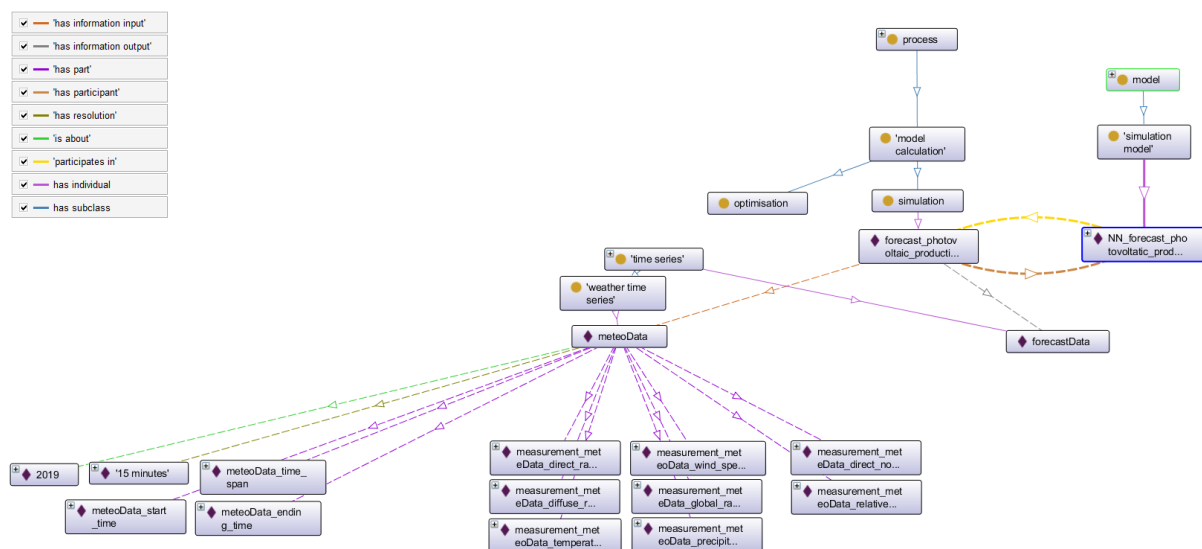


Abbildung 15: Vorhersagealgorithmus als Graph in der erweiterten Open Energy Ontology mit Eingabe- und Ausgabedaten

5.4.6 Katalog, Suche und Auswahlassistenz

Der Katalog ist im idFlexNetz-Konzept als technischer Index die Basis eines Marktplatzes, der zudem fachliche Such- und Auswahlwerkzeuge bereitstellt. Für Experten muss er eine präzise Suche nach Asset-Klassen, Merkmalen, Schnittstellen, Zeitauflösungen oder Netzbezug erlauben. Für nicht spezialisierte Nutzer muss er verständliche Kategorien und nachvollziehbare Qualitätsaussagen bereitstellen. Deshalb wurde in der Konzeption großer Wert auf strukturierte Angebotsmetadaten gelegt.

Für digitale Zwillinge umfassen diese Metadaten insbesondere den Asset-Typ, den Hersteller, die technischen Kernparameter, den Typ-/Instanzstatus, die verfügbaren Repräsentationen sowie relevante

Nachweise. Für Prognosen und Modelle kommen Angaben zu Eingangs- und Ausgangsgrößen, zur zeitlichen Auflösung, zum Gültigkeitsbereich, zur Version, zur Aktualität und zu Qualitätsmetriken hinzu. Auf dieser Basis kann ein Assistenz- oder Filtersystem geeignete Prognose- und Modellkomponenten für einen konkreten Anwendungszweck vorschlagen.

Bewertungs- und Scoring-Informationen sind dabei keine „nice-to-have“-Zusatzfunktion. Sie helfen, mehrere technisch austauschbare digitale Güter nach Eignung, Reifegrad oder Vertrauenswürdigkeit zu unterscheiden. Konzeptionell ist deshalb vorgesehen, Bewertungsinformationen strukturiert und quellenbezogen zu führen. Dies gilt sowohl für technische Gütemaße von Prognosen als auch für Reifegrad- oder Fähigkeitsbewertungen digitaler Zwillinge.

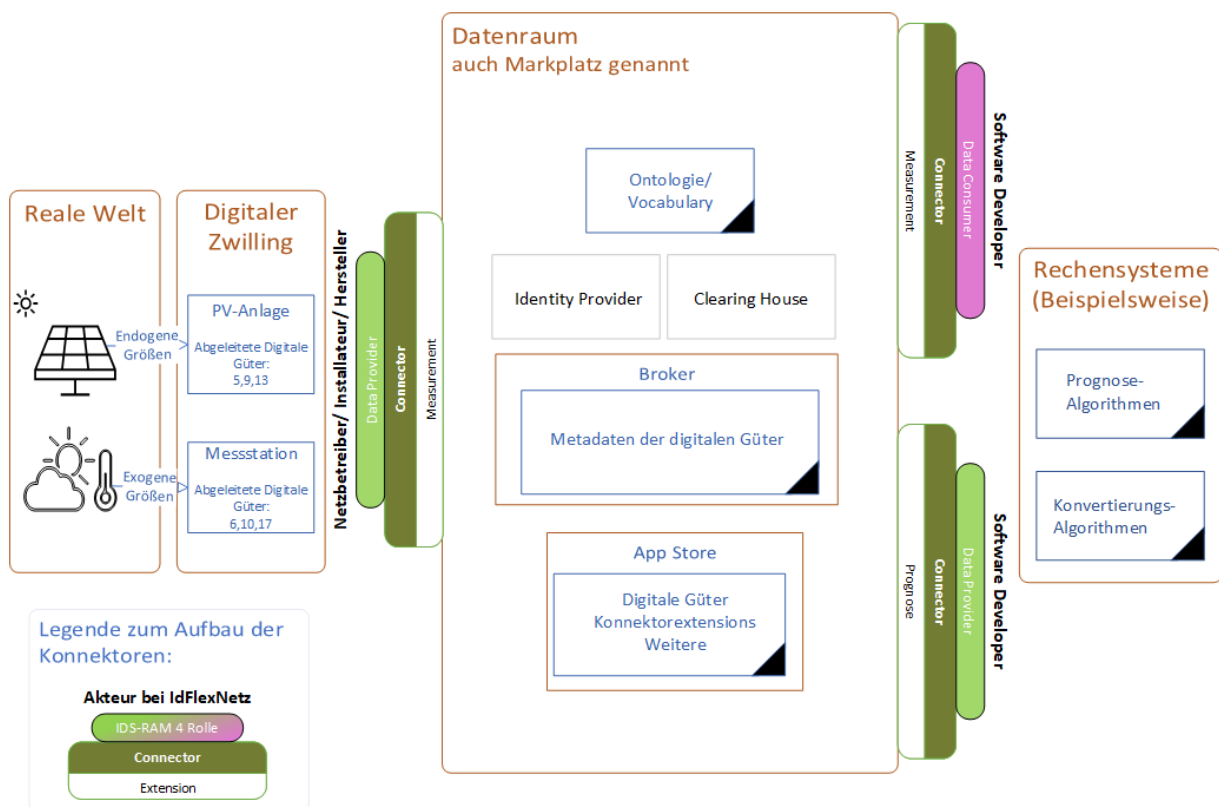


Abbildung 16: Datenraum mit seinen Elementen und zwei der über Konnektoren verbundenen Elemente im Zusammenspiel mit dem Marktplatz

5.5 Zusammenfassung

AP3 legt das fachliche und technische Sollbild des idFlexNetz-Datenraums fest. Das Konzept verbindet Datensouveränität, föderierte Architekturprinzipien, offene Standards und ein vertrauensbasiertes Identitätsmodell zu einer belastbaren Gesamtarchitektur für digitale Güter im Energiesektor. Zentrale Entscheidungen sind die Nutzung von Eclipse Dataspace Components als umfassender Rahmen (Konzept, Architektur, Code, Beispiele), die Verwendung der AAS für digitale Zwillinge, die Kombination aus OEO und CIM/CGMES für die Semantik sowie ein Wallet-basiertes Identitätsmodell auf Basis von DIDs und Verifiable Credentials mit Blick auf die European Business Wallet.

Besonders wichtig für die weitere Umsetzung ist die Trennung von Discovery-Metadaten und operativen Nutzdaten, von fachlicher Semantik und internem Backend-Format sowie von

Organisationsidentität mit der Vertrauensschicht und Asset-Identität. Dadurch wird die Architektur sowohl für bestehende Systeme der Energiewirtschaft als auch für künftige europäische Vertrauens- und Datenraumrahmen anschlussfähig. Die in AP4 realisierten Prototypen und die in AP5 dokumentierten Erprobungen bauen unmittelbar auf diesen Konzeptentscheidungen auf.

Das Konzept wurde beispielhaft wie folgt umgesetzt. Im Rahmen des Projekts wurde ein Prototyp eines digitalen Guts entwickelt, u.a. am Beispiel einer Industriebatterie. Hier wurden Elemente der Vertrauensinfrastruktur sowie Autorisierungs- und Herkunftsnachweise umgesetzt. Das Beispiel ist gerade sehr aktuell, da Unternehmen bis Februar 2027 einen Batteriepass umsetzen müssen. Das Scannen des QR-Codes führt zum Demonstrator im Internet.



Digitales Gut am Beispiel einer Industriebatterie



Abbildung 17: Industriebatterie als digitales Gut mit Elementen der Vertrauensinfrastruktur sowie Autorisierungs- und Herkunftsnachweisen

Neben der technologischen Machbarkeit wurde beim Prototypen Wert auf die Demonstration von Geschäftsmehrwerten über den Produktlebenszyklus, die Schaffung virtueller Batterien sowie die Integration in Prozesse der Kreislaufwirtschaft gelegt.

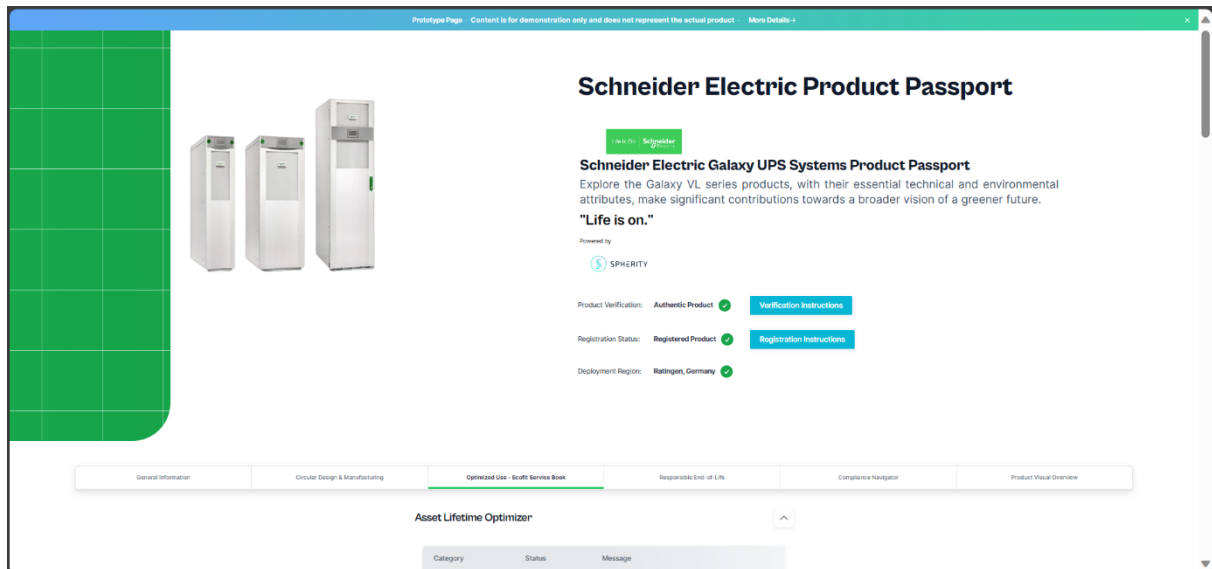


Abbildung 18: Prototyp eines digitalen Produktpasses für eine unterbrechungsfreie Stromversorgung

6 AP4 – Umsetzung

6.1 IKT-Ökosystem

6.1.1 Gaia-X und IDS für das IKT-Ökosystem

Es wurden die folgenden Anwendungsfälle realisiert:

Use-Case PV-Anlage

Der Use-Case Photovoltaikanlage (PV-Anlage) wurde mithilfe von zwei Teilprozessen umgesetzt: der *Messwertbereitstellung* und der *Prognosebereitstellung*.

Messwertbereitstellung: Im Teilprozess der Messwertbereitstellung werden Erzeugungsmesswerte einer PV-Anlage durch einen Netzbetreiber für einen Prognoseanbieter bereitgestellt.

Prognosebereitstellung: Im Teilprozess Prognosebereitstellung werden Prognosewerte auf der Grundlage von Anlagenparametern, etwa Vergangenheitsmesswerten der Anlage, ermittelt und vom Prognoseanbieter dem Netzbetreiber über den Datenraum zur Verfügung gestellt.

Use-Case Digitaler Zwilling

Der Use-Case Digitaler Zwilling kann für verschiedene digitale Zwillinge verwendet werden, wie etwa den digitalen Zwilling einer PV-Anlage oder von Netzkomponenten, z. B. eines Transformators.

Heterogene Anwendungssoftwarelandschaft

Die gewählten Use-Cases führen zu einem heterogenen IKT-Ökosystem, für das die folgende Software auf den Teilsystemen ausgewählt wurde.

Für den Use-Case PV-Anlage wurden sowohl für den Teilprozess Messwertbereitstellung als auch für den Teilprozess Prognosebereitstellung ein Energiemanagementsystem (EMS) bzw. Energiedatenmanagement (EDM) gewählt. Alle Systeme werden über die Implementierung einer Erweiterung in den Eclipse Dataspace Components (EDC) an den Datenraum angebunden. Der EDC-Konnektor entspricht den Regeln der International Dataspace Association (IDSA).

Die Messwerte (im Teilprozess Messwertbereitstellung) werden über die über den EDC-Konnektor angebundene Software EMS-EDM PROPHET[®] über den Datenraum bereitgestellt. Diese Messwerte werden dann auf der Empfängerseite (Konsument), in diesem Fall beim Prognoseanbieter, zur Prognoseerstellung gespeichert.

Die Prognosewerte (im Teilprozess Prognosebereitstellung) werden in diesem Projekt von verschiedenen Prognoseanbietern über die Software EMS-EDM PROPHET[®] vom Fraunhofer IOSB-AST und über einen Prognoseservice des DFKI, angebunden über den EDC, bereitgestellt. Die Prognosewerte können dann auf der Seite der Konsumenten ebenfalls in einer EMS-Software wie der des Fraunhofer IOSB-AST gespeichert, dort analysiert und für weitere Schritte genutzt werden.

Für den Use-Case Digitaler Zwilling wird auf der Anbieterseite, in dem Fall der Anlagenhersteller, ein digitaler Zwilling über eine Asset Administration Shell (AAS) Umgebung kombiniert mit der Open-

Source-Software BaSyx, welche einen Datenaustausch über RESTful APIs zur AAS etabliert, bereitgestellt. Der Netzbetreiber, der in diesem Use-Case der Konsument ist, verarbeitet die empfangenen Daten in der Software PowerFactory und verwendet den erhaltenen digitalen Zwilling zur Netzsimulation.

Zusammengefasst die Softwarelösungen aus der heterogenen Systemlandschaft:

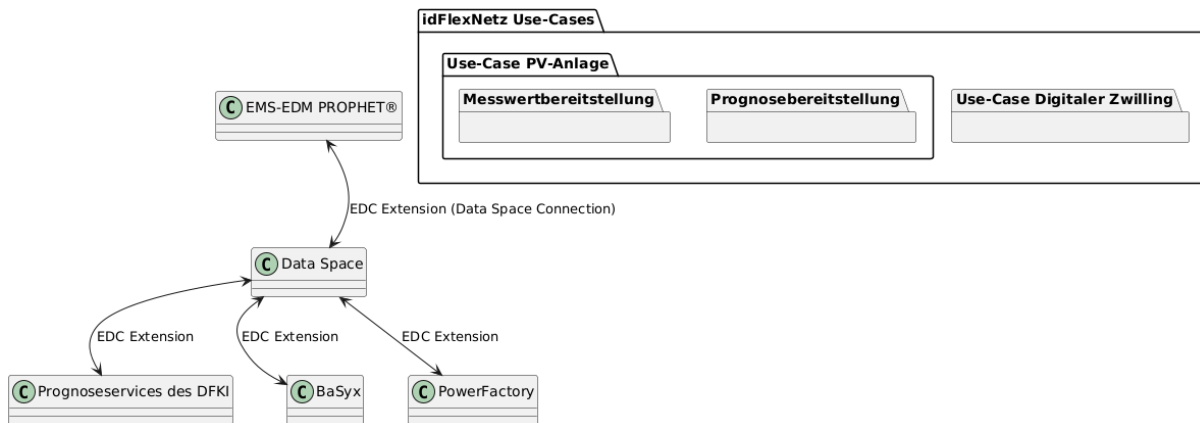


Abbildung 19: Das IKT-Ökosystem des Projekts idFlexNetz ist eine heterogene Systemlandschaft

1. **EMS-EDM PROPHET®** (vom Fraunhofer IOSB-AST)
2. **Prognoseservices des DFKI** (vom DFKI)
3. **BaSyx** (Standardisierte Schnittstelle zur AAS)
4. **PowerFactory** (für Netzsimulation, -modellierung)
5. **Eclipse Dataspace Components** (EDC zur Teilnahme am Datenraum)

Im Rahmen der IDSA und der Plattform Industrie 4.0 für Datenräume ist das Übersichtsschaubild der Architektur des idFlexNetz-MVDs wie folgt:

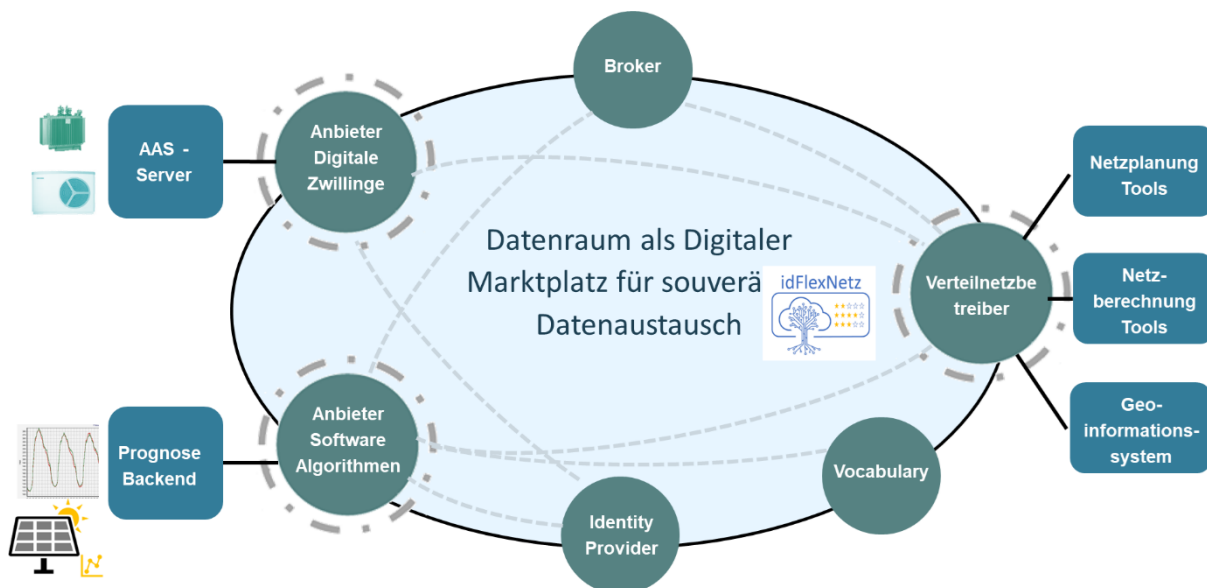


Abbildung 20: Übersicht-Schaubild. Integration aller Komponenten zur Umsetzung der ausgewählten Anwendungsfälle in den Datenraum.

6.1.2 Dezentrale Identitäten für das IKT-Ökosystem

Die Umsetzung dezentraler Identitäten im idFlexNetz-Projekt erfolgt über eine Wallet-basierte Lösung zur sicheren und interoperablen Identitätsverwaltung.

6.1.2.1 Managed Identity Wallet

Im ersten Schritt wurde eine Managed Identity Wallet (MIW) auf Basis der Catena-X Library Tractus-X bereitgestellt. Diese Managed Identity Wallet sollte als Identitätslösung für die Projektbeteiligten im IKT-Ökosystem dienen, einschließlich der Authentifizierung und Autorisierung. Die bereitgestellten Managed Identity Wallet-Instanzen für die Projektbeteiligten sind in Tabelle 16 aufgeführt. Die verwendeten MIW-APIs können hier angeschaut werden: <https://edx-miw.fly.dev>

Tabelle 16: Die bereitgestellten Managed Identity Wallet-Instanzen und idFlexNetz-Business Partner Number (BPN) für die Projektbeteiligten

#	Unternehmen	Adresse	Wallet Client ID	idFlex-BPN
1	VSE Verteilnetz GmbH	Heinrich-Böcking-Straße 10-14, 66121 Saarbrücken	sa-idflex-company-1	BPNLID- FLEX000001
2	Schneider Electric Deutschland GmbH	Gothaer Str. 29, 40880 Ratingen	sa-idflex-company-2	BPNLID- FLEX000002
3	Fraunhofer IOSB-AST	Am Vogelherd 90, 98693 Ilmenau	sa-idflex-company-3	BPNLID- FLEX000003
4	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH	Stuhlsatzenhausweg 3, 66123 Saarbrücken	sa-idflex-company-4	BPNLID- FLEX000004
5	Fraunhofer ISI	Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe	sa-idflex-company-5	BPNLID- FLEX000005

6.1.2.2 eIDAS 2.0, European Digital Identity-Wallet und European Business Wallet – Einordnung und Bedeutung

eIDAS 2.0 schafft einen EU-weiten Rechtsrahmen für digitale Identitäten und verpflichtet die Mitgliedsstaaten, bis 2026 eine European Digital Identity Wallet (EUDI-Wallet) bereitzustellen. Dieses Wallet ermöglicht natürlichen Personen die souveräne Speicherung und Nutzung amtlicher und privater Nachweise gemäß einheitlichen europäischen Standards.

Für juristische Personen wird parallel die European Business Wallet (EUBW) entwickelt, u. a. in Large-Scale-Piloten wie EWC oder DC4EU. Sie soll Unternehmensidentitäten und verifizierbare Unternehmensnachweise (z. B. LEI, LPID, Steuer-IDs) interoperabel bereitstellen.

Im Projekt idFlexNetz wird eine EUBW-kompatible Vertrauenslösung auf Basis der EWC-Spezifikationen genutzt, die eine sichere und interoperable B2B-Identifikation ermöglicht und ein Kernproblem von Datenräumen adressiert: die Authentifizierung und Autorisierung über unterschiedliche Datenraum-Infrastrukturen hinweg. Die EUBW bildet damit eine Grundlage für skalierbare und interoperable europäische Datenökosysteme.

6.1.2.3 Wallet-Evaluierung: Managed Identity Wallet vs. European Business Wallet

Die Managed Identity Wallet erwies sich als proprietär, nicht weiterentwickelt und nur eingeschränkt interoperabel, weshalb sie verworfen wurde. Stattdessen wurde die European Business Wallet gemäß eIDAS 2.0 evaluiert und als Grundlage gewählt. Sie bietet eine universell nutzbare, sichere Unternehmensbasisidentität und eignet sich als horizontale Identitätsinfrastruktur für zukünftige interoperable und datenraumübergreifende Anwendungen.

6.1.2.4 European Business Wallet als Basisinfrastruktur

Die European Business Wallet (EUBW) stellt eine Kerninfrastruktur für das Identitätsmanagement bereit. Seine Hauptfunktionen umfassen:

- Sichere Speicherung und sicherer Austausch von Personal Identifiers (PIDs) und Organizational Digital Identifiers (ODIs).
- Protokolle und Mechanismen für das Ausstellen, Verifizieren und Präsentieren verifizierbarer Berechtigungsnachweise (Verifiable Credentials).
- Einhaltung europäischer Vorschriften, insbesondere der eIDAS 2.0, um eine vertrauenswürdige und regulierte Identitätsinfrastruktur zu gewährleisten.

Diese horizontalen EUBW-Funktionalitäten bilden die grundlegende Infrastruktur für Interoperabilität und Vertrauen über Branchen hinweg. Allerdings liegt der eigentliche geschäftliche Mehrwert nicht in der EUBW selbst, sondern in den darauf aufbauenden vertikalen Anwendungen und Prozessen.

Interlinked vertical and horizontal ecosystems for identity wallets

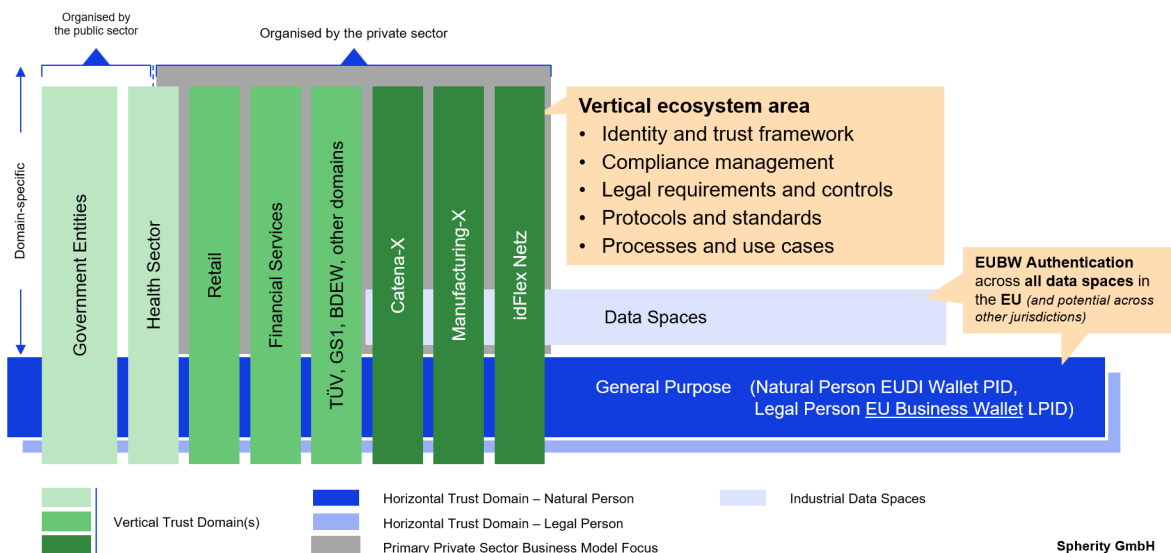


Abbildung 21: Vernetzte Identitätsökosysteme: Vertikale Trust-Domains (grün) sind branchenspezifisch, während horizontale Trust-Domains (blau) übergreifende Identitätslösungen wie die European Business Wallet bieten. idFlexNetz verbindet vertikale und horizontale Strukturen.

Das Diagramm in Abbildung 21 zeigt die vernetzten vertikalen und horizontalen Ökosysteme für Identitäts-Wallets.

- Vertikale Trust-Domains (grüne Balken) sind branchenspezifische Identitätsökosysteme, z. B. für den öffentlichen Sektor (BMI, BUND), den Gesundheitssektor, den Handel (Retail), Finanzdienstleistungen oder industrielle Datenräume wie Catena-X und Manufacturing-X. Diese vertikalen Ökosysteme sind oft reguliert und organisieren Identitäts- und Vertrauensrahmen sowie Konformitätsanforderungen.
- Horizontale Trust-Domains (blaue Balken) stellen übergreifende, universelle Identitätsinfrastrukturen bereit, wie etwa die European Business Wallet (EUBW) für natürliche und juristische Personen. Diese sorgen für eine interoperable Identitätsverifikation zwischen verschiedenen vertikalen Ökosystemen.
- idFlexNetz ist eine spezifische vertikale Trust-Domain, die in diesem Modell eine eigene Identitätsinfrastruktur nutzt und mit anderen vertikalen und horizontalen Trust-Domains interoperabel ist.
- Dataspaces (graue Bereiche) bilden die vernetzten Datenökosysteme, in denen Identitäten für den sicheren Datenaustausch genutzt werden.

Das Diagramm (siehe Abbildung 21) hebt hervor, dass die EUBW als universelle Infrastruktur für Identitäten dient und sich mit vertikalen Ökosystemen verknüpfen lässt.

In der deutschen Energiewirtschaft ist eIDAS kein neues Konzept. Die Smart Metering PKI basiert in weiten Teilen auf eIDAS 1.0 und hat sich als vertrauenswürdige Grundlage etabliert. Mit der Einführung der EUBW in eIDAS 2.0 kann diese bewährte Basis weiter genutzt und verstetigt werden. Die Smart Metering PKI wird heute nicht nur für die Kommunikation mit Smart Metern und Backend-Systemen verwendet, sondern ist auch eine wesentliche Grundlage für den B2B-Austausch in der Marktkommunikation.

Unsere Einschätzung ist daher, dass die EUBW-Technologie eine zukunftsorientierte Grundlage für eine IKT-Ökosystem-Lösung für dezentrale Identitäten im idFlexNetz darstellt. Sie ermöglicht, bestehende Vertrauensinfrastrukturen weiterzuentwickeln und eine nahtlose Integration in bestehende Energie- und Datenökosysteme zu gewährleisten.

6.1.2.5 Vorteile der Integration der European Business Wallet mit dem EDC

Durch die Verknüpfung der EUBW mit der Eclipse Dataspace Component (EDC) können universelle, interoperable und sichere Identitäten im idFlexNetz-Datenraum genutzt werden.

Die wichtigsten Vorteile dieses Ansatzes:

- Vertrauensvolle Identitätsprüfung zwischen bislang unbekanntem Akteuren: Zwei Systemakteure, die sich zuvor nicht kannten, können sich gegenseitig sicher authentifizieren und autorisieren.
- Dynamische Identitätsüberprüfung durch die Policy Engine des EDC: Vor der Freigabe von Daten überprüft die Policy Engine des EDC, ob der empfangende Akteur die erforderlichen Identitäts- und Berechtigungsnachweise wie z. B. das Membership-Credential und das Markttrollen-Credential besitzt.

- Erweiterbarkeit des Identitätsmodells: Unternehmen können durch einen Credential-Austausch neue Nachweise erlangen und sich damit bei weiteren Datenfreigabeprozessen authentifizieren.
- Interoperabilität mit anderen Gaia-X-konformen Datenräumen: Durch die Verwendung der EUBW als Basis wird eine zukünftige Kompatibilität mit europäischen Datenökosystemen gewährleistet.

6.2 Architektur des IKT-Ökosystems

Die Umsetzung des IKT-Ökosystems erfolgt über die in Kapitel 4.1.2 beschriebene Architektur unter Verwendung einer AAS – konkret BaSyx –, um AASx-Dateien integrieren, darstellen und die entsprechenden Selbstbeschreibungen über die Konnektoren bzw. deren Erweiterungen referenzieren zu können.

6.2.1 MVD Digitaler Zwilling Energie

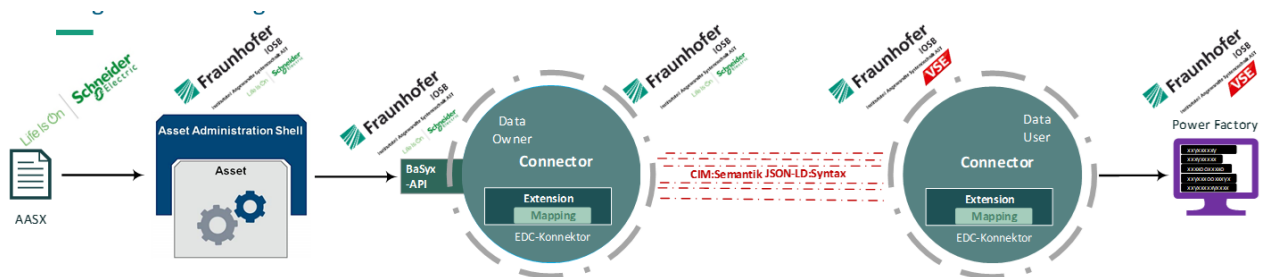


Abbildung 22: Architektur des Anwendungsfalles der digitalen Zwillinge

Im Folgenden ist der Ablauf des Use-Cases von links nach rechts mit den zuständigen Projektpartnern beschrieben:

1. Semantische Annotation der digitalen Zwillinge mithilfe der OEO oder dem CIM
2. Bereitstellung und Konfiguration der AAS-Umgebung und Importieren der digitalen Zwillinge
3. Konfiguration des BaSyx-Frameworks und Verwendung dessen Schnittstellen
4. Implementierung Mapping von AAS-Modell, die Properties mit zu CIM oder OEO zugeordneten semantische IDs besitzen, zu JSON-LD (Syntax) mit CIM (Semantik)
5. Implementierung der AAS-EDC-Erweiterung
6. Implementierung der PowerFactory-Erweiterung
7. Bereitstellung und Konfiguration der PowerFactory

Dieser Anwendungsfall wurde vollständig im Fraunhofer IKT-Ökosystem umgesetzt: Die Konnektoren des Datenanbieters (Schneider Electric) und des Datenkonsumenten (VSE Verteilnetzbetreiber) sind in der Fraunhofer-Infrastruktur gehostet.

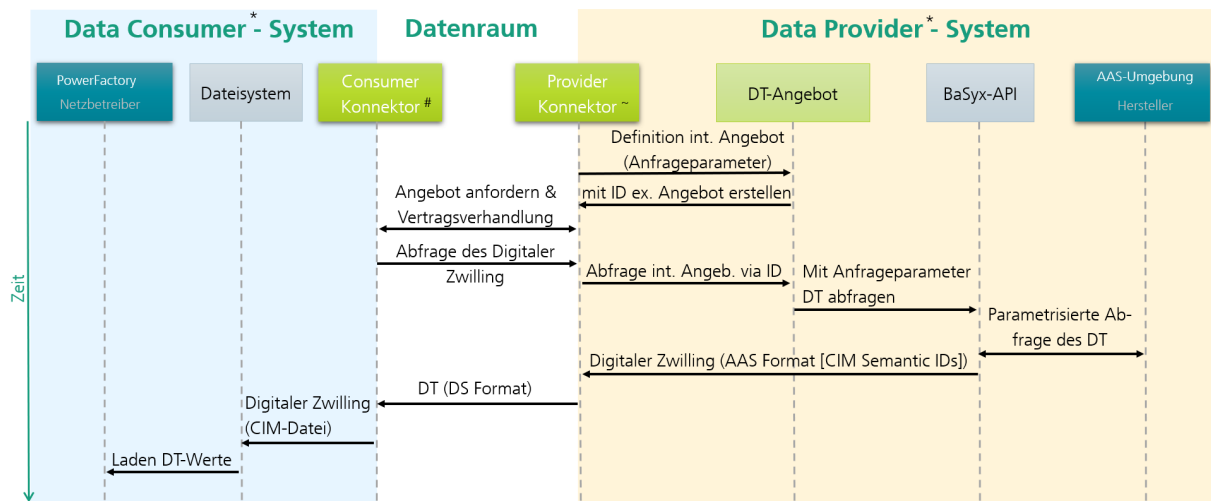


Abbildung 23: Sequenzdiagramm zur Implementierung des Austauschs digitaler Zwillinge über den Datenraum. Farben symbolisieren die verschiedenen Services. Grün: EDC-Datenraum-Konnektoren mit Erweiterung. Grau: unabhängige Services als Schnittstelle zur Kommunikation mit dem Backend. Blau: Die Backend-Systeme. (*) Rolle nach IDS-RAM 4; (#) Eclipse Dataspace Connector (EDC) mit PowerFactory-Erweiterung, (~) Eclipse Dataspace Connector (EDC) mit AAS-Erweiterung

In Abbildung 23 wird der beschriebene Anwendungsfall dargestellt. Der Datenkonsument möchte Software zur Simulation seines Stromnetzes einsetzen, und der Datenanbieter bietet physische Komponenten für den Netzausbau an. Vor dem Kauf einer physischen Netzkomponente möchte der Datenkonsument eine Simulation mit einem Simulationswerkzeug durchführen, das Eingabedaten im CIM-Format benötigt. Um möglichst viele Kunden anzusprechen, bietet der Datenanbieter die Daten seiner digitalen Zwillinge, die intern als AAS dargestellt werden, in CIM- und OEO-Semantik an. Dabei ist zu beachten, dass der Datenanbieter unabhängig vom Datenkonsumenten agiert. D.h., er kann nur auf Grundlage von Marktanalysen Entscheidungen über das Format treffen, das er anbieten möchte. Der Datenkonsument wird die Daten jedoch unabhängig von ihm verarbeiten.

Für die Umsetzung der Architektur war die Nutzung von Open-Source-Tools eine Priorität des Projektteams, auch auf der Entwicklungsseite, um einen offenen Zugriff auf die Infrastruktur zu demonstrieren. Hierfür wurden die bereits beschriebenen Open-Source-Komponenten des EDC einschließlich des Basis-Konnektors für die Umsetzung der Kontroll- und Datenebene, des Katalogs, der Erweiterungen sowie des entsprechenden Testframeworks genutzt.

6.2.1.1 Anpassung der FhG-Anwendungssysteme zur Realisierung der Aufgaben der Netzbetriebsführung

Die FhG-Anwendungssysteme wurden für die Verbindung aus dem Datenraum hin zu den Backend-Systemen (IKT-Ökosystemen) angepasst. Folgende Systeme und die darin zur Verfügung stehenden Services wurden angepasst, passend konfiguriert und bereitgestellt.

Anpassung und Bereitstellung von Services zur Verbindung mit dem vorhandenen EMS und EDM der Software EMS-EDM PROPHET®. Bereitstellung von Services zum Zugriff auf die EMS-Software über RESTful-HTTP-APIs. Darunter fällt bspw. ein Zeitreihenservice. Im EMS werden bspw. fehlerhafte Lücken gefüllt. Auch der Prognoseservice wurde angepasst. Diesem Service wurden u. a. Schnittstellen

zur Zuordnung des Angebots hinzugefügt, die die zugrunde liegende Messwertzeitreihe als Zuordnungskriterium enthalten.

6.2.1.2 Anpassung der DFKI-Anwendungssysteme zur Realisierung der Aufgaben der Netzbetriebsführung

Eine REST-Schnittstelle wurde implementiert, um die Kommunikation zwischen den Systemen zu ermöglichen. Die Schnittstelle wird so vorbereitet, dass sie über den EDC angesteuert werden kann, um eine Datenübertragung innerhalb des IKT-Ökosystems zu gewährleisten. Die zurückgegebenen Daten werden in einem semantisch annotierten Format bereitgestellt.

6.2.2 Identitätsframework für das IKT-Ökosystem

Die Umsetzung des Identitätsframeworks im idFlexNetz erfolgt über einen strukturierten Onboarding-Prozess, der es Unternehmen ermöglicht, ihre digitale Identität vertrauenswürdig und interoperabel zu etablieren.

6.2.2.1 Onboarding-Prozess zur Identitätsvalidierung

Der Prozess umfasst mehrere Schritte, um sicherzustellen, dass die Identitäten der teilnehmenden Organisationen verifiziert und mit primärquellen-validierten Credentials ausgestattet sind.

Schritte im Onboarding-Prozess

1. Anforderung der Legal Person ID (LPID)

- Unternehmen beantragen eine **LPID** als digitale Identifikation für juristische Personen.

2. Identifikation und Erstellung der LPID

- Die LPID wird für das jeweilige Unternehmen erstellt und identifiziert die juristische Person eindeutig.

3. Vorbereitung des Identitätsprozesses

- Die vertretungsberechtigten natürlichen Personen im Unternehmen werden erfasst und auf ihre Identität überprüft.

4. Identifizierungsprozess für vertretungsberechtigte Personen

- Die Identifikation erfolgt über verschiedene Verfahren wie eID, Autoident oder Videoident.

5. Signatur von Policy-Dokumenten

- Unternehmen unterzeichnen relevante Dokumente wie den **Code of Conduct** und die **Conformity Declaration**.

6. Erstellung der digitalen Credentials

- Ausstellung von Credentials wie Ident-Credential, CoC-Credential, Mitgliedschaftsbestätigungen sowie optionalen KYC- und Sanktionslisten-Überprüfungen.
- Vergabe einer Marktpartner-ID (MP-ID) zur Nutzung im Projekt idFlexNetz.

7. Übermittlung der Credentials an die Wallets der Unternehmen

- Die finalen primärquellen-validierten Credentials werden in die EUBW der Unternehmen übertragen.

Rolle des Bundesanzeigers

Wir gehen davon aus, dass der Bundesanzeiger (Issuer [deutsch: Aussteller]) diesen Onboarding-Prozess übernehmen und die erforderlichen Identitätsnachweise ausstellen kann. Dadurch wird sichergestellt, dass die verifizierten Unternehmensidentitäten direkt in die Wallets der Teilnehmer im idFlexNetz übertragen werden.

Im Rahmen des idFlexNetz-Projekts wurde der Onboarding-Prozess mittels des Bundesanzeiger-Verlags simuliert und nicht produktiv umgesetzt.

Vorteile des Identitätsframeworks

- Hohe Vertrauenswürdigkeit durch primärquellen-validierte Credentials
- Automatisierte, sichere Identitätsüberprüfung und Authentifizierung
- Interoperabilität durch standardisierte EUBW-Lösungen
- Nahtlose Integration in das idFlexNetz-Ökosystem

Mit diesem Ansatz wird eine robuste, vertrauenswürdige und skalierbare Identitätsinfrastruktur geschaffen, die sowohl regulatorischen Anforderungen entspricht als auch eine effiziente Teilnahme am idFlexNetz ermöglicht.

6.2.2.2 W3C-Standards für digitale Identitäten

Der im idFlexNetz verwendete EUBW-Prototyp basiert auf:

- DIDs für die kryptographischen Identifikatoren der Legal Entity Wallets
- W3C Verifiable Credentials für Identitätsnachweise und KYC-Credentials
- Einem semantischen Modell zur Strukturierung von Identitäts- und KYC-Credential-Daten

Die Wallet auf dieser Basis wurde, wie bereits beschrieben, über die DSP- und DCP-Protokolle mit den idFlexNetz EDCs der Teilnehmer verbunden. Dadurch können die Policy Engines der EDCs die erforderlichen Credentials als Identitätsnachweise für eine Legal Entity oder deren Systeme anfordern und verifizieren.

Authentifizierung und Autorisierung im Projekt idFlexNetz

Vor der Freigabe von Daten digitaler Zwillinge stellt die Policy Engine sicher, dass der Transaktionspartner die erforderlichen verifizierbaren Identitätsnachweise vorlegen kann. Erst wenn die Authentifizierung und Autorisierung erfolgreich abgeschlossen sind, erfolgt der kontrollierte Datenaustausch zwischen den Beteiligten.

6.2.3 Kopplung von Modellen und Algorithmen mit einem digitalen Zwilling

Drei Minimum Viable Dataspaces (MVD) – Richtung Datenraum

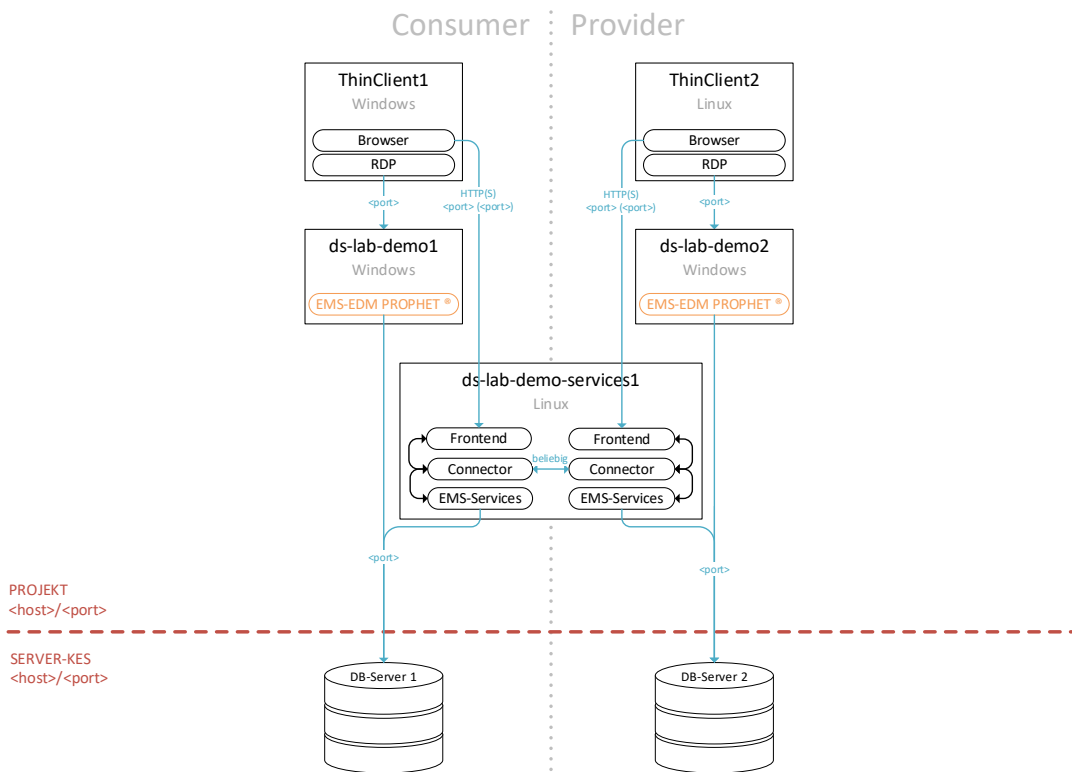


Abbildung 24: Unterscheidung Bereitstellung Angebotsinformationen und transferierte Daten (angebotene Daten)

Angebotservices: Erstellung eines Angebotservices, der Informationen darüber speichert, wie die angebotenen Daten (aus dem Use-Case PV-Anlage [Messwertbereitstellung / Prognosebereitstellung]) abgerufen werden können.

6.2.3.1 MVD-Messwertzeitreihenaustausch

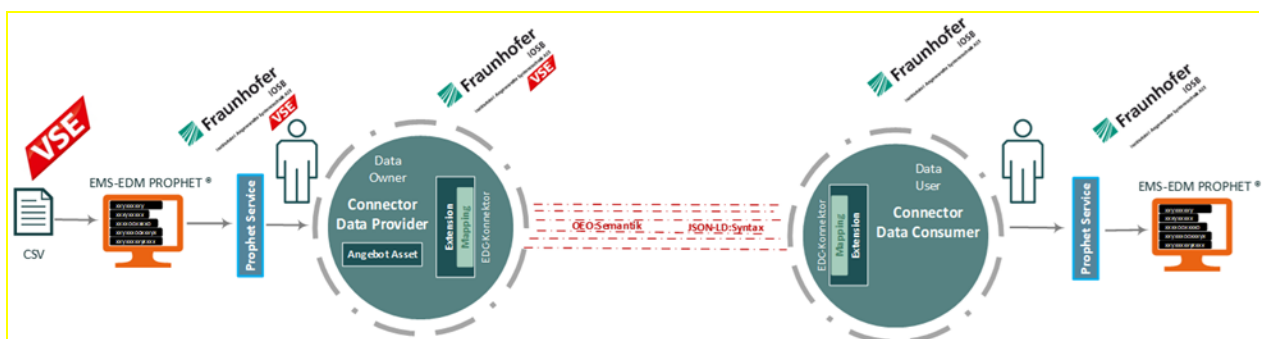


Abbildung 25: Architektur des Anwendungsfalls Messwertzeitreihenaustausch

- Bereitstellung der Messwerte
- Import und Verarbeitung (Fehlwerte, Plausibilität) der Messwerte im EMS (EMS-EDM PROPHET®)
- Datentransfer mithilfe vorherigem Mapping (EMS-spezifische Syntax – Mapping nach – JSON-LD-Syntax und OEO-Semantik)

- Import der Daten in EMS nach Empfang beim Datenkonsumenten mittels EDC-Prognoseerweiterung

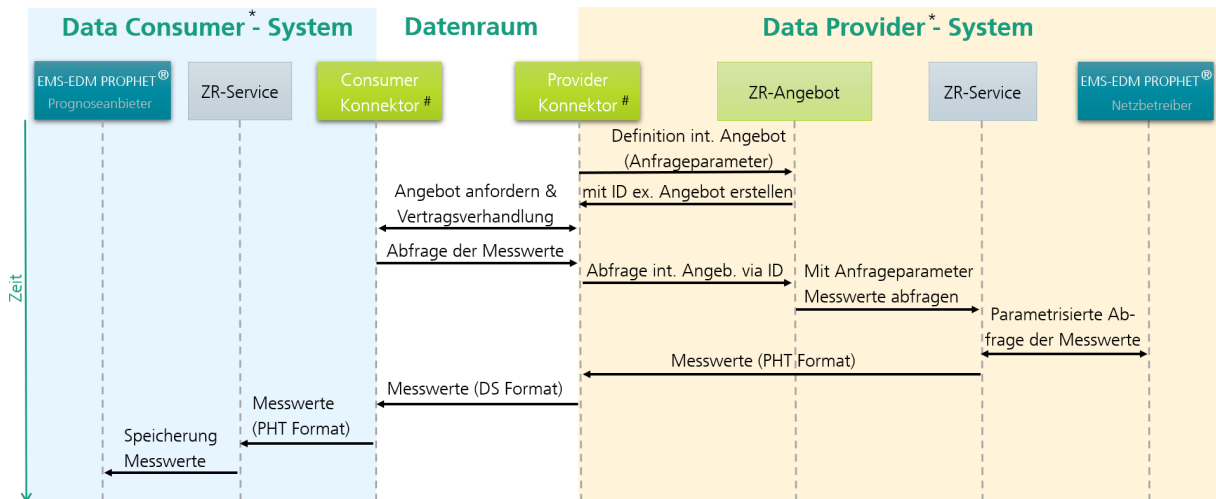


Abbildung 26: Das Sequenzdiagramm zeigt die Implementierung der Messwertzeitreihen. Die Farben symbolisieren die verschiedenen Services. Grün: EDC-Datenraum-Konnektoren mit Erweiterung. Grau: unabhängige Services als Schnittstelle zur Kommunikation mit dem Backend. Blau: Das Backend-System. (*) Rolle gemäß IDS-RAM 4; (#) EDC mit PowerFactory-Erweiterung.

6.2.3.2 MVD-Messwertzeitreihenaustausch – Prognosebereitstellung

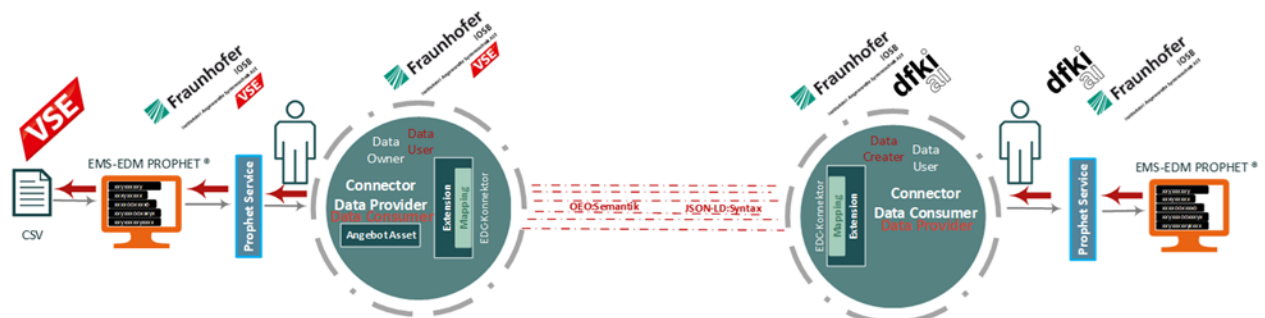


Abbildung 27: Architektur des Anwendungsfalls Messwertzeitreihenaustausch – Prognosebereitstellung

- Bereitstellung Prognosewerte
- Prognoseberechnung mithilfe der bereitgestellten Messwerte
- Die Konnektoren des Messwerteanbieters (VSE), des Datenkonsumenten (VSE) und des Prognoseanbieters (DFKI) sind in der Fraunhofer-Infrastruktur installiert.

6.2.4 Notwendige Schnittstellen zur prototypischen Realisierung des IKT-Ökosystems

Semantic Mappings: Die Datenintegration auf semantischer Ebene erfordert gemeinsame Vokabulare für die Interoperabilität zwischen verteilten Systemen. Durch die Herstellung einer Verbindung zwischen dem internen System (teilweise Legacy-Systemen) des Teilnehmers und dem Datenökosystem

mittels semantischer Mappings erfolgt eine Übersetzung, wodurch eine Verbindung auf semantischer Ebene zum Datenökosystem hergestellt wird.

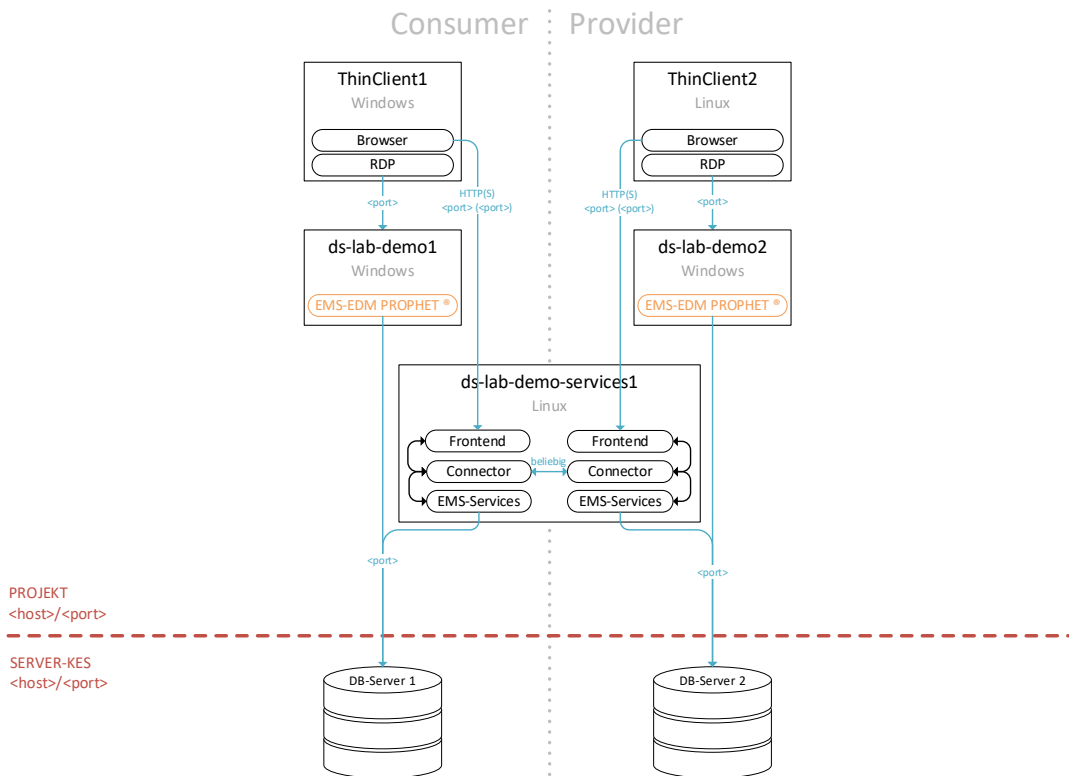


Abbildung 28: Semantische Mappings innerhalb der EDC-Erweiterung für die semantische Integration von heterogenen Systemen in das Datenökosystem Energiedatenraum

Informationen (Daten), die denselben Inhalt vermitteln, können durch die Verwendung semantischer Referenzen auf ein spezifisches Vokabular auf unterschiedliche Weise ausgedrückt werden, wie es in der menschlichen Sprache der Fall ist. Es ist jedoch möglich, aus diesen unterschiedlichen Ausdrücken denselben Sinn durch den Prozess der Inferenz abzuleiten. Dieser Ansatz ermöglicht ein hohes Maß an Flexibilität bei der Erstellung semantischer Mappings, die eine konsistente Darstellung der Daten für unterschiedlichste Backendsysteme und im Datenraum bereitstellen können.

Frontend-Entwurf eines Marktplatzes: Zur besseren Visualisierung und Evaluierung eines Marktplatzes wurde ein interaktives Frontend mit Figma entwickelt. Das entwickelte Frontend dient nicht nur als Prototyp zur Darstellung möglicher Funktionalitäten, sondern verdeutlicht auch die Schnittstellen, über die eine Integration in bestehende Marktplätze erfolgen kann. Das Design konzentriert sich auf die Darstellung eines App- und Asset-Marktplatzes mit spezifischen Unterkategorien.

1. Marktplatzübersicht

Die Startseite des Marktplatzes umfasst zwei Hauptbereiche: den App Marketplace und den Asset Marketplace. Letzterer ist unterteilt in:

- OEM Asset Marketplace: für die Bereitstellung von Assets durch Originalhersteller.
- DSO (VNB) Asset Instance Marketplace: speziell für Instanzen digitaler Zwillinge von Verteilnetzbetreibern.

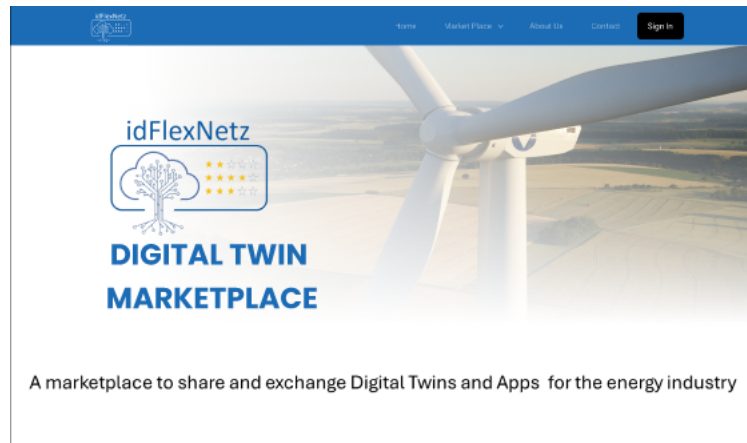


Abbildung 29: Beispielhafte Benutzeroberfläche eines digitalen Marktplatzes mit Haupt- und Unterkategorien

2. DSO (VNB) Asset Instance Marketplace

Detaillierte Ansicht eines Assets im DSO (VNB) Asset Instance Marketplace. Gezeigt wird ein Beispiel eines USV-Systems (unterbrechungsfreie Stromversorgung), inklusive:

- Genereller Informationen zum Asset,
- Technischer Spezifikationen und Daten,
- Einem QR-Code, der auf den digitalen Zwilling verweist.

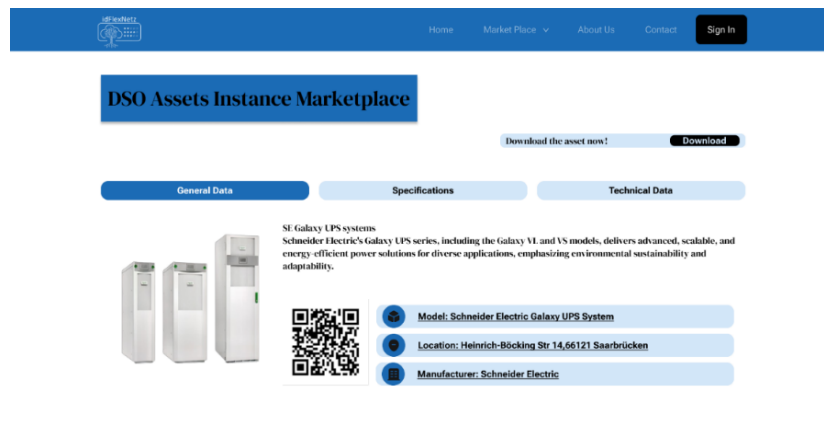


Abbildung 30: Detaillierte Darstellung eines Assets mit technischen Daten und digitalem Zwilling.

3. Netzkomponenten im Betrieb

Darstellung verschiedener Netzkomponenten, die über den Marktplatz abgebildet werden. Diese Ansicht zeigt die Bandbreite der Assets und verdeutlicht die Vernetzung zwischen physischen und digitalen Komponenten.

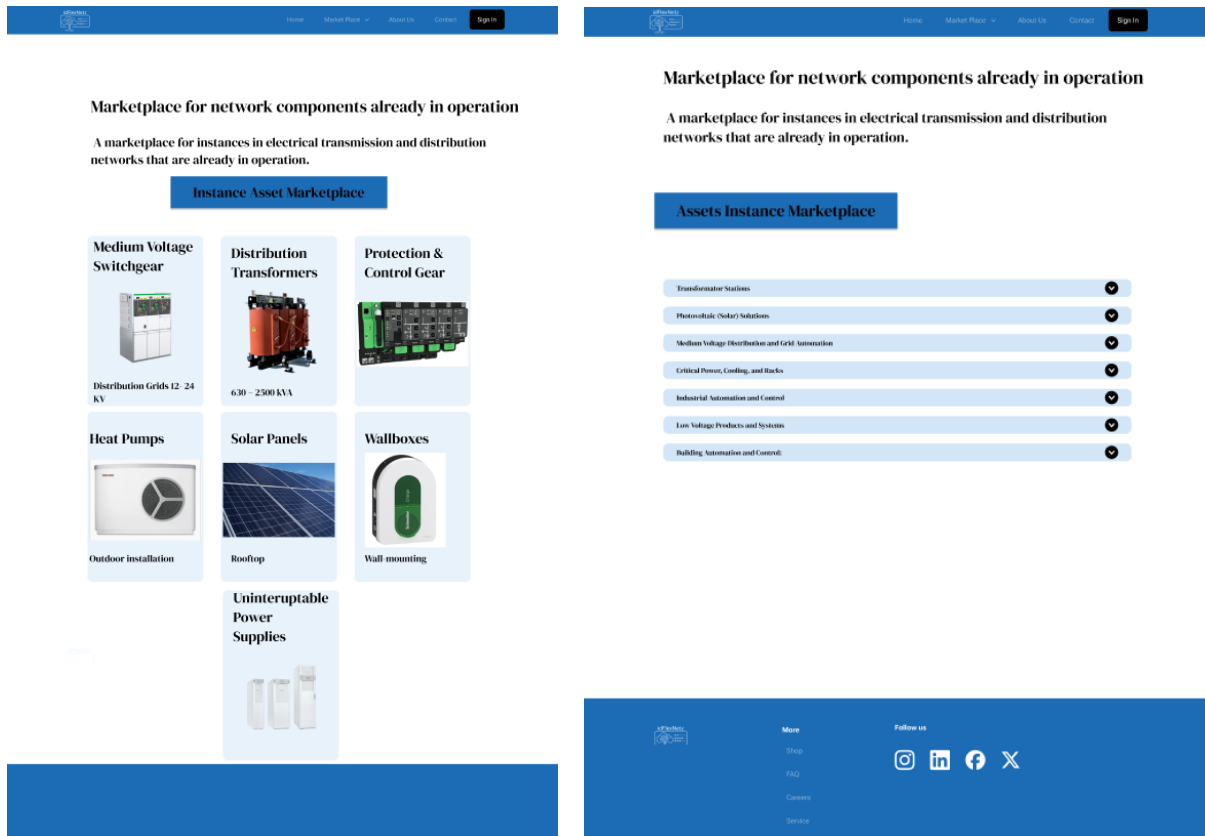


Abbildung 31: Übersicht über im Betrieb befindliche Netzkomponenten.

In Figma wurde ein prototypisches Frontend entwickelt, welches durch seinen modularen Aufbau besticht und dadurch für zukünftige Funktionen skalierbar bleibt. Die klare Darstellung von Assets und Metadaten erleichtert die Nutzung und Integration. Der Prototyp veranschaulicht exemplarisch, wie digitale Zwillinge und andere Assets in Datenökosystemen dargestellt und ausgetauscht werden können, und dient als Grundlage für einen standardisierten, marktplatzübergreifenden Interoperabilitätsansatz.

6.2.5 Weitere Schnittstellen zur prototypischen Realisierung des IKT-Ökosystems

Es wurde ein prototypischer Marktplatz entwickelt, auf dem nach Assets wie Zeitreihen und digitalen Zwillingen gesucht werden kann. Die Oberfläche wurde in JavaScript programmiert. Diese greift mit Cypher-Queries auf die in 4.2.5 entwickelte Neo4j-Graphdatenbank zu und stellt die Suchergebnisse im Frontend dar.

6.2.5.1 Zeitreihen- und Prognosesuche

Mittels der Zeitreihen- und Prognosesuche lässt sich die Graphdatenbank nach Zeitreihen-Individuen und Untermengen wie Wetterdaten durchsuchen. Außerdem kann für eine gezieltere Suche nach Einheiten gefiltert werden.

Abbildung 32: Mittels der Asset-ID können die Assets im EDC gezielt gesucht und nach einer Verhandlung ausgetauscht werden.

6.2.5.2 Suche nach digitalen Zwillingen

Bei der Suche nach digitalen Zwillingen werden im Reiter „Capabilities Overview“ (siehe Abbildung 33) zunächst zur Information für den Anwender die möglichen Fähigkeiten aufgelistet, die einem digitalen Zwilling zugeordnet werden können. Darunter werden alle in der Datenbank hinterlegten digitalen Zwillinge mit ihrem Score (Bewertung) angezeigt.

Abbildung 33: Reiter „Capabilities Overview“ mit Auflistung möglicher Fähigkeiten, die einem digitalen Zwilling zugeordnet werden können

Durch Aufklappen eines digitalen Zwillings werden die ihm zugewiesenen Fähigkeiten aus den unterschiedlichen Kategorien (Modell, Integration, Kontrolle, Berechnung, Daten und Mensch-Maschine-Interaktion) dargestellt (siehe Abbildung 34).

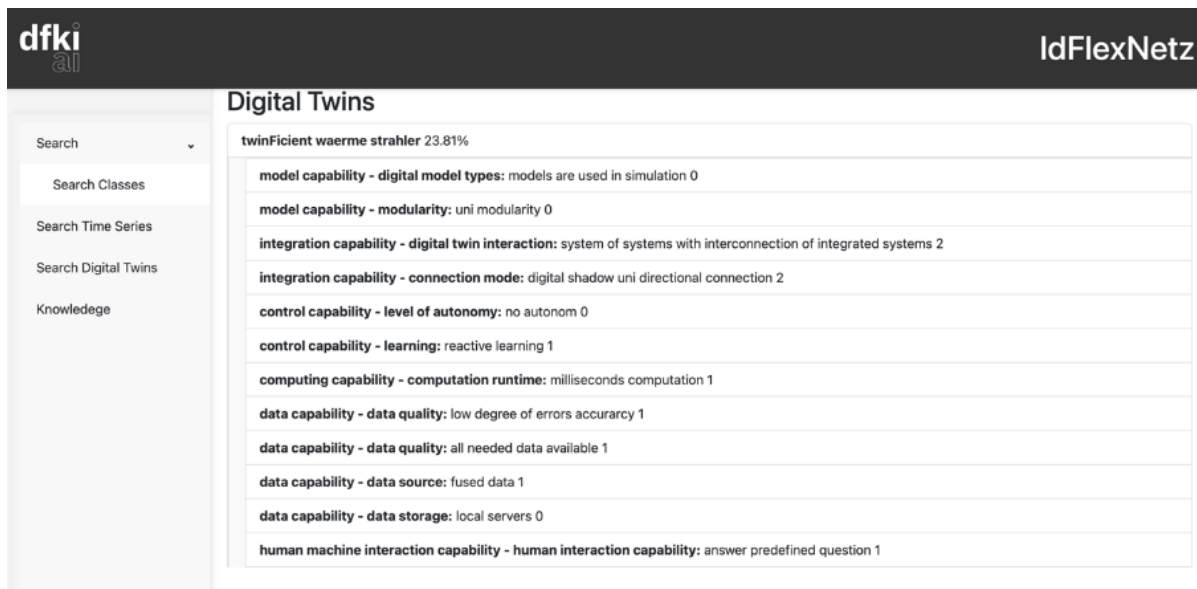


Abbildung 34: Die einem digitalen Zwilling zugeordneten Fähigkeiten aus unterschiedlichen Kategorien

6.2.6 Assistenzsystem zur Auswahl der Vorhersagekomponente

Das Assistenzsystem zur Auswahl der Vorhersagekomponenten bzgl. Anwendungszweck und Bewertung wird durch die entwickelte Ontologie unterstützt. Mittels des Reifegrades für digitale Zwillinge werden die Suche und das Filtern nach passenden digitalen Zwillingen unterstützt. Je nach eigenen Anforderungen kann nach den unterschiedlichen Fähigkeitskategorien gesucht und sortiert werden.

Die Fähigkeiten sind wie folgt:

Modell

In Abbildung 35 werden die Fähigkeiten des Modells wie „Model Authenticity“, „Model Maintenance“, „Digital Model Types“ und „Modularity“ dargestellt.

model capability
<p>model authenticity How is the authenticity of the DT? How good is the representation of the reality? 0 no, 1 low, 2 middle, 3 high (https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9807313, Digital Twins: A Maturity Model for Their Classification and Evaluatio, J. Uhlenkamp et al.)</p>
<p>model maintenance How is the model quality observed and controlled? 0 Model descriptions are not formalized and maintained manually, 1 Models are formalized and periodic maintenance procedures are used, 2 Individual models can detect lacking model quality itselfe, 3 individual models can detect lacking model quality itselfe and reload latest data and code itselfe (https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9807313, Digital Twins: A Maturity Model for Their Classification and Evaluatio, J. Uhlenkamp et al.)</p>
<p>digital model types How are the characteristics of the DT modelled? -Conceptual Models, -Physics-Based Models, -Data/Machine Learning-Based Models, - Models is used in Simulation (https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9807313, Digital Twins: A Maturity Model for Their Classification and Evaluatio, J. Uhlenkamp et al.)</p>
<p>modularity How modular and reusable is the DT? 0 Unit, 1 System, 2 System of Systems (https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9807313, Digital Twins: A Maturity Model for Their Classification and Evaluatio, J. Uhlenkamp et al.)</p>

Abbildung 35: Modell

Integration

integration capability
<p>connection mode How is the DT connected to the real world? 1 Digitla Model / Offline, 2 Digital Shadow / Uni-Directional, 3 Ideal DT / Bi-Directional (https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9807313, Digital Twins: A Maturity Model for Their Classification and Evaluatio, J. Uhlenkamp et al.)</p>
<p>digital twin interaction Is it only one or are there more DTs? 1 Standalone, 2 System of Systems with Interconnection/Network of integrated Systems, 3 System of Systems with collaboration but indepentent goals 4, System of Systems with one/common goals and optimization (https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9807313, Digital Twins: A Maturity Model for Their Classification and Evaluatio, J. Uhlenkamp et al.)</p>

Abbildung 36: Integration

Kontrolle

control capability
<p>learning how is the learning capability? 0 no learning, +1 reactiv learning, +1 historical learning, +1 fast learning (https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9807313, Digital Twins: A Maturity Model for Their Classification and Evaluatio, J. Uhlenkamp et al.)</p>
<p>level of autonomy What are levels of autonomy? 0 no autonom, 1 user assistance, 2partial autonomy, 3 conditional autonomy, 4 high autonomy, 5 full autonomy (https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9807313, Digital Twins: A Maturity Model for Their Classification and Evaluatio, J. Uhlenkamp et al.)</p>

Abbildung 37: Kontrolle

Berechnung

computing capability
<p>computation runtime How is the runtime/response time ? 0 hours, 0 minutes, 1 seconds, 1 milliseconds (https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9807313, Digital Twins: A Maturity Model for Their Classification and Evaluatio, J. Uhlenkamp et al.)</p>
<p>look ahead How far ahead does the DT think? +1 long-term, +1 middle-term, +1 short-term (https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9807313, Digital Twins: A Maturity Model for Their Classification and Evaluatio, J. Uhlenkamp et al.)</p>
<p>update frequency output How often is the result of the DT applied? 0 Periodic, 1 instant / real time (https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9807313, Digital Twins: A Maturity Model for Their Classification and Evaluatio, J. Uhlenkamp et al.)</p>
<p>update frequency input How often is new data considered and the DT models updated? 0 every day, 1, every hour, 2 real-time (https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9807313, Digital Twins: A Maturity Model for Their Classification and Evaluatio, J. Uhlenkamp et al.)</p>

Abbildung 38: Berechnung

Daten

data capability
<p>data quality How is the quality? +1 Accuracy: Low degree of errors, +1Completness: All needed data available, +1 Semantic Consistency: Uniform Vocabulary and Definitions, +1 Structural Consistency: Uniform Format and Structure (https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9807313, Digital Twins: A Maturity Model for Their Classification and Evaluatio, J. Uhlenkamp et al.)</p>
<p>data storage Where is the data storage location? -Local servers, -External cloud, -Edge based (https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9807313, Digital Twins: A Maturity Model for Their Classification and Evaluatio, J. Uhlenkamp et al.)</p>
<p>data source What is the source of the data? +1 Physical Data, +1 Fused Data (https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9807313, Digital Twins: A Maturity Model for Their Classification and Evaluatio, J. Uhlenkamp et al.)</p>

Abbildung 39: Daten

Mensch-Maschine-Interaktion

human machine interaction capability
human interaction capability No Comment
types of interaction capability What types of devices are used? 1 traditional, unimodal interaction devices, 2 multi-modal interaction devices, +1 adaptive assistance system (https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9807313 , Digital Twins: A Maturity Model for Their Classification and Evaluation, J. Uhlenkamp et al.)

Abbildung 40: Mensch-Maschine-Interaktion

Beispiel: Digitaler Zwilling eines industriellen Wärmestrahlers

Im Beispiel wird ein digitaler Zwilling eines industriellen Wärmestrahlers mit seinen Fähigkeiten dargestellt (siehe Abbildung 41).

Digital Twins

twinFicient waerme strahler 23.81%
model capability - digital model types: models are used in simulation 0
model capability - modularity: uni modularity 0
integration capability - digital twin interaction: system of systems with interconnection of integrated systems 2
integration capability - connection mode: digital shadow uni directional connection 2
control capability - level of autonomy: no autonom 0
control capability - learning: reactive learning 1
computing capability - computation runtime: milliseconds computation 1
data capability - data quality: low degree of errors accurarcy 1
data capability - data quality: all needed data available 1

Abbildung 41: Beispiel eines digitalen Zwillings für einen industriellen Infrarot-Heizstrahler

Zusätzlich lassen sich Zeitreihen und Prognosen (Es werden gerade Zeitreihen ausgegeben.) nach ihren Einheiten filtern. Des Weiteren wurde der Reiter „Knowledge Graph“ integriert, der den zusammenhängenden Graphen einer Entität anzeigt, um kontextuelle Informationen zu erhalten.

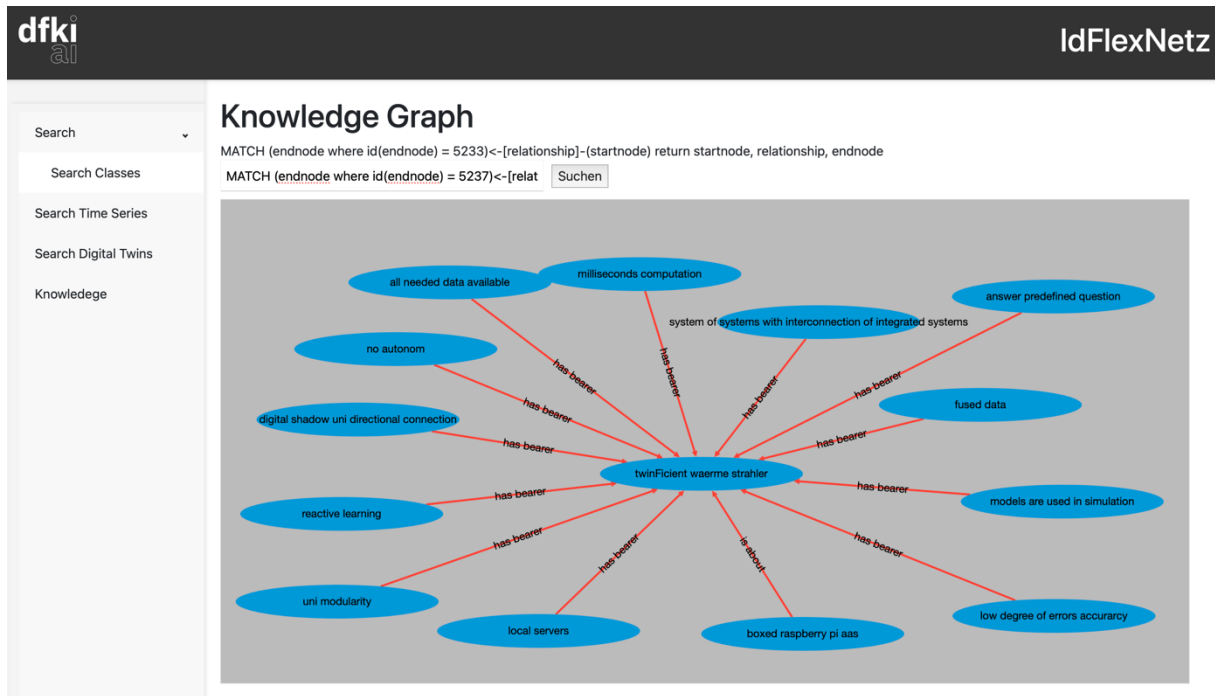


Abbildung 42: Knowledge Graph, der den zusammenhängenden Graphen einer Entität mit kontextuellen Informationen darstellt.

6.2.7 Scoring-Verfahren, Metriken und Bewertungsverfahren für Prognosen

Im Paper <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9807313> wird ein Scoring bzw. Reifegrad für digitale Zwillinge und damit auch Prognosen vorgestellt. Fähigkeiten wurden in fünf Hauptfähigkeitsgruppen unterteilt.

Beispiel:

Im Beispiel wird ein digitaler Zwilling eines industriellen Wärmestrahlers mit seinen Fähigkeiten und einem Score von 23,81 dargestellt.

Digital Twins

twinFicient waerme strahler 23.81%	
model capability - digital model types:	models are used in simulation 0
model capability - modularity:	uni modularity 0
integration capability - digital twin interaction:	system of systems with interconnection of integrated systems 2
integration capability - connection mode:	digital shadow uni directional connection 2
control capability - level of autonomy:	no autonom 0
control capability - learning:	reactive learning 1
computing capability - computation runtime:	milliseconds computation 1
data capability - data quality:	low degree of errors accuracy 1
data capability - data quality:	all needed data available 1

Abbildung 43: Beispiel eines digitalen Zwillinges für einen industriellen Infrarot-Heizstrahler und dessen Score

6.3 Umsetzung der digitalen Güter

6.3.1 Schnittstellen zur Interoperabilität und Portabilität digitaler Güter für den Netzbetrieb

In diesem UAS lag der Schwerpunkt der Arbeiten auf der Festlegung einheitlicher Datenformate, z. B. für Standort und Leistung. Es wurde darauf geachtet, dass diese Daten mit den Systemen der Netzbetreiber kompatibel sind, etwa mit denen der Netzgesellschaften der VSE-Gruppe. Die Partner waren sich einig, dass dies ein grundlegendes „Must-have“ ist, um die Akzeptanz bei den Netzbetreibern zu fördern.

6.3.2 Abbildung von Anwendungen, Geräten, Modellen und digitalen Zwillingen mittels digitaler Identitäten

6.3.2.1 Eintrag der Güter – Cybersicherheit-Betrachtung

In Tabelle 17 ist das rollenbasierte Zugriffs- und Sicherheitskonzept für die Rollen Verteilnetzbetreiber, Komponentenhersteller und Prognoseanbieter dargestellt.

Tabelle 17: Rollenbasiertes Zugriffs- und Sicherheitskonzept

Rolle	Beschreibung	Meta-daten	Typenschi Id (name plate)	Technische Daten (data sheet)	CIM Modelle	Nutzungsbedingung (Techn. Daten)	Prognose	Nutzungsbedingung (Prognose)
Verteilnetzbetreiber	Nutzer der Modelle (Anwender)	X	X	X	X	Vertrag	X	Vertrag
Komponentenhersteller	Ersteller von Typen der digitalen Zwillinge	X	X	X	X	n.a.	-	-
Prognoseanbieter	Anbieter von Prognosediensten	X	-	-	-	-	X	n.a.

6.3.3 Implementierung der digitalen Zwillinge als digitale Güter

Es wurden einige Netzkomponenten der zuvor definierten Assetklassen als digitale Zwillinge in AASx-Dateien mit dem Open-Source-AASx-Explorer V3 (08-05-2024) modelliert.

1. Transformator
2. Ringkabelschaltanlage (Ring Main Unit)
3. Fernsteuereinheit (Remote Terminal Unit)
4. Solar Module
5. Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)
6. End Devices (hinter dem Zähler)
 - Wallbox
 - Wärmepumpe

Es wurde das CIM-Modell (IEC 61970-301:2020 und IEC 61968-11:2013) eingesetzt. Des Weiteren wurden die OEO für die Güter sowie ECLASS und IEC CDD für die Semantik-IDs der Eigenschaften verwendet. Zusätzlich wurden die SAREF/ENER-Ontologie und „The HeatPump Ontology“ für einige Features der Solarmodule und der Endgeräte (Ladesäule und Wärmepumpe) verwendet. Es gibt zwei CIM-

Submodelle in den Transformator- und Ringkabelschaltanlage-Dateien: ein mit dem „ready to use“ CIM-XML Datei, und ein anderes, das in der AAS mit Submodell-Elementen das CIM modelliert.

6.3.3.1 CIM-Hauptelemente der Modellierung von digitalen Zwillingen der Güter

Transformator mit Stufenschalter

Die verbundenen UML-Modelle sind wie folgt:

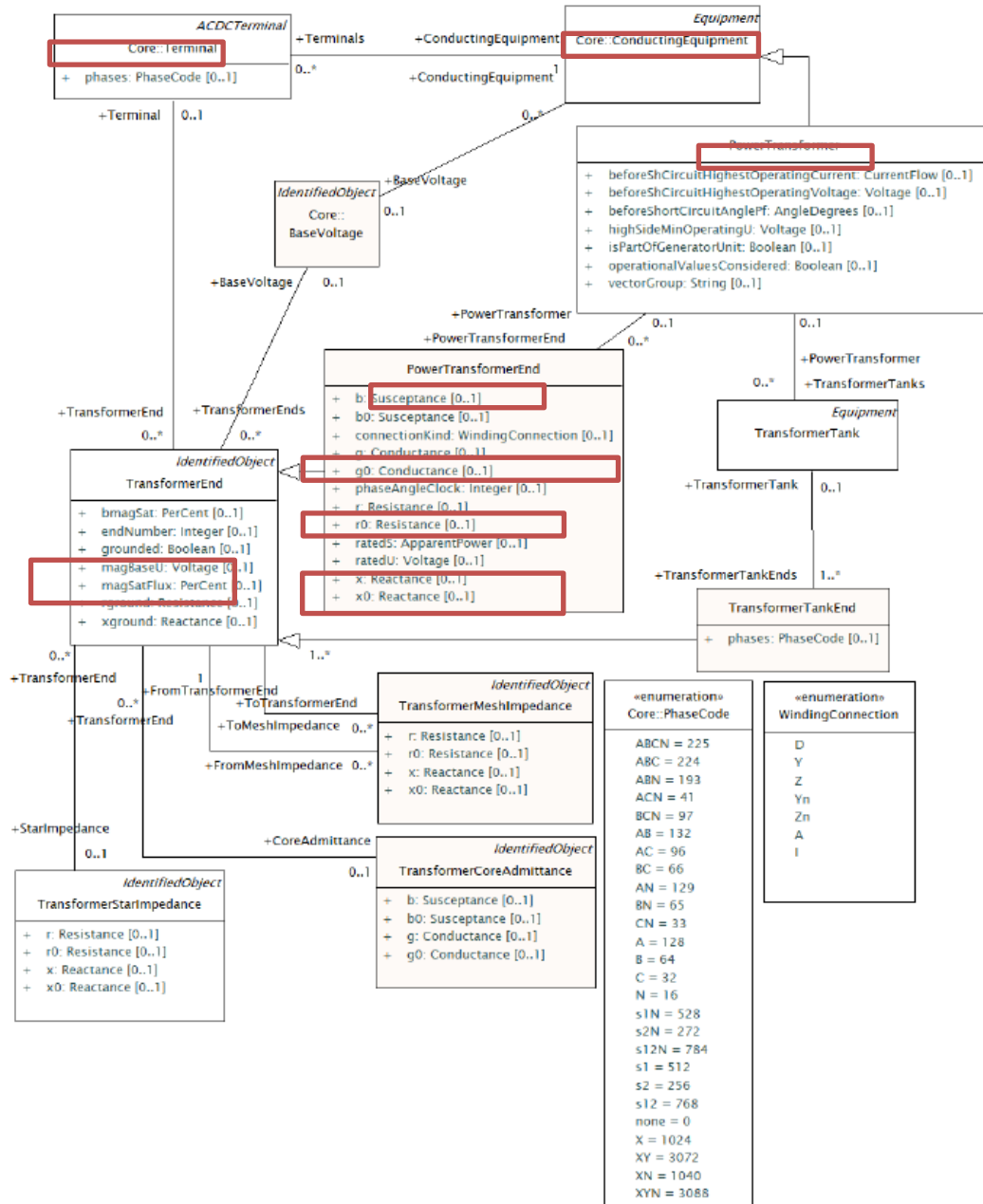


Abbildung 44: UML-Diagramm des Transformator-Modells – CIM – IEC 61970-301

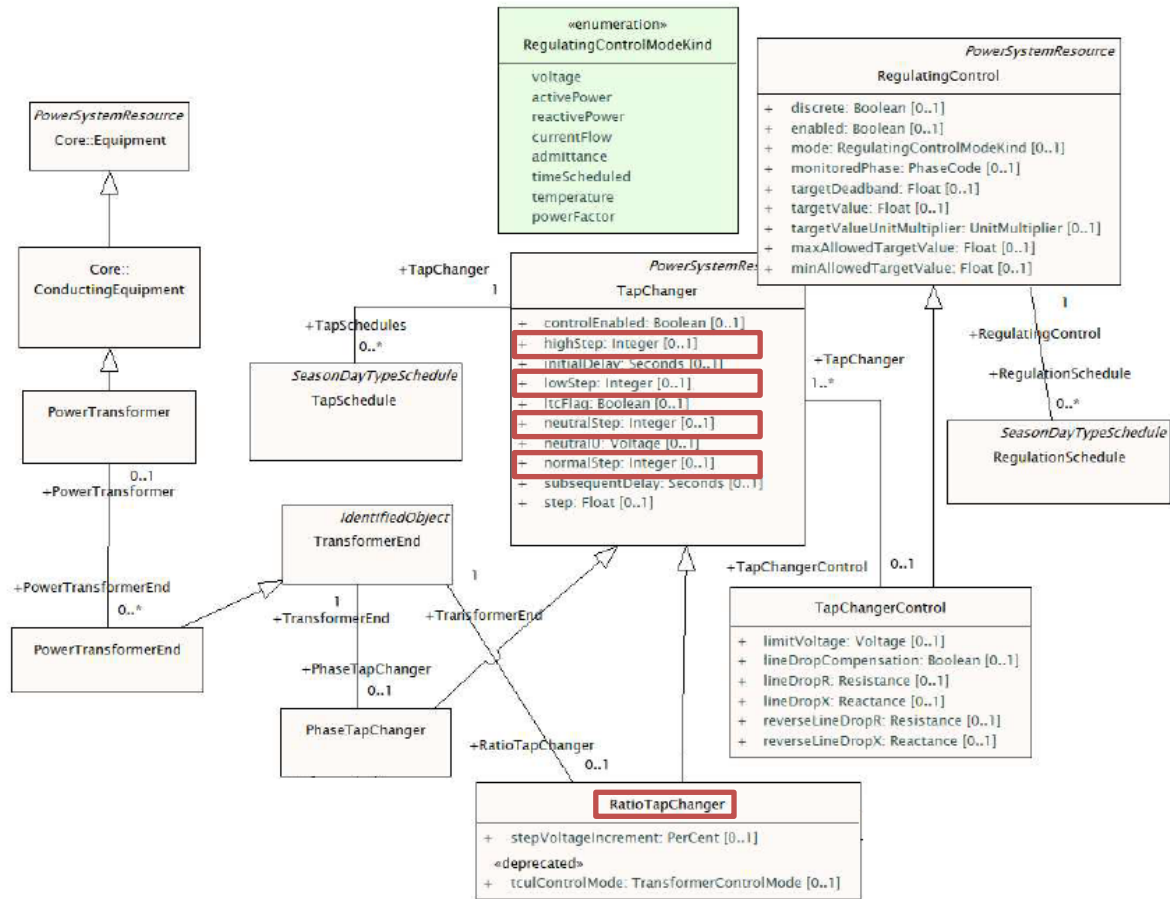


Abbildung 45: UML-Diagramm des einfacheren Stufenschalter-Modells – CIM – IEC 61970-301

Hinweis: Die verwendeten Klassen und Eigenschaften in der CIM-XML-Datei und im CIM-Submodell sind orange umrandet.

Dabei wurden die Klassen „ConductingEquipment“ (Vererbung), „PowerTransformer“, „PowerTransformerEnd“, „TransformerEnd“ (Vererbung), „Terminal“, „RatioTapChanger“ und „Tapchanger“ (Vererbung) verwendet.

In Abbildung 46 wird am Beispiel eines Transformators die Struktur der AASx-Datei dargestellt.

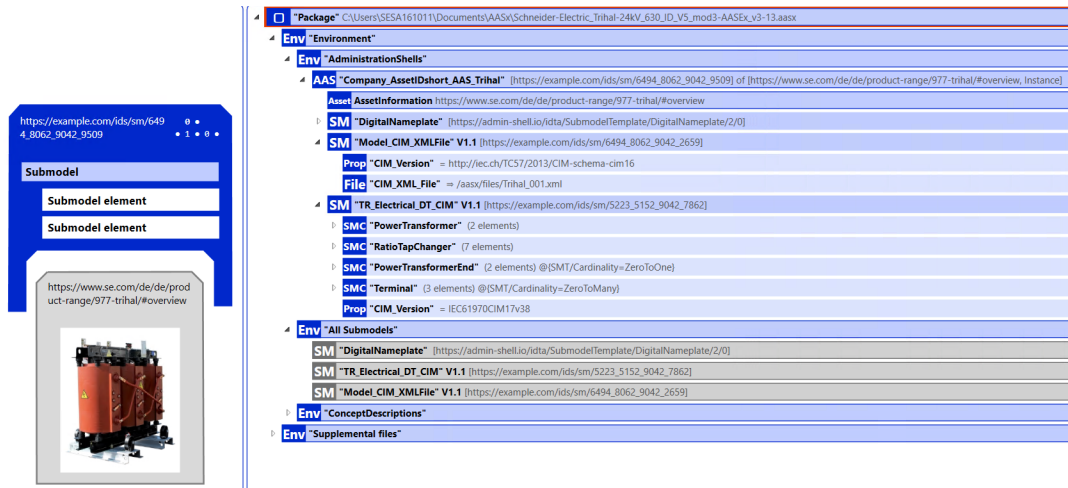


Abbildung 46: AASx-Struktur am Beispiel eines Transformators

Die Ringkabelschaltanlage (RMU)

Für die Ringkabelschaltanlage werden die Elemente Leistungsschalter, Sicherung und Trennschalter verwendet. Die damit verbundenen UML-Modelle sind in Abbildung 47 dargestellt.

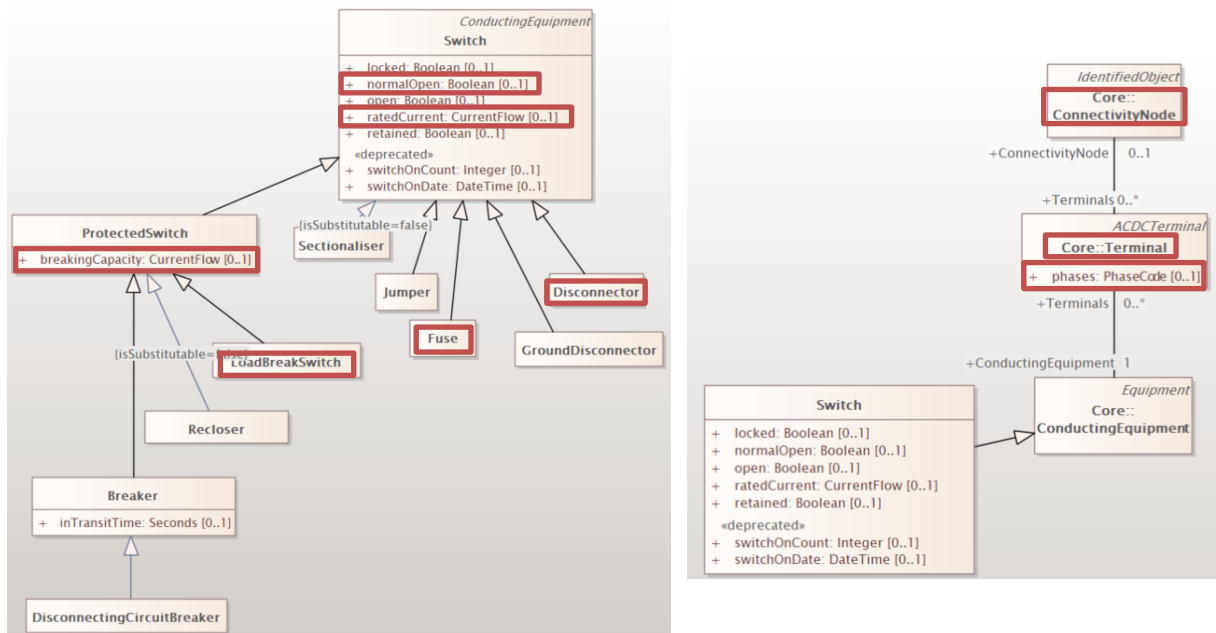


Abbildung 47: UML-Diagramm des einfacheren Switch-Modells – CIM – IEC 61970-301

Es wurden die Klassen „ConductingEquipment“ (Vererbung), „Switch“ (Vererbung), „Fuse“, „Disconnecter“, „Protected Switch“ (Vererbung), „LoadBreakSwitch“, „Terminal“ und „Connectivity Node“ verwendet.

Das einzeilige Diagramm der Ringkabelschaltanlage ist in Abbildung 48 dargestellt.

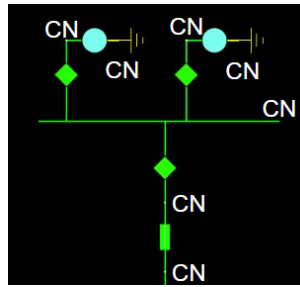


Abbildung 48: Diagramm der Ringkabelschaltanlage

Hinweis: Die Charakteristik der Nennspannung wurde als benutzerdefinierte Eigenschaft und Teil der Klasse ‚ConductingEquipment: ratedVoltage‘ an den Schalter und die Sicherung angelegt.

Die Struktur der AASx-Datei ist die folgende:

Abbildung 49: AASx-Struktur am Beispiel einer Ringkabelschaltanlage

Die einzelnen Funktionen werden der Schaltanlage zugeordnet.

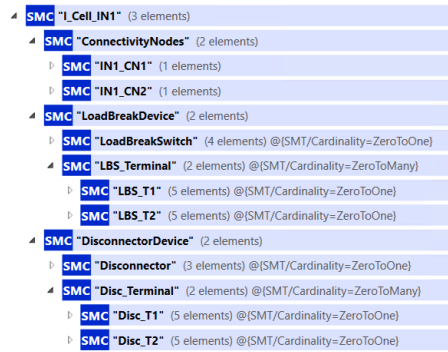


Abbildung 50: AASx-Struktur des Ringkabelschaltanlage-CIM-Submodells per Funktion der Schaltanlage (Beispiel I_Cell_IN1)

Die Remote Terminal Unit

Das CIM-Modell der Remote-Terminal-Unit ist sehr einfach, da es nur eine Klasse ‚RemoteUnit‘ enthält.

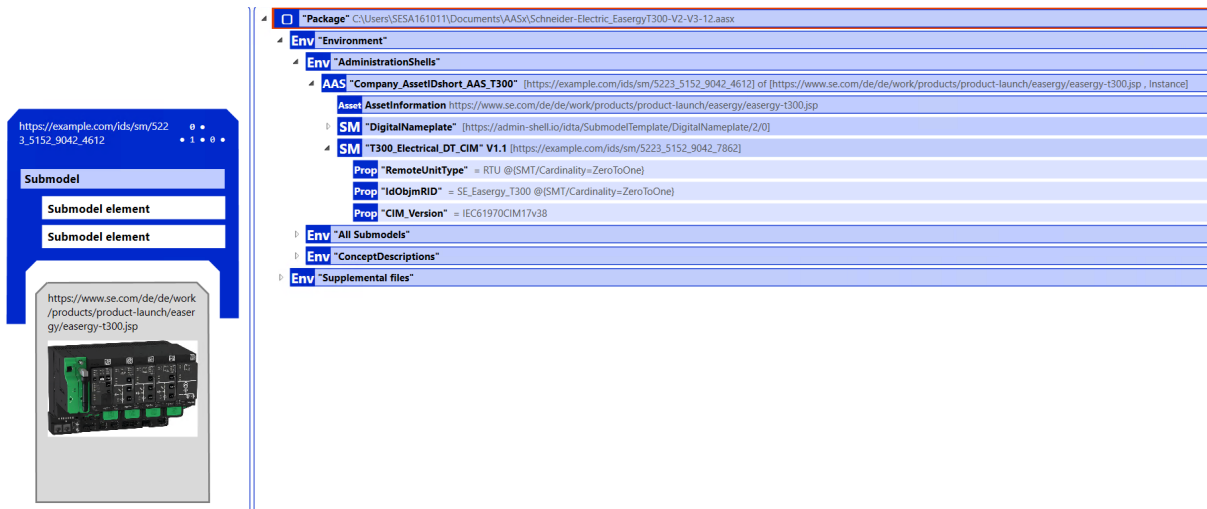


Abbildung 51: AASx-Struktur am Beispiel einer Remote Terminal Unit

PV-Anlage

Im CIM wurde das Profil Wallbox über die Klasse ‚PhotoVoltaicUnit‘ mit den Eigenschaften der Klasse ‚PowerElectronicsUnit‘ angelegt.

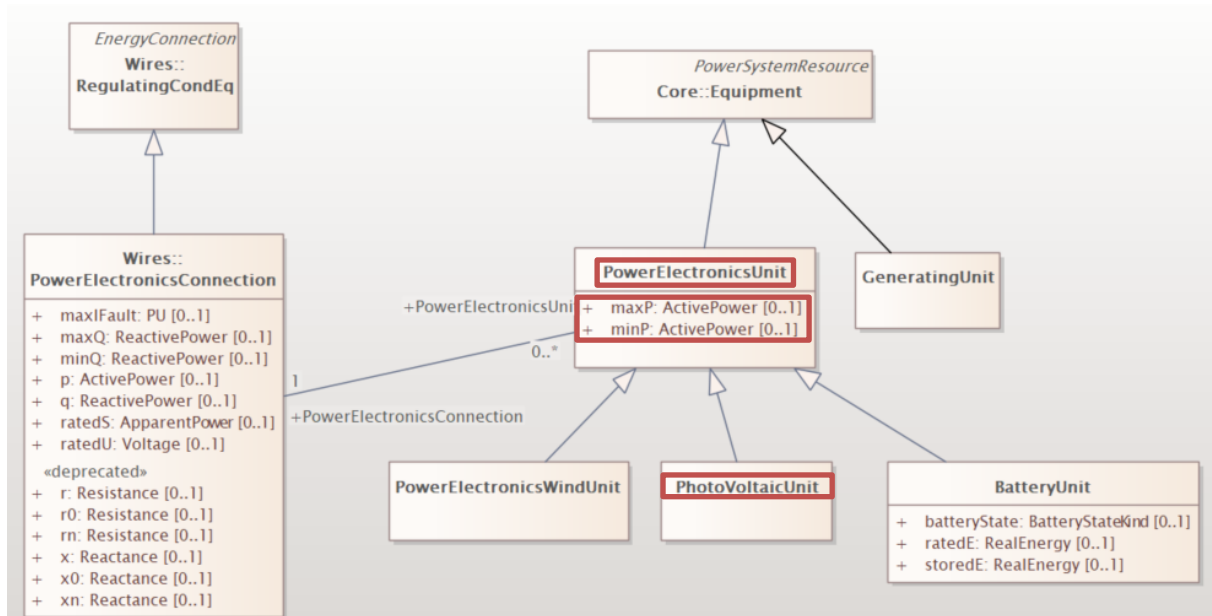


Abbildung 52: Einfaches PV-Anlagen-Modell – CIM – IEC 61970-301

Die Semantik der anderen Eigenschaften wurde mit Hilfe der SAREF/ENER-Ontologie eingegeben.

Die Struktur der AASx-Datei ist die folgende:

https://example.com/ids/sm/3585_5172_1052_2968

Submodel

Submodel element

Submodel element

https://www.se.com/de/de/work/products/product-launch/easergy/easergy-t300.jsp

```

Package: C:\Users\SESA161011\Documents\AASx\Solar_Panel_v2.aasx
Env "Environment"
  Env "AdministrationShells"
    AAS "Company_AssetDshort_AAS_PV" [https://example.com/ids/sm/3585_5172_1052_2968] of [https://www.se.com/de/de/work/products/product-launch/easergy/easergy-t300.jsp, Instance]
      Asset "AssetInformation" https://www.se.com/de/de/work/products/product-launch/easergy/easergy-t300.jsp
        SM "DigitalNameplate" [https://admin-shell.io/ida/SubmodelTemplate/DigitalNameplate/2/0]
        SM "PV_VNB_DT" V1.1 [https://example.com/ids/sm/5223_5152_9042_7862]
          Ref "IdObjmRID" = [Submodel, https://example.com/ids/sm/5223_5152_9042_7862][SubmodelElementCol...
          Ref "IdObjName" = [Submodel, https://example.com/ids/sm/5223_5152_9042_7862][SubmodelElementCol... @SMT/Cardinality=ZeroToOne]
          SMC "PV_Address" (5 elements)
            Prop "Connection_voltage" = 31.61 [V] @SMT/Cardinality=ZeroToOne
            Prop "Rated_Power" = 410 @SMT/Cardinality=ZeroToOne
          SMC "CIM_Model_Wallbox" (5 elements) @SMT/Cardinality=ZeroToOne
            Prop "IdObjmRID" = PV_ID @SMT/Cardinality=ZeroToOne
            Prop "IdObjName" = PV_Example @SMT/Cardinality=ZeroToOne
            Prop "PEU_maxP" = 410 [W] @SMT/Cardinality=ZeroToOne
            Prop "PEU_minP" = 10 [W] @SMT/Cardinality=ZeroToOne
            Prop "CIM_Version" = IEC61970CIM17v38 @SMT/Cardinality=ZeroToOne
          SM "PV_Prognose_Anbieter_DT" V1.1 [https://example.com/ids/sm/9185_4142_1052_4361]
            Prop "IdObjmRID" = PV_ID @SMT/Cardinality=ZeroToOne
            Prop "IdObjName" = PV_Example @SMT/Cardinality=ZeroToOne
            Prop "Rated_Power" = 410 @SMT/Cardinality=ZeroToOne
            Prop "Geo_Coordinates" = 52.516497, 13.377645 @SMT/Cardinality=ZeroToOne
            Prop "Connection_voltage" = 31.61 [V] @SMT/Cardinality=ZeroToOne
            Prop "Orientation" = 0 [degrees] @SMT/Cardinality=ZeroToOne
          SM "PV_Input_Power_TS" V1.1 [https://admin-shell.io/ida/SubmodelTemplate/TimeSeries/1/1]
          SM "PV_Output_Power_TS" V1.1 [https://example.com/ids/sm/6065_5172_1052_6594]
          SM "PV_Direct_Radiation_TS" V1.1 [https://example.com/ids/sm/4485_5172_1052_2552]
          SM "PV_Diffuse_Radiation_TS" V1.1 [https://example.com/ids/sm/0585_5172_1052_7656]
          SM "PV_Temperature_TS" V1.1 [https://example.com/ids/sm/3585_5172_1052_3968]
        Env "All Submodels"
        Env "ConceptDescriptions"
        Env "Supplemental files"
    
```

Abbildung 53: AASx-Struktur am Beispiel einer PV-Anlage

Ladesäulen, Wärmepumpe (hinter dem Netzanschlusspunkt)

Im CIM-Modell wurden diese „Geräte hinter dem Netzanschlusspunkt“ gemäß der Norm IEC 61968 modelliert und als Klasse MeteringEndDevice beschrieben.



Abbildung 55: AASx-Struktur am Beispiel einer Ladesäule

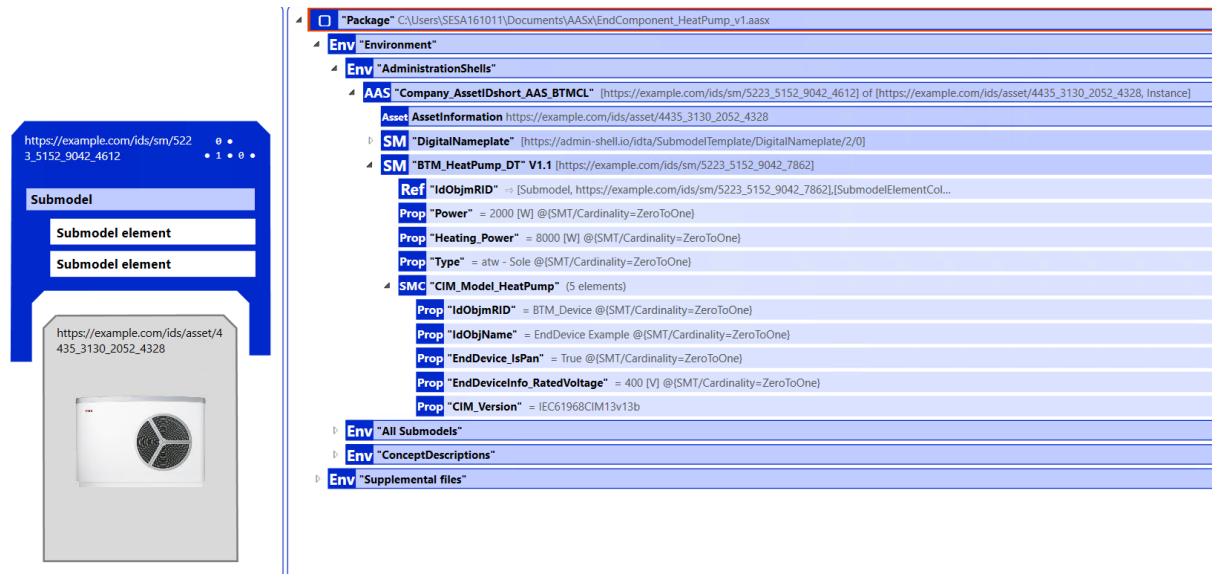


Abbildung 56: AASx-Struktur am Beispiel einer Wärmepumpe

6.3.3.2 Metadaten der digitalen Zwillinge

Die wichtigsten (und für den Broker nützlichen) Metadaten werden in Tabelle 18 aufgeführt.

Tabelle 18: Digitale Zwillinge und ihre Metadaten

	Eigenschaften	Wertesatz
Transformator	Hersteller	Schneider Electric
	Produktname	Trihal
	Transformatorartyp	Gießharz
	Nennleistung	630000 VA
	U-Oberspannungsseite	24000 V
	U-Niederspannungsseite	400 V

Ringkabelschaltanlage (RMU)	Hersteller Produktname Produkttyp Nennspannung Nennstrom	Schneider Electric RMAirSet RMU SF6 Free 24000 V 630 A
T300	Hersteller Produktname Produkttyp	Schneider Electric Easergy T300
USV	Hersteller Produktname Produkttyp	Schneider Electric Galaxy 3-phase UPS VS modular 10-150 kW
Wallbox	Produktname Leistung Spannung	EVlink Pro AC 22000 W 400 V
Wärmepumpe	Hersteller Produktname Produkttyp Leistung Heizleistung Nennspannung	StiebelEltron WPL-A07HK230 Premium Luft-Wasser WP 2000 W 8000 W 400 V
Solar Module	Hersteller Produktname Produkttyp Anschlussspannung Nennleistung	Becker pm-108n—410wp p-type-perc 31,61 V 410 W

6.3.4 Beschreibung digitaler Güter über KPIs

Prognosequalitätsservice (-monitoringservice): Für die Darstellung eines Services zur Bewertung von Algorithmen wird der Prognosequalitätsservice (-monitoringservice) bereitgestellt. Mit dessen Hilfe lassen sich die Prognosefehler bestimmen. Durch die Übergabe der prognostizierten Zeitreihe und der tatsächlich gemessenen Werte lässt sich ein Fehlerwert berechnen.

6.3.4.1 Konzepte zur Evaluation von Prognose- und Optimierungsservices

a) Katalog und Ontologie

Der Datenraum bietet eine Suchfunktion innerhalb eines Katalogs, in dem alle Angebote gespeichert sind. Diese Angebote sind annotierte Services, die in der Ontologie instanziiert wurden. Dadurch sind die Angebote durchsuchbar. Dem Angebot werden Bewertungen hinzugefügt, die den potenziellen Nutzern die Auswahl des passenden Angebots erleichtern sollen.

b) Bewertungsfunktion

Die Bewertungsfunktionen für Services wie Prognose- und Optimierungsservices dürfen keine allgemeinen Bewertungen wie "funktioniert gut" oder "hat mir weitergeholfen" enthalten. Die Bewertung

muss auf Grundlage der gegebenen Kriterien erfolgen, die auch die Rubrik einbeziehen, d.h. den Anwendungsfall, für den diese verwendet werden können.

Eine Bewertungsfunktion, die die Services spezifischer analysiert, könnte verhindern, dass Services in jede Rubrik eingetragen werden.

c) Qualitätsbewertung

Die Qualität eines Prognoseservices lässt sich anhand verschiedener Metriken wie etwa MAPE (Mean Absolute Percentage Error) messen. Mit diesen Metriken lässt sich die Leistung verschiedener Methoden vergleichen.

6.3.4.2 Ergänzungen und Details zur Güteberechnung einer Prognose

a) Zertifizierte Evaluierungsmethoden

Betreiber des Datenraums könnten zertifizierte Evaluierungsmethoden anbieten. Wenn Kunden diese Methoden verwenden, werden die Ergebnisse in den Datenraum übermittelt, was eine standardisierte Bewertung der Services ermöglicht.

b) Vermeidung von Manipulation

Es ist wichtig, sicherzustellen, dass die Ergebnisse der Evaluierungen nicht manipuliert werden. Dies könnte durch unabhängige Überprüfungen oder die Verwendung vertrauenswürdiger Evaluierungsmethoden gewährleistet werden.

6.3.4.3 Betrieb des Bewertungsservices im Datenraum

Der Bewertungsservice kann im Datenraum auf verschiedene Weise betrieben werden, abhängig davon, welche Ressourcen und Infrastruktur im Datenraum sowie bei den Teilnehmenden zur Verfügung stehen. Hier sind die drei Hauptoptionen:

a) Deploy and Run

Beschreibung: Der Bewertungsservice wird direkt beim Kunden installiert und ausgeführt. Dies bedeutet, dass der Service auf der Infrastruktur des Kunden läuft.

b) Deploy im Datenraum

Beschreibung: Der Bewertungsservice wird im Datenraum selbst gehostet und betrieben. Der Datenraumanbieter stellt die notwendige Infrastruktur zur Verfügung.

c) Run-as-a-service

Beschreibung: Der Bewertungsservice wird als externer Service durch einen Datenraumteilnehmenden betrieben. Die Daten werden vom Kunden zum Service gesendet, und die Ergebnisse werden zurück an den Kunden geliefert.

6.3.5 Beschreibungssprache und Ontologie für digitale Güter, Scoring, Metrik und Bewertungsmethoden

Es wurde eine Ontologie entwickelt, die digitale Zwillinge und Vorhersageverfahren auf Basis der OEO semantisch beschreibt. Sie wurde zunächst in Protégé im OWL-Format aufgebaut und anschließend aus Skalierbarkeitsgründen in eine Neo4j-Graphdatenbank überführt; daraus entstand ein Docker-Image. Die Graphstruktur ermöglicht es, Klasseninstanzen als Knoten und Relationen als Prädikate semantisch auszuwerten.

Die Ontologie wurde um eine Erweiterung zur Beschreibung von AASs sowie um ein Reifegradmodell ergänzt, das die Fähigkeiten digitaler Zwillinge systematisch klassifiziert und bewertet.

6.3.5.1 AAS-Erweiterung

Thematisch wurde die AAS als Informationsentität der OEO betrachtet und als Unterklasse dieser integriert (siehe Abbildung 57). Eine AAS eines Assets besteht aus mehreren AAS-Submodellen. Die Relation ‚fulfils‘ wurde hinzugefügt, um digitale Zwillinge zu markieren, die standardisierte Darstellungen besitzen, zum Beispiel das Submodell ‚Nameplating‘ der IDTA („AAS submodel **fulfils** some submodel template“).

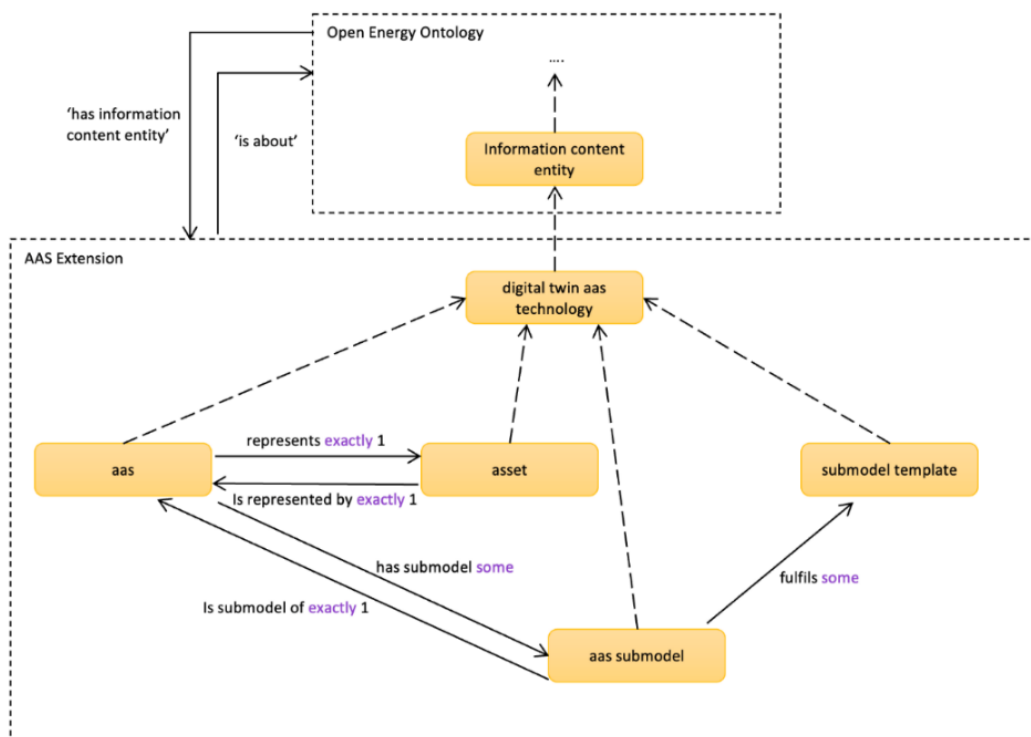


Abbildung 57: Die Asset Administration Shell als Unterklasse in der OpenEnergyOntology

Anhand eines Beispiels von SE wird ein einfacher digitaler Zwilling in der Ontologie wie folgt dargestellt.



Abbildung 58: Digitaler Zwilling (links) als Graph der Ontologie mit (rechts) seiner AAS und deren Submodellen

In Abbildung 58 sind auf der rechten Seite die AAS und ihre Submodelle im AAS-Explorer dargestellt. Auf der linken Seite stellt der Graph die AAS in der Ontologie dar. In Worten umschrieben, wird das Asset ‚AssetID‘ der Organisation ‚Company‘ dargestellt. Es umfasst fünf AAS-Submodelle, die bis auf das Submodell „Weight Information“ einem IDTA-Template entsprechen.

Als zusätzliche Funktionalität wurde getestet, inwieweit AAS-Dateien automatisch gelesen werden und ob die wichtigsten Informationen in die Graphdatenbank eingetragen werden können. Dazu wurden AAS-Dateien im JSON-Format eingelesen und deren Struktur anhand der Ähnlichkeit mit Standards überprüft. Dazu wurde die Struktur der AAS-Standards als JSON-String in den jeweiligen Entitäten gespeichert. In Abbildung 59 ist das Abgleichergebnis des oben genannten Beispiels dargestellt. Das „Nameplating“ stimmt zu 97 % mit dem IDTA-Nameplating und nur zu 27 % mit dem HSU-Nameplating überein.

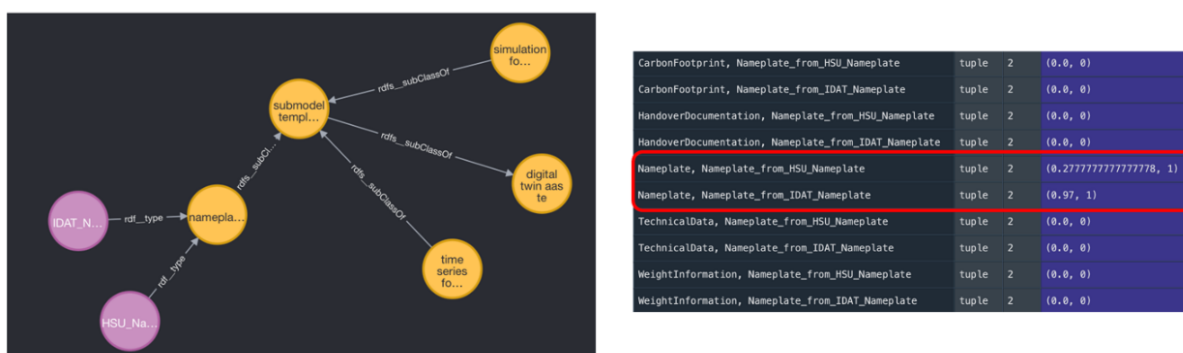


Abbildung 59: Übereinstimmung des „Nameplating“ mit dem IDTA- und dem HSU-Template.

6.3.5.2 Reifegradmodell für digitale Zwillinge

Die zentrale Idee besteht darin, zu analysieren, welche Fähigkeiten ein digitaler Zwilling besitzt und in welchem Umfang sie ausgeprägt sind. Das Paper <https://philpapers.org/archive/MERC-14.pdf> hat sich

mit der Frage befasst, wie der Begriff Fähigkeit (engl. Capability) im Kontext der Basic Formal Ontology (BFO) definiert wird und ob er als Untermenge zur Disposition steht. Da die OEO auf der BFO aufbaut, kann dies übernommen werden.

- Definition: Fähigkeit = Disposition, an deren Realisierung jemand (oder ein Organismus oder eine Gruppe von Organismen) ein Interesse hat oder hatte.

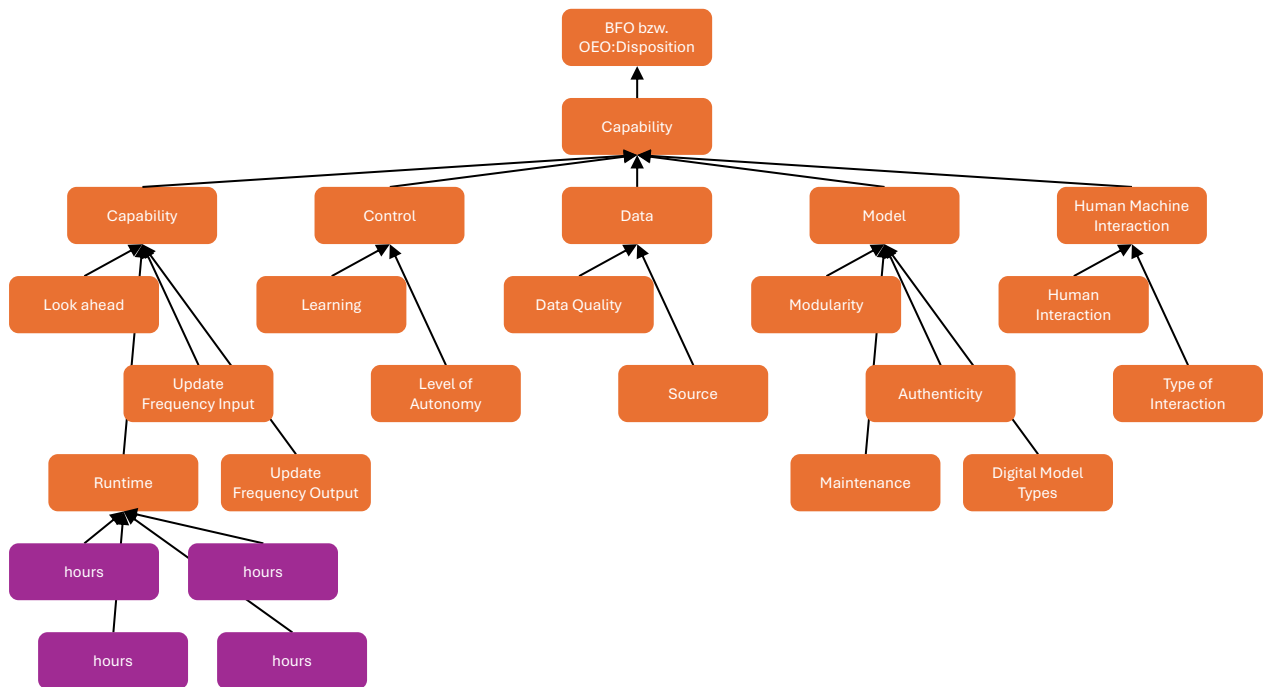


Abbildung 60: Neue Fähigkeitsklassen unterteilt in die fünf Hauptgruppen „Computing“, „Control“, „Data“, „Model“ und „Human Machine Interaction“

Die Erweiterung ist in Abbildung 60 dargestellt. In Orange sind alle neuen Fähigkeitsklassen thematisch in die fünf Hauptgruppen unterteilt dargestellt. In Violett sind beispielhaft die neuen Fähigkeiten für die Berechnungslaufzeit (Computation Runtime) dargestellt. Die neuen Fähigkeiten der anderen Klassen wurden für eine bessere Übersicht nicht dargestellt. Die Definitionen der Begriffe wurden in der Ontologie als Annotationen hinterlegt.

6.3.6 Konzeption und Entwicklung einer Beschreibungssprache und Ontologie für Scoring, Metrik und digitale Güter

6.3.6.1 Beschreibung / Repräsentation von Bewertungen im idFlexNetz-Datenraum

Um Methoden/Algorithmen (wie Prognosealgorithmen) im semantisch integrierten Datenraum bewerten zu können, muss dies über die für den Datenraum gewählte Ontologie möglich sein, im Fall von idFlexNetz die OEO. Dies wurde überprüft. Es wurde die Entität „forecast error“ aus der OEO zur Repräsentation von Prognosefehlern gewählt (siehe Abbildung 61).

The screenshot shows a web browser window with the URL `http://openenergy-platform.org/ontology/oeo/OEO_00010233`. The page title is "forecast error — OEO:00010233". There are two tabs: "Class Annotations" (selected) and "Class Usage". Below the tabs, there is a yellow header "Annotations: forecast error". Underneath, there is a section "Annotations" with a plus sign icon. The content includes:

- rdfs:label** [language: en]
forecast error
- definition**
A forecast error is a quantity value that quantifies the difference between a measured and a forecasted value.
- term tracker item**
issue: <https://github.com/OpenEnergyPlatform/ontology/issues/907>
pull request: <https://github.com/OpenEnergyPlatform/ontology/pull/1002>

Abbildung 61: In der OEO definierte Prognosefehler für die Entity OEO_00010233 („forecast error“).

6.3.6.2 Beschreibung / Repräsentation von Zeitreihen im idFlexNetz-Datenraum

Die gewählte Ontologie OEO der Domäne Energy für den Energiedatenraum idFlexNetz muss auch zur Repräsentation von Zeitreihen, darunter Messwert-, Optimierungs- und Prognosezeitreihen, verwendet werden können. Nach Analyse der Möglichkeiten zur Beschreibung dieser Zeitreihentypen mithilfe der OEO wurden fehlende Entitäten und Properties identifiziert und Vorschläge zur Integration dieser an das Entwicklungsteam der OEO übergeben.

a) Angenommene und bereits integrierte Vorschläge an die OEO

Nachfolgend sind die Vorschläge (Github Issues) im Github-OEO-Projekt (<https://github.com/OpenEnergyPlatform/ontology/issues/>) aufgeführt, die bereits vom Team der OEO bearbeitet und in die Ontologie integriert wurden.

The screenshot shows a list of five Github issues, each with a checkmark icon and various labels and status information:

- kw as Unit (kWh already exists)** [B] restructure good first issue
#1890 by ap-peh was closed on Aug 20, 2024 5 tasks oeo-release-2.5.0
- Endogenous input data for "model calculation"** [C] definition update To do
#1692 by ap-peh was closed on Jan 22, 2024 5 tasks oeo-release-2.2.0
- Entity forecast SubClass of model calculation** [A] new term oeo-model
#1691 by ap-peh was closed on Feb 2, 2024 5 tasks done oeo-release-2.2.0
- Units Ontology - full import?** [A] new term external ontology
#1690 by ap-peh was closed on Mar 4, 2024 5 tasks done oeo-release-2.2.0
- time stamped measurement data set – IAO (Information Artifact Ontology)** [A] new term external ontology To do
#1689 by ap-peh was closed on Nov 27, 2023 5 tasks done oeo-release-2.1.0

Abbildung 62: Issues, die bereits vom Entwicklungsteam der OEO bearbeitet wurden.

b) Offene noch nicht integrierte Vorschläge an die OEO

<p>🕒 core energy market data register / Marktstammdatenregister (MaStR) [A] new term out-of-scope</p> <p>#1747 opened on Nov 2, 2023 by ap-peh 📄 5 tasks 📌 Meta milestone</p>
<p>🕒 Special weather time series types [A] new term</p> <p>#1699 opened on Sep 26, 2023 by ap-peh 📄 5 tasks 📌 oeo-release-2.9.0</p>
<p>🕒 Geographic coordinate - latitude and longitude [A] new term external ontology Geographic</p> <p>#1696 opened on Sep 26, 2023 by ap-peh 📄 5 tasks 📌 oeo-release-2.8.0</p>
<p>🕒 Adding specific timestamp values to an individual [A] new term external ontology oeo-model</p> <p>#1695 opened on Sep 26, 2023 by ap-peh 📄 5 tasks 📌 oeo-release-2.9.0</p>
<p>🕒 Relationship between "time series" of the OEO and "time sampled measurement data set" of the IAO [A] new term external ontology</p> <p>#1694 opened on Sep 25, 2023 by ap-peh 📄 5 tasks 📌 oeo-release-2.9.0</p>
<p>🕒 Connection between "model calculation" and "service" [A] new term To do</p> <p>#1693 opened on Sep 25, 2023 by ap-peh 📄 5 tasks 📌 oeo-release-2.9.0</p>

Abbildung 63: Noch offene Issues, die bereits bei der OEO eingegangen sind.

6.4 Integration der Teilsysteme

6.4.1 Aufbau Testsystem

Schneider Electric hat verschiedene Transformatormodelle zur Verfügung gestellt. Diese mussten leicht angepasst werden, da beim Import der zur Verfügung gestellten Daten Fehler auftraten, die dazu führten, dass sich die Modelle nicht ins verwendete Netzberechnungsprogramm importieren ließen. Es mussten verschiedene Pfade im Header der Dateien angepasst werden, sodass die Dateien (z. B. von einer PV-Anlage der VSE AG) eingelesen werden konnten. Beim Aufbau des Testsystems wurden Ideen aus Cofinity-X einbezogen, die einen Marktplatz für Catena-X entwickeln.

6.4.2 Integration in das FhG-Testsystem

Das Testsystem wurde im Energiemarktlabor des FhG IOSB-AST als Dataspace-Lab bereitgestellt, das aus den unten abgebildeten Komponenten besteht.

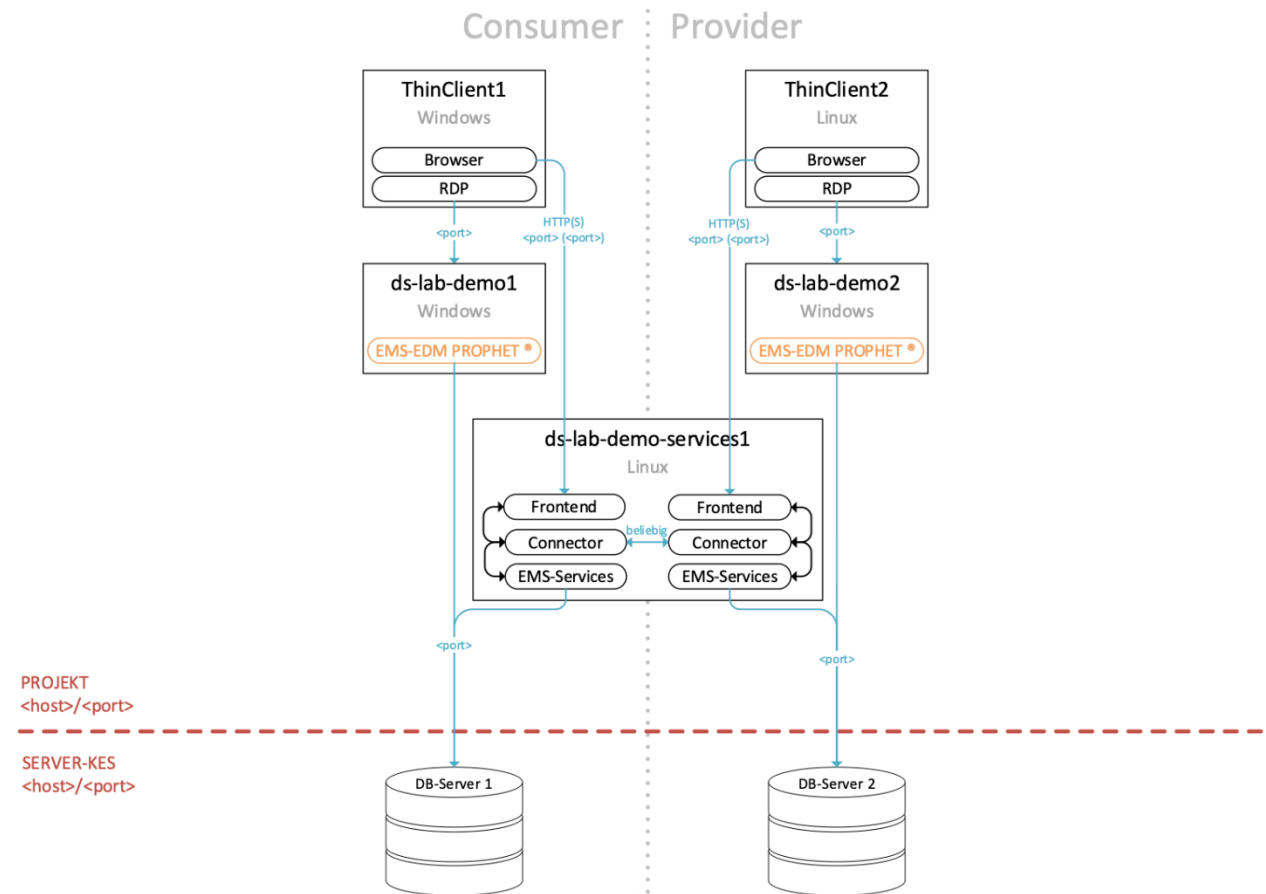


Abbildung 64: Virtuelle und physische Maschinenumgebung des Testsystems

Zunächst stehen zwei DB-Server zur Verfügung, die jeweils eine DB für das EMS hosten. Zudem wurde ein Windows-Anwendungsserver eingerichtet, auf dem der Client des Energiemanagementwerkzeugs *EMS EDM PROPHET*[®] sowie das Netzwerksimulationstool *PowerFactory* betrieben werden.

Für die Verwaltung von Messwertzeitreihen und Prognosebereitstellungsdiensten im EDM sind zwei Linux-VMs vorgesehen. Eine dieser VMs ist dem MWmanagementservice gewidmet, während die andere für den Prognosebereitstellungsservice zuständig ist. Darüber hinaus wird eine Linux-VM zur Bereitstellung der AAS-Umgebung genutzt, um digitale Zwillinge bereitzustellen.

Zusätzlich sind mehrere Linux-VMs für die verschiedenen Datenraumkomponenten eingerichtet: Eine für die Konnektoren der Datenanbieter und eine weitere für die Konnektoren der Datenkonsumenten. Des Weiteren gibt es separate Linux-VMs für die weiterentwickelten Frontends der Datenanbieter und Datenkonsumenten. Schließlich umfasst das Konzept auch die Bereitstellung von Konnektoren, die außerhalb des Fraunhofer IOSB-AST Netzes operieren.

6.4.3 Integration des DFKI-Teilsystems in das Testsystem

Der Broker wird als lokale Anwendung bereitgestellt, um eine prototypische Anbindung an den EDC zu ermöglichen. Der Broker umfasst den prototypischen Marktplatz, den Suchassistenten sowie die Neo4J-Graphdatenbank. Die Neo4J-Graphdatenbank dient dabei als Katalog. Sie bildet die Grundlage für die semantische Beschreibung der auf dem Marktplatz verfügbaren Assets. Um die

Datensouveränität im Dataspace zu gewährleisten, bleiben alle relevanten Daten bei den jeweiligen Nutzern lokal.

6.4.4 Monitoring des Testsystems

6.4.4.1 Überwachung von Identitäts- und Autorisierungsmerkmalen (Monitoring)

Die Änderungen an Identitäts- und Autorisierungsmerkmalen in den Wallets der Teilnehmer werden kontinuierlich überwacht und in einer Revocation List (RL) erfasst, sodass sichergestellt wird, dass veraltete oder ungültige Berechtigungen nicht weiterverwendet werden.

6.4.4.2 Revocation List 2020/1 und ihre Rolle

Das Monitoring der Revocation List ist entscheidend für die korrekte Funktion der EDC-Policy-Engines. Damit ein EDC verlässlich Authentifizierungen und Autorisierungen durchführen kann, müssen nicht nur die technische Umsetzung, sondern auch die prozessuale Handhabung sichergestellt sein.

Die prozessuale Umsetzung dieses Revocation-Mechanismus wurde simuliert, um sicherzustellen, dass widerrufenen Credentials technisch korrekt verarbeitet werden. Dies umfasst unter anderem:

- Erkennung nicht mehr gültiger Berechtigungen.
- Automatische Ablehnung von Anfragen mit widerrufenen Credentials.
- Sicherstellung, dass alle Teilnehmer im idFlexNetz stets aktuelle und gültige Credentials verwenden.

Durch diese Kombination aus technischer und prozessualer Umsetzung wird sichergestellt, dass das Identitäts- und Autorisierungssystem des idFlexNetz zuverlässig und sicher bleibt.

6.4.5 Ökonomische Bewertung von Prozessen für Konsumenten und Produzenten der Modelle

Der Einsatz digitaler Zwillinge im idFlexNetz-Projekt wird ökonomisch eingeordnet und dessen Nutzen für zentrale Netzprozesse bewertet. Dies umfasst auch den zusätzlichen Mehrwert einer Marktplatzlösung. Ausgangspunkt ist ein IKT-Ökosystem, das standardisierte Datenräume auf Basis des EDC-Konnektors, semantische Interoperabilität mit Hilfe der OEO und des CIM-Standards, standardisierte Selbstbeschreibungen mit der AAS und ein europäisches Identitätsframework (EUBW auf Basis eIDAS 2.0) zusammenführt. In diesem Rahmen sollen steuerbare Verbraucher und Erzeuger effizienter in den Netzbetrieb integriert, neue digitale Geschäftsmodelle erschlossen und gleichzeitig Einführungs- und Projektrisiken für VNB gesenkt werden. Die ökonomische Analyse fokussiert auf drei operative Anwendungsfälle

- die Anmeldung von PV-Anlagen (Netzführung),
- die Vermeidung von Redispatch-Maßnahmen (Engpassmanagement)
- die lebensdauerorientierte Planung beim Trafo-Austausch (Verteilnetzplanung)

Dabei erweitert sie den Blick auf den strukturellen Nutzen eines Marktplatzes, der digitale Güter und Services rund um digitale Zwillinge über eine dezentrale, vertrauenswürdige Infrastruktur vermittelt.

Die Bewertung folgt in allen drei Anwendungsfällen einem einheitlichen Grundprinzip, wonach die Kosten des Status quo den Kosten eines durch digitale Zwillinge unterstützten Zielprozesses gegenübergestellt werden. Im Kern handelt es sich um eine Differenzrechnung der vermiedenen Kosten. Für jeden Use Case werden die aus digitalen Zwillingen resultierenden Wirkmechanismen explizit festgelegt, die Bewertung auf eine geeignete Basiseinheit zurückgeführt und mit konservativen Annahmen parametrisiert. Anschließend werden die Ergebnisse stufenweise aggregiert: zunächst auf Vorgangs- bzw. Einheitenebene, dann auf Betriebsebene (repräsentativ auf Basis von Daten und Erfahrungswerten der VNB-Partner) und schließlich auf Bundesebene. Leitend ist eine vorsichtige Parametrisierung, die auf öffentlich zugänglichen Quellen (u. a. Bundesnetzagentur, DeStatis, ZVEI/BDEW) sowie projektinternen Experteneinschätzungen beruht. Investitionen in zusätzliche Hard- oder Software werden, wenn im Projekt nicht angefallen, bewusst mit 0 angesetzt ($A = 0$), um die reinen Effekte der Prozess- und Datenverbesserung sichtbar zu machen; diese Transparenz erlaubt es zugleich, bei anderen VNB mit abweichenden Randbedingungen die Rechnung leicht anzupassen.

6.4.5.1 Anwendungsfall Netzführung (Anmeldung einer PV-Anlage)

Im Anwendungsfall Netzführung (Anmeldung einer PV-Anlage) ist die Fragestellung eine klassische Effizienzbetrachtung administrativer Prozesse. Der Status quo ist durch manuelle Dateneingabe beim VNB geprägt und wird aus folgenden Gründen durch digitale Zwillinge effizienter: Zum einen entstehen durch menschliche Fehler Rückläufer, die eine erneute Bearbeitung erforderlich machen; zum anderen liegt der Zeitaufwand pro Vorgang relativ hoch. Mit einem durch digitale Zwillinge gestützten Prozess sinken beides – Fehlerquote und Bearbeitungszeit –, ohne dass zusätzliche Investitionen beim VNB notwendig werden. Methodisch wird der Vergleich über die Parameter Fehlerwahrscheinlichkeit p , Bearbeitungszeit T , Stundensatz K sowie zusätzlich notwendige Investitionen A geführt; zudem wird angenommen, dass bei einem Fehler der Vorgang faktisch doppelt so lange dauert ($2T$). Die im Projekt verwendeten Annahmen – p von 3,7 % auf 0,05 %, T von 15 auf 10 Minuten, $K = 25,02$ Euro pro Stunde, $A = 0$ – sind konservativ und an Erfahrungswerten der Partner sowie an Analogiebetrachtungen aus prozessnahen Domänen (Medizin für manuelle Dateneingabe) orientiert. Das Ergebnis ist ein prozessualer Einspareffekt von 1,29 Euro pro Vorgang, also knapp 20 % gegenüber dem Status quo. Hochgerechnet auf Betriebsebene ergeben sich – exemplarisch für das Saarland – rund 4.400 Euro im Jahr 2022 (3.421 neue Anlagen) und etwa 8.900 Euro im Jahr 2023 (6.856 neue Anlagen). National liegen die Einsparungen, je nach Ausbaudynamik, im sechsstelligen Bereich (2022: ca. 517.000 Euro; 2023: ca. 906.000 Euro). Diese Effekte skalieren linear mit der Fallzahl, da Fixkosten in der betrachteten Konstellation keine Rolle spielen. Die Rechnung bildet bewusst nur betriebswirtschaftliche Prozesskosten ab; der gesamtgesellschaftliche Nutzen – etwa durch schnelleres Onboarding von Erzeugern und die damit verbundene Beschleunigung der Energiewende – ist qualitativ bedeutsam, aber in der Quantifizierung nicht enthalten.

6.4.5.2 Anwendungsfall Engpassmanagement (Redispatch)

Im Anwendungsfall Engpassmanagement (Redispatch) steht nicht die Prozesszeit, sondern die durch Maßnahmen verursachte Energiemenge im Mittelpunkt. Digitale Zwillinge verbessern hier die Datenlage so, dass die technische Auslastung der Netzinfrastruktur steigt und Eingriffe reduziert werden können. Die Bewertung orientiert sich an den Redispatchmengen und nicht an der Anzahl der Redispatchmaßnahmen: Gemessen wird, wie viele Megawattstunden (MWh) sich je Maßnahme einsparen lassen, nicht wie viele Maßnahmen wegfallen. Damit wird die hohe Streuung der Redispatchmengen

je Maßnahme in der Bewertungsgrundlage als Basisindikator berücksichtigt, und die Berechnung kann mit einem belastbaren mittleren Kostensatz je MWh erfolgen. Grundlage sind die Systemsicherheitsberichte der Bundesnetzagentur für 2023, die – über alle vier Quartale hinweg – einen mittleren Kostensatz von 71 Euro/MWh ausweisen (unter Einbezug der Umstellung auf Redispatch 2.0 und des Einspeisemanagements). Da nur 13 % der Redispatchmengen im Verteilnetz anfallen, wird die nationale Energiemenge für VNB für diesen Anteil mit etwa 4,31 TWh angesetzt. Auf Betriebsebene erfolgt die Herleitung proportional zum Primärenergiebedarf; für einen typischen VNB können die Primärenergieanteile des Saarlands von 2 % am bundesweiten Primärenergiebedarf zugrunde gelegt werden, woraus rund 86.185 MWh im Jahr resultieren. Mit einer vorsichtigen Einsparquote von 10 % ($s = 0,1$), die auf Experteneinschätzung im Projekt beruht, ergeben sich vermiedene Kosten von ca. 7,10 Euro/MWh. Das entspricht rund 612.040 Euro pro Jahr auf Betriebsebene und – hochgerechnet nur auf die VNB-relevante Energie – etwa 30 Millionen Euro pro Jahr bundesweit. Bei 5 % Einsparung entstünden rund 15 Millionen Euro, bei 20 % etwa 61 Millionen Euro jährlicher Einspareffekt (jeweils sämtliche VNBs bundesweit betrachtet). Zu beachten ist, dass Brennstoff- und Markteffekte die mittel- und langfristigen Kostensätze beeinflussen.

6.4.5.3 Zusätzliche Effekte durch Spitzenglättung

Ergänzend zeigen aktuelle Projekterfahrungen Anknüpfungspunkte zur netzorientierten Steuerung nach § 14a EnWG (Spitzenlastglättung): Auch dort kann eine bessere Datengrundlage die Wirksamkeit dezentraler Steuerung erhöhen, Netzanschlüsse beschleunigen und perspektivisch Redispatch vermeiden helfen. Die Datengrundlage für eine robuste Monetarisierung dieser Synergien ist jedoch derzeit noch zu dünn; dennoch deuten die Mechanismen – geringere Spitzen, bessere Prognostik, koordinierte Steuerung – auf konsistente und potenziell erhebliche Einsparpfade hin.

6.4.5.4 Anwendungsfall Verteilnetzplanung (Trafo-Austausch)

Im Anwendungsfall Verteilnetzplanung (Trafo-Austausch) ist der zentrale Hebel die CAPEX-Wirkung durch eine verlängerte Lebensdauer. Digitale Zwillinge ermöglichen eine zustands- und belastungsorientierte Wartungs- und Erneuerungsplanung (Predictive Maintenance), sodass Erneuerungen genauer und seltener anfallen. Betrachtet werden drei gängige MS/NS-Trafo-Klassen (630/800/1000 kVA) mit Stückkosten von 24.000/27.000/30.000 Euro; zusätzlich wird angenommen, dass in vielen Fällen parallel eine Ortsnetzstation zu etwa 70.000 Euro ersetzt wird. Für die Parametrisierung wird die durchschnittliche Lebensdauer von 30 auf 32 Jahre verlängert. Daraus folgt eine sinkende Austauschwahrscheinlichkeit: im Status quo rund 3,33 % pro Jahr, im Szenario „Digitaler Zwilling“ rund 3,13 % pro Jahr. Die daraus abgeleitete jährliche „implizite“ Kapitalkostenbelastung je Trafo fällt um 6,25 %. Auf Betriebsebene (Beispiel: 3.000 Trafos, verteilt auf die drei Größenklassen) ergeben sich Einsparungen von ca. 169 Tausend Euro jährlich allein für Trafos; unter Einbezug der Ortsnetzstationen kommen rund 438 Tausend Euro hinzu. National – für einen konservativ angesetzten Bestand von 632.000 MS/NS-Trafos (ZVEI/BDEW, 2024) – resultieren daraus rund 35,6 Millionen Euro jährlich; inklusive Ortsnetzstationen rund 92,2 Millionen Euro. Diese Zahlen sind bewusst vorsichtig: Sie linearisieren Alterung und Austausch (konstante Austauschrate über die Lebensdauer), vernachlässigen OPEX-Effekte und gehen von konstanten Beständen aus. Dass die Realität dynamischer ist, spricht tendenziell für höhere Potenziale: Bis 2045 wird ein deutlicher Zubau an Trafos erwartet (in Richtung 830.000 Einheiten), wodurch die absolute Einsparsumme steigt. Nichtlineare Alterungsprozesse und eine bessere Zustandskenntnis – einschließlich der Möglichkeit, längere Lebensdauern zu erreichen – können den

prozentualen Effekt zusätzlich erhöhen. Eine wichtige Rückkopplung ist jedoch zu beachten: Wird über genauere Daten die Auslastung technischer Ressourcen – etwa zur Engpassvermeidung – erhöht, kann dies die Lebensdauer einzelner Assets auch reduzieren; die gesamtwirtschaftlich optimale Lösung ist daher standortspezifisch und erfordert einen integrierten Blick auf Netzführung, Engpassmanagement und Planung.

Die drei Anwendungsfälle zusammen zeigen, wie digitale Zwillinge auf unterschiedlichen Ebenen wirtschaftlichen Nutzen stiften: im Administrativen über Fehler- und Zeitreduzierung (PV-Anmeldung), im Netzbetrieb über die Verringerung energieintensiver Eingriffe (Redispatch) und in der Planung über CAPEX-Effizienz (Trafo-Lebensdauer). Allen gemeinsam ist, dass ein belastbarer, standardisierter Datenzugang und hochwertige Metadaten erforderlich sind. Zugleich wird deutlich, dass konservative Annahmen bereits einen substantiellen Nutzen ausweisen; zusätzliche Investitionen in Fähigkeiten digitaler Zwillinge und Datenqualität dürften daher in vielen Konstellationen eine kurze Amortisationszeit aufweisen.

6.4.5.5 Zusätzlicher Nutzen des Marktplatzes

Über die Einzelfälle hinaus entsteht zusätzlicher ökonomischer Wert durch die Marktplatzstruktur. Ökonomisch handelt es sich um einen dezentralen, mehrseitigen Markt für digitale Güter und Services, in dem VNB, Hersteller, digitale Akteure und Komplementoren zusammenwirken (siehe Abbildung 65). Der Kernmechanismus sind Netzwerkeffekte: Je mehr Anbieter und Nachfrager teilnehmen, desto attraktiver werden Katalog, Auswahl und Interoperabilität – für beide Seiten. Weil digitale Güter Grenzkosten nahe null haben und parallel von vielen Nutzern genutzt werden können, entfalten sich Skalenvorteile besonders stark. Vertrauensinfrastrukturen – wie die EUBW für rechtssichere Unternehmensidentitäten oder durch Datenraumtechnologie operationalisierte Autorisierung und Datensouveränität – senken Markteintritts- und Transaktionskosten, insbesondere für neue digitale Akteure, die bislang keine etablierten Geschäftsbeziehungen in der Energiewirtschaft haben. Für Hersteller schafft der Marktplatz die Möglichkeit, das physische Produktportfolio um digitale Zwillinge, komplementäre Software und datenbasierte Dienste zu erweitern – bis hin zu Compliance-Pfaden (etwa im Kontext Digitaler Produktpass). Für VNB wird ein strukturierter Zugang zu interoperablen, qualitätsgesicherten digitalen Gütern geschaffen, der von einfachen Produktdarstellungen („Static Twin“) bis hin zu intelligenten, simulations- und steuerfähigen Zwillingen („Intelligent Digital Twin“) reicht. Diese Transparenz über den Produktraum fördert zielgerichtetes Matching, erleichtert die schrittweise Weiterentwicklung der eigenen Digitalfähigkeiten und beschleunigt so die Diffusion. Zugleich entstehen Verbundeffekte: Die Verknüpfung mehrerer Datensätze und Services hebt den Wert einzelner Angebote, etwa wenn digitale Zwillinge, Prognosen und Optimierungsdienste gemeinsam genutzt werden und so die Wirksamkeit in Netzführung und Planung erhöhen.

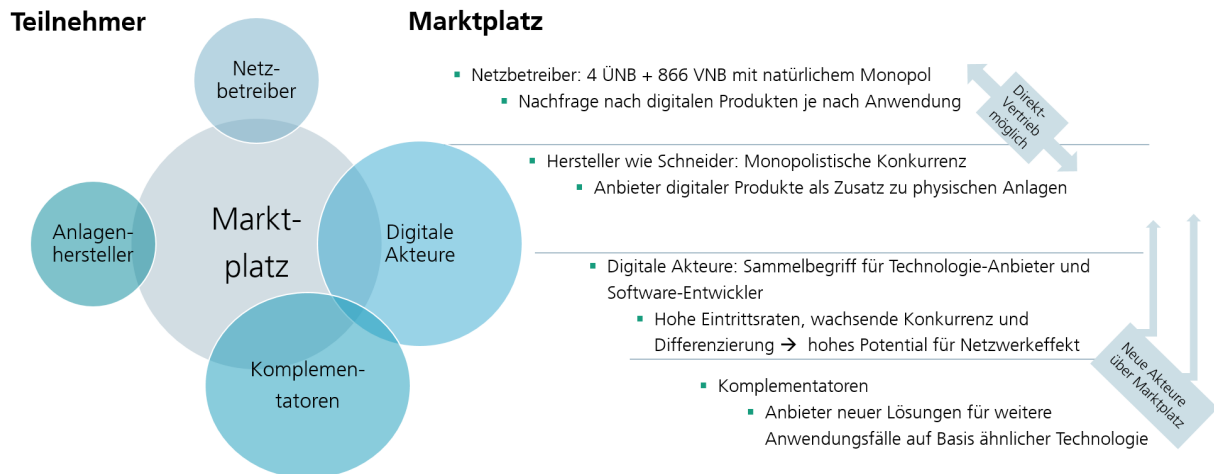


Abbildung 65: Klassifizierung der Marktteilnehmer und Mehrwerte durch Marktstruktur

Die Ergebnisse stellen eine erste Einordnung der ökonomischen Effekte dar. Sie beruhen zum einen auf mittleren Kostensätzen und konservativen Parametern; tatsächliche Potenziale können – insbesondere bei Redispatch und in der Trafo-Planung – höher ausfallen. Zum anderen wurden für die Bestimmung betriebswirtschaftlicher Effekte methodische Vereinfachungen gewählt: OPEX-Änderungen (z. B. durch zusätzliche Messinfrastruktur) sind nicht monetarisiert, der Einfluss exogener Preise wie der Brennstoffpreise im Kontext der Redispatchkosten und regulatorischer Anpassungen (z. B. Auswirkungen des § 14a EnWG) wird qualitativ diskutiert, aber bewusst nicht in absolute Euro-Beträge überführt. Schließlich weisen die Use Cases Wechselwirkungen auf: Eine höhere Auslastung von Trafo-Stationen zur Engpassvermeidung kann die Lebensdauer beanspruchen; umgekehrt schafft Predictive Maintenance Freiheitsgrade für eine gezieltere Auslastung. Diese Abwägungen sind auf lokaler Ebene zu treffen und sprechen für eine integrierte, datengetriebene Entscheidungsunterstützung.

Insgesamt belegt die Bewertung, dass digitale Zwillinge im idFlexNetz-Kontext bereits unter vorsichtigen Annahmen messbare wirtschaftliche Effekte erzeugen. Die Anmeldung von PV-Anlagen wird spürbar effizienter, Redispatch-Mengen lassen sich dank einer aussichtsreichen Kosten-Nutzen-Relation reduzieren, und die CAPEX-Belastung für Transformatoren sinkt durch die Lebensdauerverlängerung signifikant. Der Markt- platz als dezentrale Plattform verstärkt diese Einzeleffekte, indem er Vertrauen und Interoperabilität schafft, Netzwerkeffekte mobilisiert und datenbasierte Wertschöpfung skaliert. Für VNB bedeutet dies kurzfristig Prozess- und Redispatch-Einsparungen, mittelfristig Effizienzgewinne in der Planung und langfristig den Aufbau eines robusten, interoperablen digitalen Ökosystems, das Innovationen beschleunigt und die Energiewende wirtschaftlich tragfähiger macht.

7 AP5 – Erprobung

Die Erprobung im Rahmen des Arbeitspakets 5 des Projekts idFlexNetz verfolgt das Ziel, die prototypische Umsetzung eines IKT-Ökosystems für Energiedatenräume zu validieren. Dabei werden die wesentlichen Aspekte Design, Cyber-physische Systeme (CPS), Security und Integration betrachtet. Die nachfolgende Zusammenfassung fasst die Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte zusammen und stellt die wesentlichen Erkenntnisse dar.

7.1 Einleitung

Die Erprobung der im idFlexNetz-Projekt entwickelten Lösungen bildete einen zentralen Bestandteil der Qualitätssicherung und lieferte wichtige Erkenntnisse für die Weiterentwicklung und Skalierung. Die Erprobung umfasste verschiedene Dimensionen, die in separaten Phasen untersucht wurden. Ziel war es, die prototypische Umsetzung eines IKT-Ökosystems für Energiedatenräume zu validieren. Dabei werden die wesentlichen Aspekte Design, Cyber-physische Systeme (CPS), Security und Integration betrachtet.

Die Evaluation wurde systematisch geplant und durchgeführt. Für jede Dimension wurden spezifische Evaluationskriterien definiert, geeignete Methoden ausgewählt und Testszenarien entwickelt. Die Evaluationen erfolgten unter Einbeziehung der relevanten Stakeholder, insbesondere der Netzbetreiber und Anlagenhersteller, die als potenzielle Nutzer der Lösungen die wichtigste Zielgruppe darstellen. Die Ergebnisse der Evaluationen wurden dokumentiert und in Workshops mit allen Projektpartnern diskutiert, um gemeinsam Schlussfolgerungen zu ziehen und Maßnahmen abzuleiten.

7.2 Design

Um den Anforderungen eines Netzbetreibers an das Erprobungsgebiet gerecht zu werden, wurden die im Arbeitspaket 4 von Schneider Electric bereitgestellten Komponenten wie Transformatoren, Ringkabelschaltanlagen, Wallboxen und Photovoltaikanlagen genutzt, um ein Testsystem aufzubauen. Für die Integration dieser Modelle in das verwendete Netzberechnungsprogramm waren Anpassungen erforderlich.

Das Transformator-Modell basiert auf dem **Common Grid Model Exchange Standard (CGMES)**, welcher auf dem **Common Information Model (CIM)** aufsetzt. Schneider Electric stellte Mittelspannungs-Transformatoren mit einer überspannungsseitigen Nennspannung von 20 kV in verschiedenen Ausführungen zur Verfügung. Aus diesen wurde ein minimales CGMES-Modell abgeleitet.

Der ursprüngliche Import des Modells in das Netzberechnungsprogramm scheiterte aufgrund fehlender Metainformationen im Netzmodell. Diese Metadaten wurden ergänzt, um ein funktionales Basismodell zu erzeugen, das erfolgreich importiert werden konnte. Die hinzugefügten Metadaten wurden dokumentiert und gekennzeichnet.

Damit wurde die Grundlage für die Nutzung eines interoperablen Austauschformats geschaffen, das als Schnittstelle zwischen Technologien wie der **Asset Administration Shell** und **PowerFactory** dient.

Die Erprobung der Architektur im Hinblick auf Gaia-X und IDS für das IKT-Ökosystem wurde mit folgender Zielsetzung durchgeführt: Es soll nachgewiesen werden, dass die in der Umsetzungsphase

entwickelten und implementierten Komponenten den Anforderungen und Prinzipien von Gaia-X sowie dem IDS-Referenzarchitekturmodell (IDS-RAM Version 4) entsprechen.

Dabei geht es nicht nur um die technische Umsetzung (Ende-zu-Ende-Interoperabilität anhand der definierten Use-Cases), sondern auch um die funktionale Interaktion der Komponenten innerhalb eines prototypischen IKT-Ökosystems.

Im Fokus stehen dabei die bereits oben beschriebenen Aspekte:

- **Konnektoren:** Sie ermöglichen den sicheren und kontrollierten Datenaustausch zwischen verschiedenen Teilnehmern im Datenraum.
- **Policies:** Regeln zur Steuerung von Datenzugriff und -nutzung, die sicherstellen, dass Daten nur unter definierten Bedingungen geteilt werden.
- **Identität und Vertrauen (Trust):** Mechanismen zur Authentifizierung und Autorisierung, die sicherstellen, dass nur vertrauenswürdige Teilnehmer miteinander kommunizieren.
- **Semantik und Katalogisierung:** Einheitliche Beschreibung und Auffindbarkeit von Datenressourcen, z. B. über Metadaten und semantische Modelle.

Ziel ist es, die Interoperabilität und Konformität dieser Komponenten im Zusammenspiel zu demonstrieren – also zu zeigen, dass sie nicht nur einzeln funktionieren, sondern auch integriert und standardkonform zusammenarbeiten.

Umsetzung:

Zur Validierung der Architektur wurden verschiedene technische Komponenten und Dienste in einem prototypischen IKT-Ökosystem integriert. Im Zentrum steht die Nutzung und Erweiterung der Eclipse Dataspace Components (EDC) als Konnektoren für Datenanbieter und -nutzer.

Die EDC-Konnektoren wurden um spezifische Funktionen ergänzt, um verschiedene Datenquellen und -formate zu unterstützen:

- **Digitale Zwillinge:** Integration der Asset Administration Shell (AAS) mit der Datensinke PowerFactory unter Verwendung des CGMES zur Modellierung von Energienetzen.
- **Prognosebereitstellung:** Evaluierung der EDC-Erweiterungen für Prognosewerte aus EMS EDM PROPHET® heraus und in PowerFactory hinein, um Vorhersagedaten wie z. B. Zeitreihen im CSV-Format bereitzustellen.
- **Identitäts- und Policy-Prüfung:** Nutzung der European Business Wallet (EUBW) und W3C Decentralized Identifier (DID) / Verifiable Credentials (VC) zur Sicherstellung von Vertrauenswürdigkeit und regelbasierter Datenfreigabe und -nutzung.
- **Semantische Integration:** Einsatz der Open Energy Ontology (OEO) und JSON-LD zur semantischen Beschreibung von Daten; Netzmodelle werden zusätzlich über CIM/CGMES eingebunden.
- **Katalogisierung und Vermittlung:** Entwicklung eines Marktplatzkatalogs auf Basis der Neo4j-Graphdatenbank zur semantischen Auffindbarkeit und Vermittlung von Datenressourcen, der später in Postgres und Apache Jena überführt wurde.

Im Minimum Viable Dataspace wurden folgende Anwendungen abgebildet:

- Messwertzeitreihen: Bereitstellung äquidistanter Messwerte einer PV-Anlage als semantisch annotierte Zeitreihe in JSON-LD mit Open-Energy-Ontologie-Kontext. Die Daten werden über den EDC-Konnektor vom EMS EDM PROPHET® an teilnehmende Konsumenten im Datenraum übertragen.
- Prognosebereitstellung: Auf Basis der bereitgestellten Messwerte lassen sich Prognosen abrufen. Die Ergebnisse werden als semantisch annotierte Zeitreihen bereitgestellt.
- Energy Digital Twin: Bereitstellung eines digitalen Zwillings über AAS/BaSyx mit Datenexport im JSON-LD/CIM-Format. Der Import erfolgt als XML/CIM-Datei in PowerFactory.

Alternativ ist auch eine semantische Annotation mit OEO möglich.

Testen der Credentials von Spherity

Das Ziel war die Überprüfung der im Projekt implementierten EUBW-kompatiblen Unternehmens-Wallets und der Integration von W3C-basierten Verifiable Credentials (VCs) und Decentralized Identifiers (DIDs) in die Policy-Mechanismen der Eclipse Dataspace Component (EDC). Im Fokus stand die technische und semantische Validierung der Vertrauens- und Autorisierungsmechanismen für den Datenaustausch im idFlexNetz-Datenraum.

In der Umsetzung realisierte Spherity im Projekt ein prototypisches Identitätsframework auf Basis der European Business Wallets (EUBW) gemäß eIDAS 2.0.

Im Rahmen der Erprobung wurden folgende Komponenten getestet und integriert: Unternehmens-Wallets mit ausgestellten Legal Person Identification Data (LPID).

- Membership-Credentials und Business Partner Number-Credentials.
- Verifiable Credentials gemäß W3C VC 2.0-Standard, einschließlich automatischer Revocation-Prüfung über die VC Status List 2020/2021 (RL 2020/2021)
- Onboarding-Simulation über den Bundesanzeiger Verlag in der Rolle des Issuer, der die Identität der Unternehmen validiert und entsprechende Credentials an die Wallets der Projektpartner ausstellt.
- Integration der Credentials in die Policy-Engine des EDC, sodass nur Akteure mit gültigen und nicht widerrufenen VCs Zugriff auf Daten und Services im Datenraum erhalten.

Die Verifikation von VCs innerhalb der EDC-Policy-Engine wurde erfolgreich demonstriert. Damit konnte gezeigt werden, dass der EUBW-basierte Identitätsnachweis technisch interoperabel mit der EDC-Referenzarchitektur (Dataspace Protocols & Decentralized ClaimsProtocol) ist.

Die Prüfung der Revocation Lists (RL 2020/2021) erfolgte in Echtzeit über das Trust Verification Module. Widerrufene Credentials wurden korrekt erkannt, und der Zugriff wurde automatisch verweigert.

Die Kombination aus DID-basierten Identifikatoren, Verifiable Credentials und EUBW-Integration ermöglicht eine Ende-zu-Ende-Nachvollziehbarkeit und stellt eine wesentliche Grundlage für vertrauenswürdige Datentransaktionen in Energiedatenräumen dar.

Als begleitende Tests wurden parallel im DFKI-Prototyp ein Neo4j- und Apache Jena Fuseki-basierter Katalog genutzt, um die Verknüpfung der Credential-Informationen mit den semantischen Beschreibungen von digitalen Zwillingen, Prognosen und Messwerten zu prüfen. Die Tests bestätigten die Interoperabilität zwischen der semantischen Suche (FAIR-Prinzipien: Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) und den Identitäts- und Autorisierungsprozessen des idFlexNetz-Datenraums.

Der Test wurde mit EUBW-kompatiblen Unternehmens-Wallets inklusive einer W3C-VC/DID-RL-2020/2021-Prüfung durchgeführt. Das Onboarding im Projekt mit der Issuer-Rolle „Bundesanzeiger“ unter Anwendung von W3C-DID, W3C-VC und VC-R wurde simuliert. Das Ergebnis war eine prototypische VC-Verifikation in EDC-Policy-Pfaden. – Das DFKI erstellte einen auf Neo4j (Postgres / Apache Jena Fuseki) basierten Katalog mit Zeitreihen, Prognosen und digitalen Zwillingen mit JavaScript-Frontend. FhG hat die Interoperabilität, semantische Datenbeschreibungen sowie die Konnektor-Interaktion mit Fokus auf semantische Suche und Selektion gemäß den FAIR-Prinzipien geprüft.

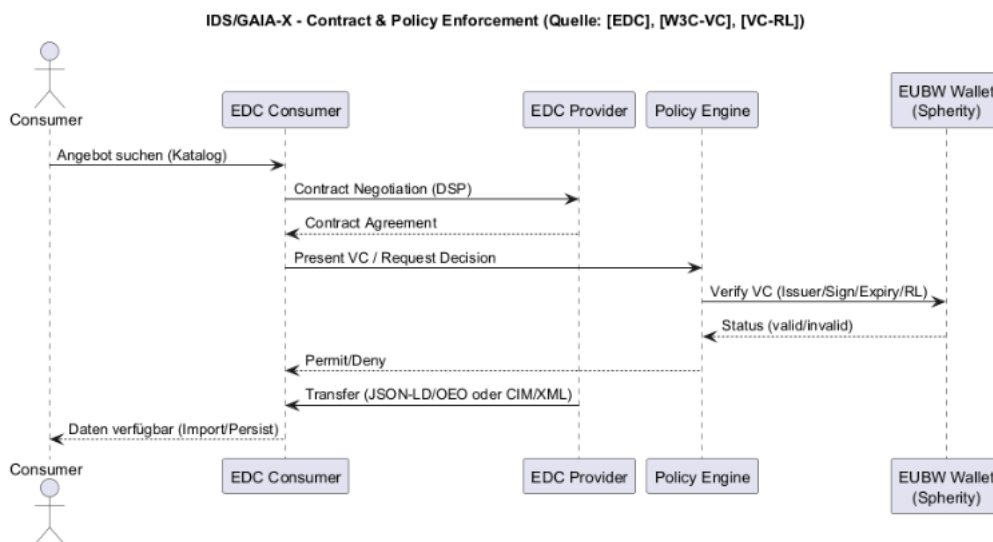


Abbildung 66: Ende-zu-Ende Vertrag und Policy-Flow

In Abbildung 66 ist die Vertragsverhandlung mit der Verifikation der Credentials, die über die Wallet zur Verfügung gestellt werden, zwischen den Datenraumteilnehmenden wie Datenanbietern und Datenkonsumenten dargestellt. Dabei wurde das Standard-Datenraumprotokoll um die European Business Wallet erweitert, sodass sowohl eine sichere Verbindung zwischen einzelnen Marktteilnehmern als auch eine europäische Sektorkopplung möglich sind.

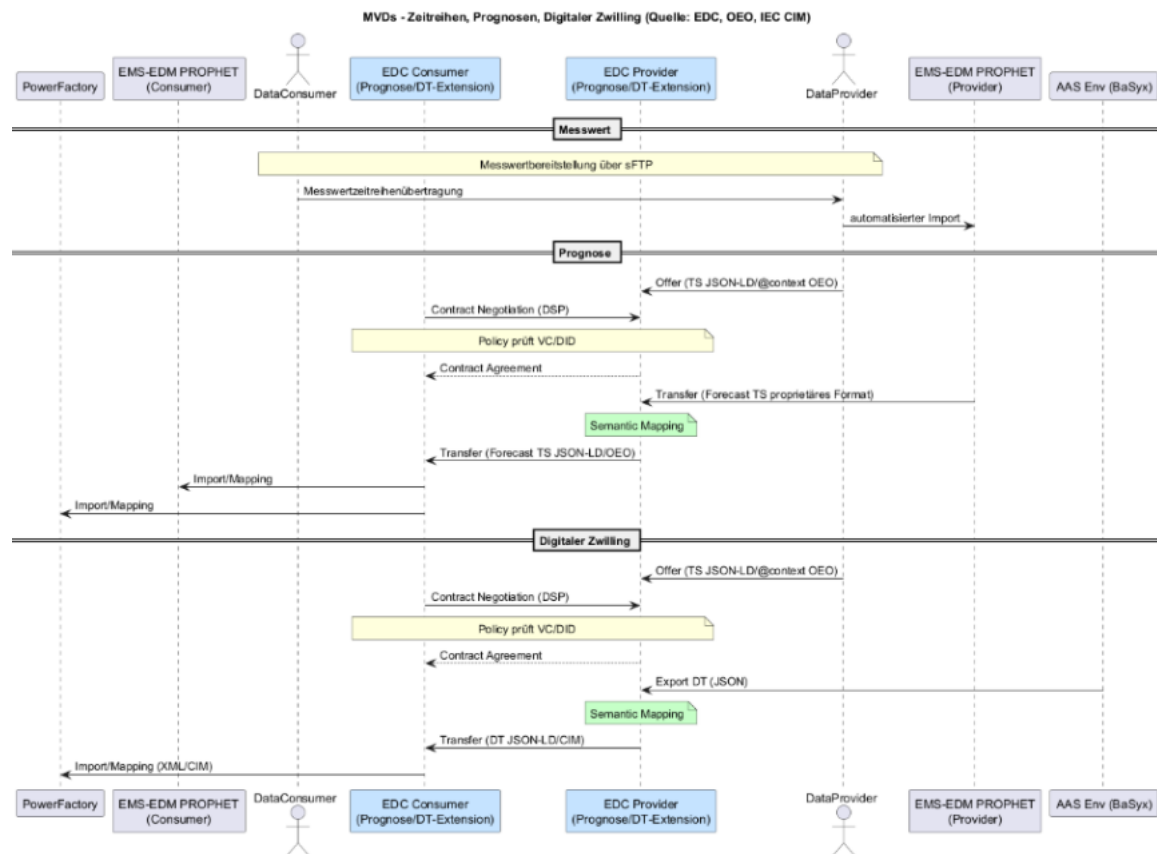


Abbildung 67: Datenfluss innerhalb der MVDs der Use-Cases „Digitaler Zwilling“ und „Vorhersage“

Die Abbildung 67 zeigt die spezifische Ansicht des Datenflusses innerhalb der MVDs der beiden Use-Cases „Digitaler Zwilling“ und „Vorhersage“.

Als Ergebnis wurden die IDS/Gaia-X-Prinzipien prototypisch umgesetzt, d.h. Datensouveränität durch Policies, Nutzung offener Standards, semantische Interoperabilität, Identität/Trust und E2E-Transfers für Mess- und Prognosewerte.

Im Use Case „Digitaler Zwilling“ wurde ein funktionsfähiger Katalog mit Suchfunktionen realisiert.

Für die Erprobung der Anpassungen in den FhG-Anwendungssystemen zur Realisierung der Aufgaben der Netzbetriebsführung wurden Zuständigkeiten, Setup und Ziel festgelegt:

- Entwicklung/Konfiguration der EDC-Erweiterung für den digitalen Zwilling mit der AAS und PowerFactory zur Nutzung des CIM
- Prognoseerstellung mit EMS EDM Prophet® und Bereitstellung für PowerFactory, Bereitstellung der Backends aus EMS-EDM PROPHET®, BaSyx-AAS Environment, PowerFactory
- Betrieb der Testumgebung (virtuelle Maschinen, Konnektoren, Frontends, Backend)

Ziel war der Ende-zu-Ende-Datentransfer zwischen dem Datenraum und den FhG-Backendsystemen für die Use-Cases PV (Messwert-/Prognosebereitstellung) und Digitaler Zwilling (CIM/OEO).

Der Ansatz beinhaltet folgende Services:

- Zeitreihenbereitstellung mit einer Endpunktbereitstellung über eine REST-API
- Prognosebereitstellung mit einer Endpunktbereitstellung über eine REST-API
- Ontologie-basiertes (Domäne Energie) Mapping in JSON-LD für Transferobjekte (DTOs) mit Schnittstellenanpassungen für Angebotszuordnung der Messwertzeitreihe als Kriterium für Prognoseauswahl und einer Auswahlmöglichkeit von Submodellen einer AAS
- Mapping-Konfiguration; Importpfad auf Konsumentenseite über die EDC-Prognoseerweiterung.

Folgende Testfälle wurden realisiert:

- PowerFactory (Netzsimulation) mit dem Ziel des Imports von CIM/XML-Modellen aus EDC-Flow und Validierung der Netzsimulation
- Asset Administration Shell (AAS/BaSyx): AAS Environment/Discovery als Mongo-Datenbank

Zur Erreichung der Kompatibilität wird die Nutzung eines AASx-Explorers in der Version v2024-05-08 empfohlen. Die Versions-/Serialisierungsgrenzen wurden dokumentiert.

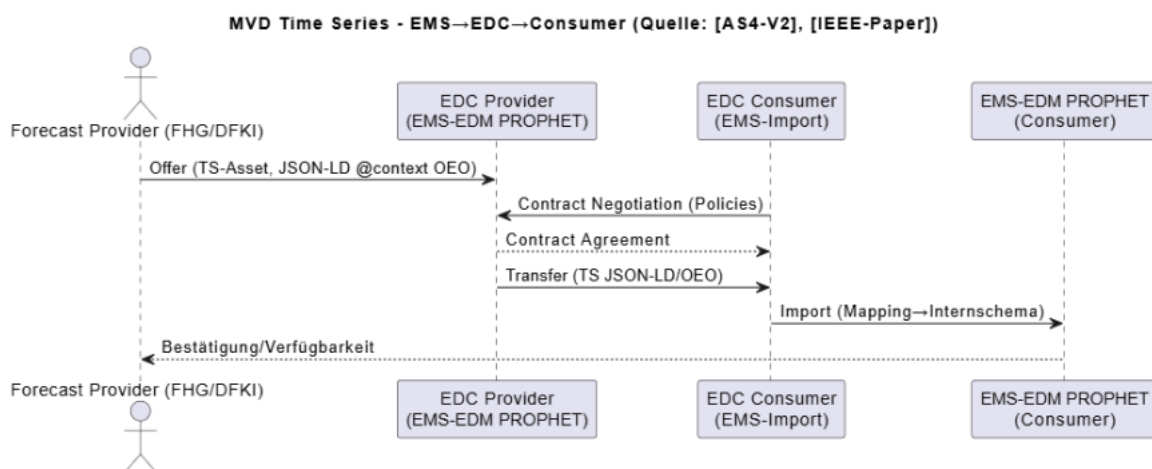


Abbildung 68: Datenfluss beim Angebot, bei der Vertragsverhandlung und beim Datentransfer von Messwerten

Abbildung 68 zeigt den Datenfluss beim Angebot, bei der Vertragsverhandlung und beim Datentransfer von Messwerten.

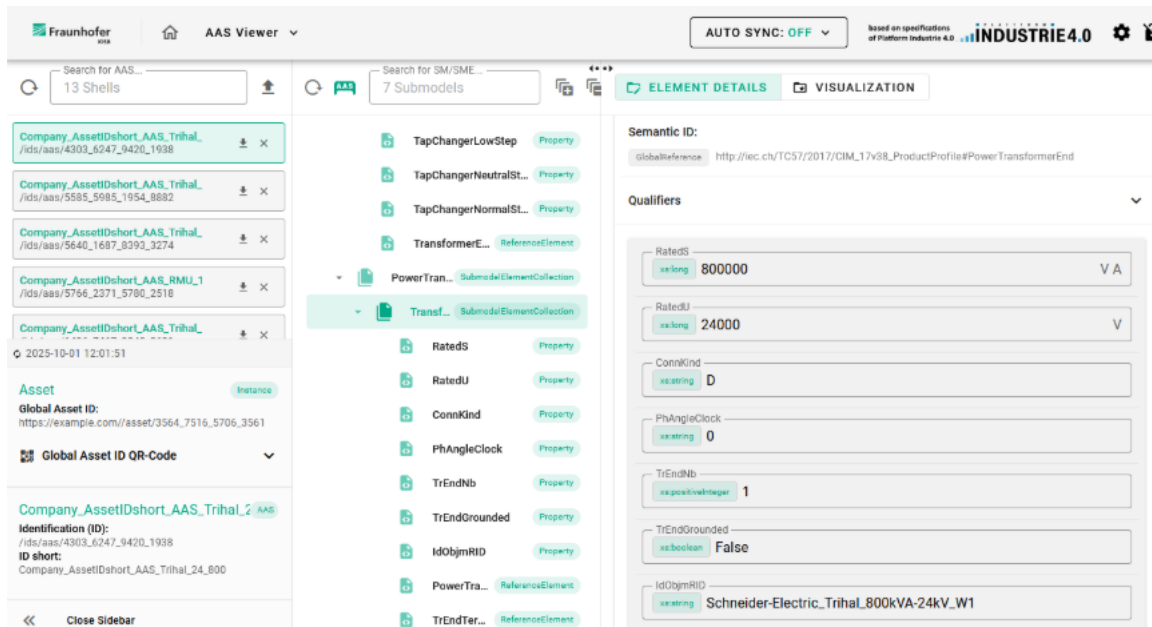


Abbildung 69: Bereitstellung digitaler Zwillinge über die BaSyx-Schnittstellen und die Frontends

Die Abbildung 69 zeigt die Bereitstellung der digitalen Zwillinge über die BaSyx-Schnittstellen und die Frontends. Diese Werte und die Prognosewerte bilden die Grundlage der Erprobung. Abbildung 70, Abbildung 71 und Abbildung 72 zeigen Screenshots des User Interfaces (Frontends) zur benutzerfreundlichen Bedienung der EDC-Konnektoren auf der Datenanbieter- und Datennutzerseite des im Projekt entwickelten Marktplatzes mit dem Namen „Energy Dataspace“. Das Frontend basiert auf einer Open-Source-Lösung der Firma Sovity (EDC-Frontend) und wurde um folgende Komponenten erweitert:

- Erstellung von Angeboten für Prognosewerte
- Erstellung von Angeboten für digitale Zwillinge
- Zuordnung von Membership-Credentials zu einem Vertragsangebot
- Zudem ermöglicht die Open-Source-Middleware-Lösung, die Auswertung der Experimente objektiv zu bewerten, da dort standardisierte Datenraumstatistiken implementiert sind.

Abbildung 70 zeigt ein Angebot über ein Submodell eines mithilfe der AAS repräsentierten digitalen Zwillinges.

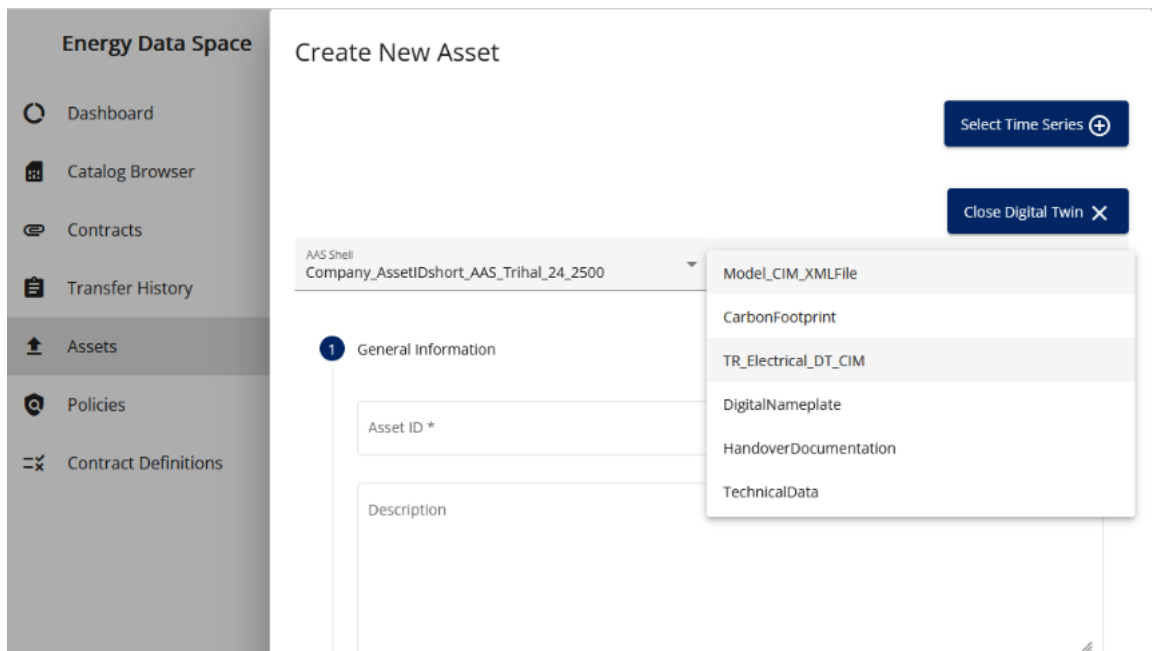


Abbildung 70: Spezifische Angebotserstellung

Über das angepasste EDC-Frontend zur Erstellung spezifischer Angebote für Teile digitaler Zwillinge können einzelne Submodelle der AAS im Datenraum angeboten werden. Diese können dann spezifischen Credentials zugeordnet werden, z.B. ein Angebot über eine Einspeiseprognose einer PV-Anlage.

Das erweiterte EDC-Frontend wird zur Erstellung spezifischer Angebote auf Basis von Prognosewerten genutzt. Hier kann der Zeitraum individuell gewählt werden, welcher dann mithilfe eines Angebotservices gespeichert und dem erstellten Angebot zugeordnet wird.

In Abbildung 70 ist eine spezifische Angebotserstellung mit einer Asset-Beschreibung und einer Policy dargestellt. Diese Angebotserstellung wurde aus der AAS des digitalen Zwillinges des BaSyx-Backends automatisiert als Angebot generiert und den anderen Marktteilnehmern über den EDC zur Verfügung gestellt.

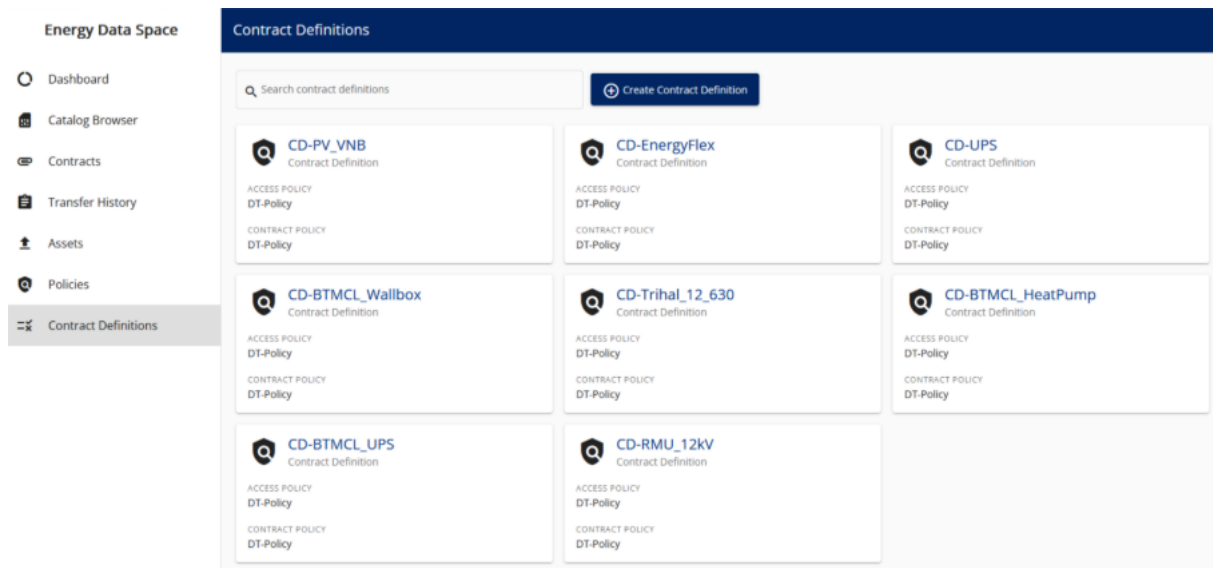


Abbildung 71: Grafische Benutzerschnittstelle des EDC – Es werden die Vertragsdefinitionen angezeigt.

Es wurde ein Dashboard von Sovity für die Datenbereitstellerseite und die Datenkonsumentenseite erweitert, auf dem die vollständigen Datentransfers auf einen Blick erkennbar sind (siehe Abbildung 72).

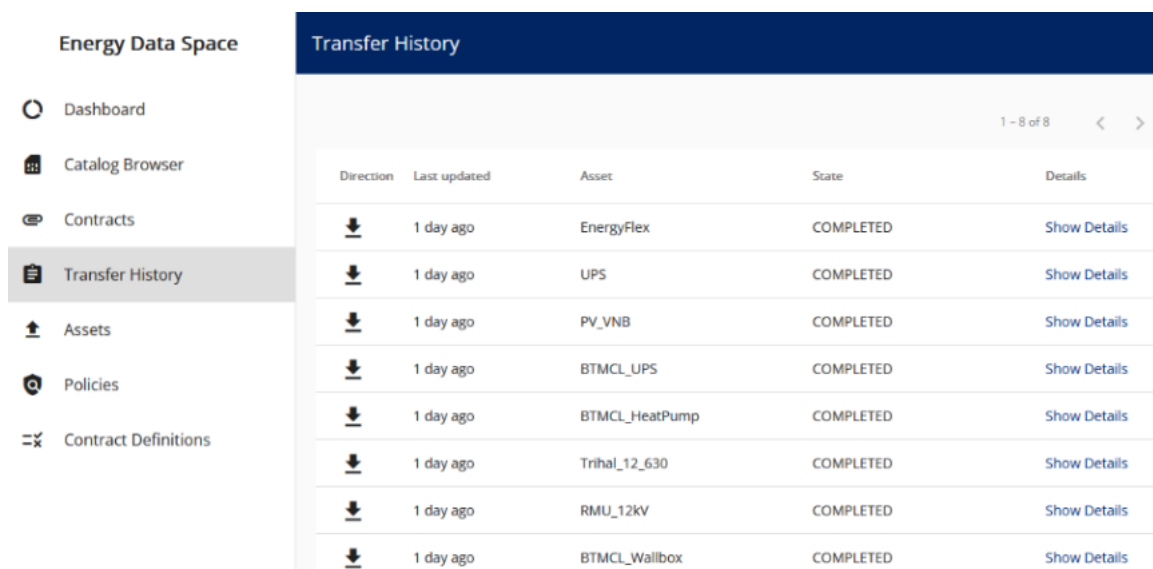


Abbildung 72: Dashboard für die Datenkonsumentenseite mit den vollständigen Datentransfers

Die Erprobung der Beschreibungssprache und Ontologie für Scoring, Metrik und digitale Güter hatte zur Aufgabe, die Validierung der semantischen Beschreibung und des Ontologie-Einsatzes im Datenraum für digitale Güter (digitale Zwillinge, Messwerte, Prognosen) mit geringem Umfang bei Scoring/Metriken sowie die technische und ontologische Einbindung in den EDC-Flows nachzuweisen. Es wurde überprüft, ob das Semantik-Mapping und die Ontologie-Einbindung der OEO, CIM/CGMES an AAS/EDC funktionsfähig und korrekt sind. Des Weiteren wurde die Prognosegüte anhand standardisierter Fehlermaße wie MAE, RMSE und MAPE auf die korrekte Darstellung geprüft.

Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

- Zeitreihen (Messwerte/Prognosen) wurden semantisch annotiert übertragen; und der Kontext war korrekt auflösbar; Import beim Konsumenten ohne Schemafehler.
- Für Prognosefehler wird die OEO-Entität „forecast-error“ verwendet; semantische Konsistenz mit Metrikauswertung gewahrt
- Domänenontologie Energie (OEO) wurde erfolgreich eingebunden für Messwert-/Prognosedaten und Metadaten
- CIM/CGMES: Nutzung für Netzmodelle (CIM/XML Exporte/Importe);
- AAS/IDTA: Semantische IDs in Submodellen; Templates (z. B. Time Series, Digital Name Plate) konzeptuell referenziert;
- Scoring/Gütemaße (Umfang gering)
 - Metriken: MAE, RMSE, MAPE als etablierte Prognosegütekennzahlen dokumentiert; Berechnungskonzepte im Prognosequalitäts-Service (Monitoring) verfügbar.
 - Rechenwege und Kennzahlen wurden plausibilisiert; Einbindung der Ergebnisse als Metainformation (z. B. in Katalog/Frontend) grundsätzlich gegeben. Bewertung der Güte von Prognosen (Prognosefehler) Semantisches Referenzieren ermöglicht vergleichbare Güteangaben; technische Ableitung der Fehlermaße demonstriert.

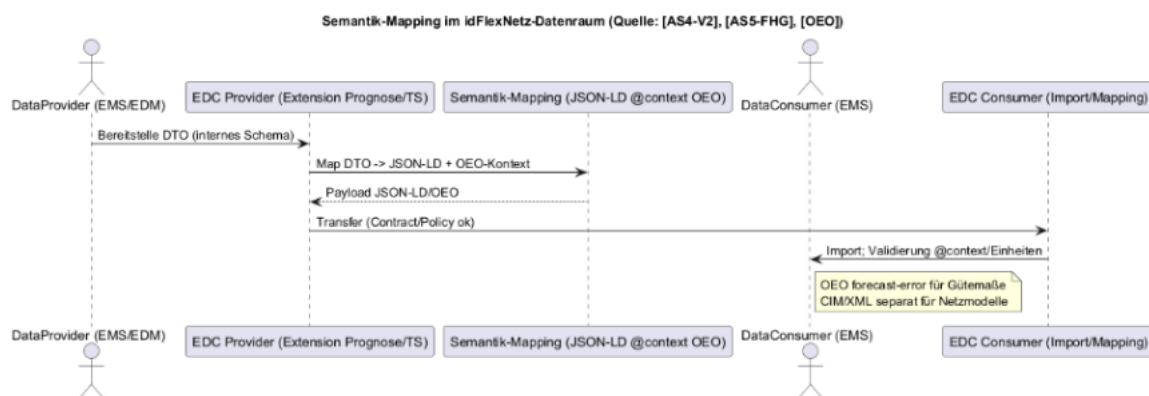


Abbildung 73: Semantik-Mapping Datenfluss

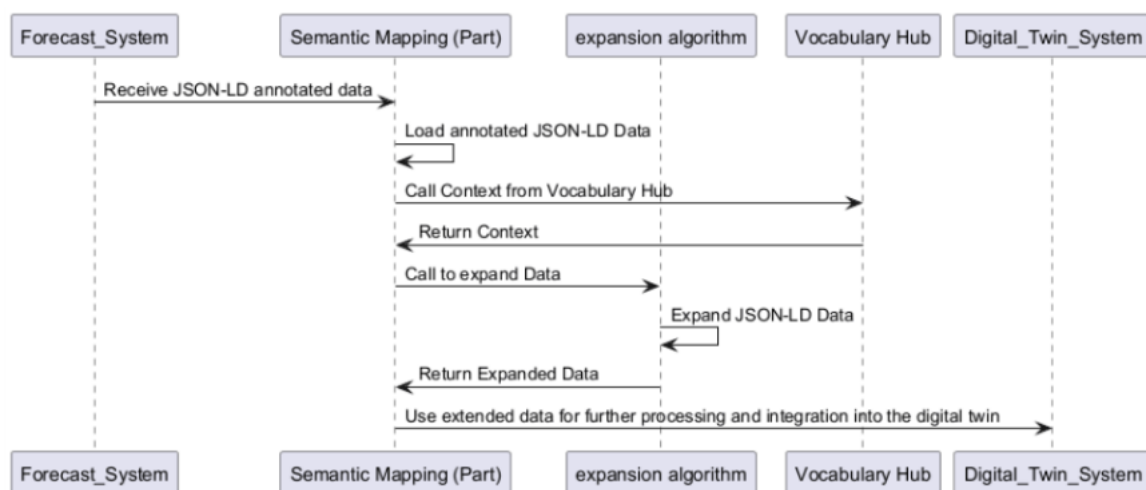


Abbildung 74: Semantisches Mapping - Expanded Algorithm Flow

Ziel und Abgrenzung – Beschreibung digitaler Güter

Ziel war eine konsistente Beschreibung und Austauschfähigkeit digitaler Güter aus dem Feld (u. a. Transformator, Ringkabelschaltanlage, PV, UPS) als digitale Zwillinge auf Basis der AAS, mit semantischer Annotation und domänenspezifischer Kompatibilität (CIM) für die Nutzung in Netzbetrieb/-planung

Der Fokus lag hierbei auf Metadaten (Katalog/Discovery), Austauschobjekten wie digitalen Zwillingen sowie auf Prognosen und deren Identifizierbarkeit und Auffindbarkeit im Katalog. Die Repräsentation der digitalen Zwillinge erfolgt als AAS-Instanzen mit Submodellen basierend auf IDTA-Templates, wie z.B. Digital Nameplate oder Time Series, semantischen IDs im CIM-Format und eindeutiger globaler Identifikation [Semantische Annotation und Austauschformate Semantik]:

Digitale Güter im Feld - AAS (Typ/Instanz/Identifizier) (Quelle: AS3/AS4, BaSyx/IDTA)

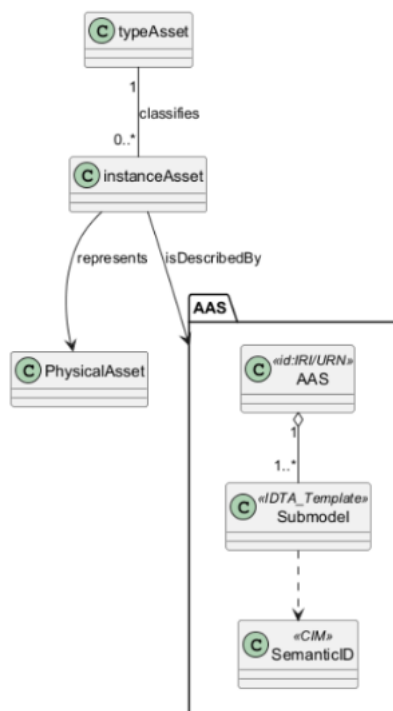


Abbildung 75: AAS (Typ/Instanz/Identifizier (abstrahierte Struktur))

Abbildung 75 zeigt den Zusammenhang zwischen Typ und Instanz, der in der AAS repräsentierten digitalen Zwillinge. Außerdem ist die Struktur innerhalb der AAS abstrahiert dargestellt.

Zur Evaluierung des IKT-Ökosystems und zur Risikoabschätzung wurde ein Testsystem mit den in Abbildung 76 abstrahiert dargestellten Komponenten implementiert. Das Testsystem (Energiemarktlabor) besteht sowohl aus Backendsystemen, die unter Linux und Windows betrieben werden, als auch aus virtuellen Maschinen, die den Datenraum simulieren. Ziel ist die systemische Evaluierung des im Energiemarktlabor betriebenen IKT-Ökosystems (EDC-Konnektoren, Backends, Frontends, externe Erreichbarkeit) sowie die Risikoabschätzung der Betriebs- und Integrationspfade.

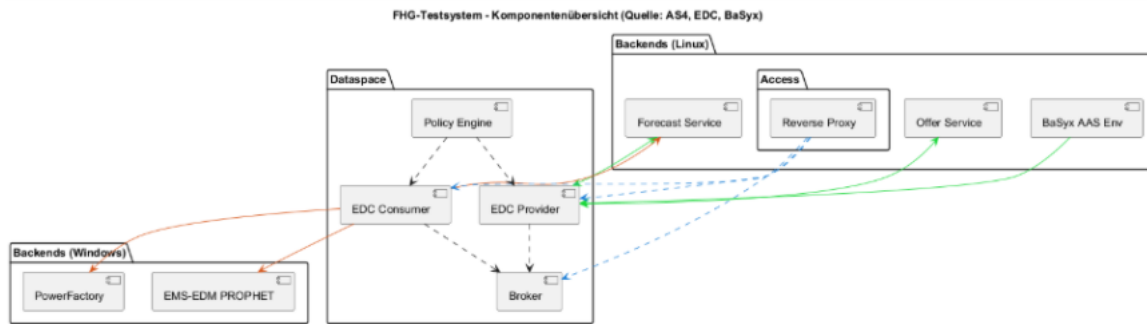


Abbildung 76: Testsystem zur Evaluierung des IKT-Ökosystems und zur Risikoabschätzung

Für die Erprobung des Gesamtsystems wurden folgende KPIs definiert:

- Bereitstellung digitaler Zwillinge folgender Komponenten als AAS-Datei:
 - Transformator
 - Ringkabelschaltanlage (RMU)
 - Fernsteuereinheit (RTU)
 - Wärmepumpe
 - Wallbox
 - Unterbrechungsfreie Stromversorgung
 - Solar-Modul
- Übertragung der Komponenten AAS von Komponentenhersteller zum Verteilnetzbetreiber (Datenkonsument)
- Übertragung der Messwerte des Verteilnetzbetreibers zum Prognoseanbieter

Tabelle 19: Interoperabilitätstest

#	Wer	Aktion	KPI
1.	VSE	Aufruf der Angebotsauswahl (Katalog)	Prüfung der Rolle, wenn positiv, dann werden alle verfügbaren digitalen Zwillinge angezeigt.
2.	VSE	Auswahl eines digitalen Zwillings aus den Angeboten	Anzeige Nutzungsvertrag vorhanden JA / NEIN
3.	VSE	Anfrage des digitalen Zwillings bei SE (Datenanbieter)	Anfrage trifft bei SE ein.
4.	SE	Prüfung, ob Nutzungsvertrag vorhanden	JA: Daten können heruntergeladen werden. NEIN: Nutzungsvertrag muss erstellt werden.
5.	VSE	JA: Download der Daten	Daten können vom SE-Konnektor in PowerFactory importiert werden.
6.	SE	NEIN: Lieferantenvertrag-Credential muss erstellt werden.	Lieferantenvertrag-Credential
7.	SE	Aufruf aller verfügbaren Inhalte	Anzeige Katalog
8.	SE	Aufruf einer Prognose	Gesperrt, da kein Vertrag vorhanden.
9.	FhG-IOSB	Aufruf aller verfügbaren Inhalte	Anzeige Katalog
10.	FhG-IOSB	Aufruf eines digitalen Zwillings	Gesperrt, da kein Vertrag vorhanden.
11.	DFKI	Aufruf aller verfügbaren Inhalte	Anzeige Katalog
12.	DFKI	Aufruf eines digitalen Zwillings	Gesperrt, da kein Vertrag vorhanden.

In einem Interoperabilitätstest (siehe Tabelle 19) wurde geprüft, ob sich die von Schneider Electric erstellten digitalen Zwillinge (bspw. Schaltanlage, Transformator, Wärmepumpe) sowie deren CIM-Modelle, die von der VSE als Datenkonsument über den Marktplatz abgerufen wurden, in das Netzplanungstool PowerFactory integrieren lassen (Use Case 1).

Nach einigen Korrekturen in den AAS-Dateien der einzelnen Komponenten lassen sich CIM-Modelle importieren und zur Netzberechnung verwenden. Beispielsweise waren im CIM-Submodell des Transformators die Wicklungen des Transformators nicht zugeordnet und wurden separat angezeigt, obwohl diese eine Untergruppe des Transformators sind. Abbildung 77 zeigt den Abgleich der „Ziel-CIM“ mit den verschiedenen AAS-Dateien, die vom Datenanbieter bereitgestellt werden.

Quell-AAS	AAS-Submodel-Name	Ziel-CIM	EDC-Asset-Name
Transformator = Dateien mit „Trihal“ im Dateinamen			
Company_AssetIDshort_AAS_Trihal_12_630_v1.aasx	TR_Electrical_DT_CIM	Trihal_12_630	Trihal_12_630
Company_AssetIDshort_AAS_Trihal_12_800_v1.aasx	TR_Electrical_DT_CIM	Trihal_12_800	Trihal_12_800
Company_AssetIDshort_AAS_Trihal_12_2500_v1.aasx	TR_Electrical_DT_CIM	Trihal_12_2500	Trihal_12_2500
Company_AssetIDshort_AAS_Trihal_24_800_v1.aasx	TR_Electrical_DT_CIM	Trihal_24_800	Trihal_24_800
Company_AssetIDshort_AAS_Trihal_24_2500_v1.aasx	TR_Electrical_DT_CIM	Trihal_24_2500	Trihal_24_2500
Schneider-Electric_Trihal-24kV_630_ID_V5_mod3-AASEx_v3-16	TR_Electrical_DT_CIM	Trihal_24_630	Trihal_24_630
Schaltanlage = Dateien mit „RMU“ im Dateinamen			
Company_AssetIDshort_AAS_RMU_12kV_IIQ_v1.aasx	RMU_Electrical_DT_CIM	RMU_12kV_IIQ	RMU_12kV_IIQ
Schneider-Electric_RMAlRSet24kV_ID_new V8_mod_v3-15.aasx	RMU_Electrical_DT_CIM	RMU_24kV_IIQ	RMU_24kV_IIQ
ChargingStation			
EndComponent_ChargingStation_v4.aasx	BTM_Wallbox_Forecast_OutputPower_CIM61968_TS	BTMCL_Wallbox_Forecast_OutputPower	BTMCL_Wallbox_Forecast_OutputPower
HeatPump			
EndComponent_HeatPump_v3.aasx	BTM_HeatPump_DT	BTMCL_HeatPump	BTMCL_HeatPump
UPS			
EndComponent_UPS_v3.aasx	BTM_UPS_Forecast_OutputPower_CIM61968_TS	BTMCL_UPS_Forecast_OutputPower	BTMCL_UPS_Forecast_OutputPower
EndComponent_UPS_v3.aasx	UPS_Flexibility_EnergyCurve_CIM62746_TS	BTMCL_UPS_Flexibility_EnergyCurve	BTMCL_UPS_Flexibility_EnergyCurve
Easergy			
EndComponent_EasergyT300-V2-V3-13.aasx	T300_Electrical_DT_CIM	>> Fehler entsteht	AAS_T300
Solar Panel			
Solar_Panel_v6_CIM_TS	PV_Forecast_OutputPower_CIM61968_TS	PV_OutputPower_CIM61968_TS	PV_OutputPower_CIM61968_TS
Solar_Panel_v6_CIM_TS	PV_Forecast_OutputPower_CIM61970_TS	PV_OutputPower_CIM61970_TS	PV_OutputPower_CIM61970_TS

Abbildung 77: Gegenüberstellung der Ziel-CIM mit ausgewählten AAS

Der Datenkonsument nutzt die Ziel-CIM-Datei zum Import in PowerFactory. Mithilfe dieser Tabellen wurden die Quell- und Zieldaten verglichen, und es wurden keine Unterschiede in den Werten des CIM-Submodells zwischen der jeweiligen Shell und dem resultierenden XML-CIM auf Seiten der Datenkonsumenten festgestellt. Auch die Datenübertragung von Zeitreihen für den Use Case 2, einschließlich der Datenübertragung für die Prognosemodelle von Fraunhofer und DFKI, wurde erfolgreich getestet. Dabei wurden Prognosewerte auf der Seite der Datenanbieter aus dem EMS-EDM PROPHET[®] über den Datenraum im JSON-LD-Format annotiert mit OEO zur Seite der Datenkonsumenten übertragen und als CSV-Stunde-im-Jahr-Zeitreihe für den Import in PowerFactory zur Verfügung gestellt.

Um die Erprobung des Marktplatzes durchzuführen, wurden im Projekt folgende Rollen definiert:

1. Komponentenhersteller (z.B. Schneider Electric)
2. Prognoseanbieter (z.B. DFKI oder Fraunhofer)
3. Datenkonsument und Messwertlieferant (z.B. Verteilnetzbetreiber)
4. Betreiber der Datenraum-Infrastruktur (Geschäftsmodell abhängig; im Rahmen von idFlexNetz hat dies Fraunhofer bzw. Spherity übernommen)

Zu 1.: Komponentenhersteller: Erstellung der digitalen Zwillinge der Anlage. Erstellung der Angebote für die digitalen Zwillinge der Anlagen. Präsentation der Angebote auf dem Marktplatz. Bereitstellung der Anlagen-AAS für die Netzberechnungen und die Datenkonsumenten.

Zu 2.: Prognoseanbieter 1: Bereitstellung eines Services zur Berechnung der Prognose der Einspeiseleistung der PV-Anlage. Auswahl und Kauf des Prognoseservices über den Marktplatz.

Zu 2.: Prognoseanbieter 2: Alternative Bereitstellung eines Prognoseservices. Auswahl und Kauf des Prognoseservices über den Marktplatz.

Zu 3.: Datenkonsument & Messwertlieferant: Durchführung von Netzberechnungen wie Netzplanung und -optimierung. Nutzung der bereitgestellten Daten und Prognosen zur Optimierung des Netzbetriebs. Lieferung von Messwerten zur Erstellung und Validierung der Prognosen. Auswahl digitaler Zwillinge der Anlagen- und Serviceanbieter zur Prognoseberechnung über den Marktplatz.

Zu 4.: Betreiber der Datenraum-Infrastruktur: Bereitstellung und Wartung der technischen Infrastruktur für den Datenraum. Sicherstellung der Datenintegrität und -sicherheit während der Übertragungen. Bereitstellung des Frontends zur Erstellung von Angeboten für digitale Zwillinge. Unterstützung bei der Vertragsverhandlung und der Datenübertragung. Weitere Aufgaben und Bestandteile in unserem Anwendungsfall sind (dies kann im Realbetrieb auch von anderen Einrichtungen übernommen werden): Identity Provider / Authentication Verification (Umsetzung durch Spherity): Registration Authority und Credentials Issuer Verifizierung der beteiligten Parteien während der Vertragsverhandlungen und Datenübertragungen. Sicherstellung der Identität und Transaktionssicherheit.

Broker (Umsetzung durch DFKI): Vermittlung zwischen den verschiedenen Parteien auf dem Marktplatz. Unterstützung bei der Vertragsverhandlung und beim Abschluss von Transaktionen. Diese Rollen sind entscheidend für die erfolgreiche Durchführung des Use Cases sowie für die Integration von Komponenten und Services auf dem Marktplatz.

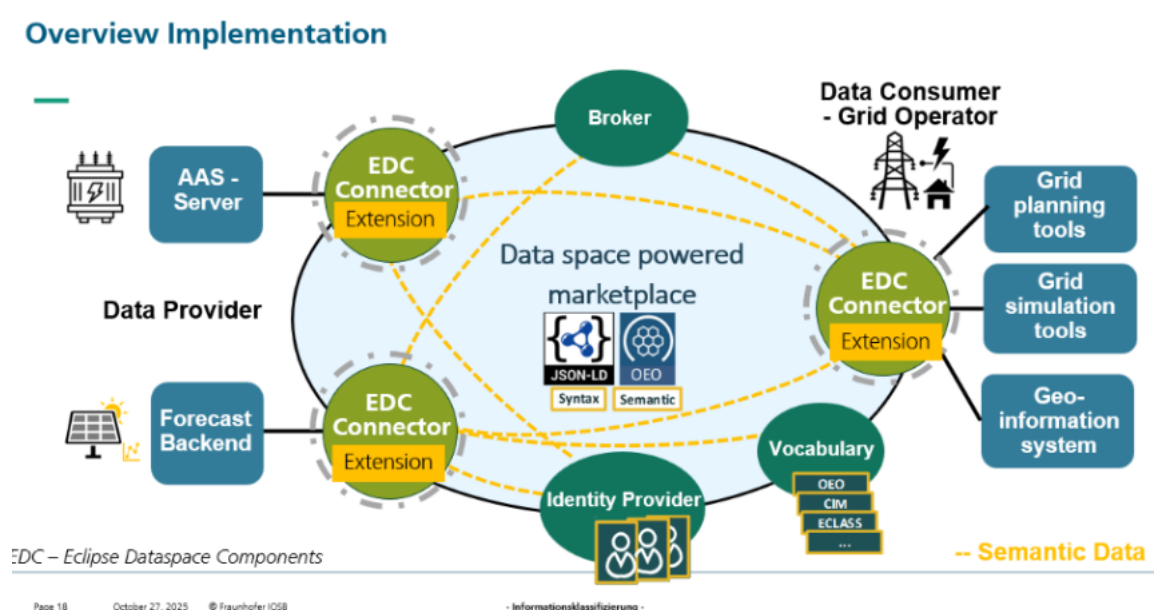


Abbildung 78: Überblick über die implementierte Architektur des IKT-Ökosystems

Für die Erprobung der Beschreibungssprache und Ontologie für Scoring, Metrik und digitale Güter wurde als Framework ein Apache-Jena-Fuseki-Server genutzt, um eine direkte Integration der in der OEO beschriebenen Assets zu ermöglichen. Zudem wurde die Ontologie um die Beschreibung des Maturity-Index (Reifegrad-Index) erweitert. Der Maturity-Index basiert auf sieben Merkmalen digitaler Zwillinge: Kontext, Daten, Rechenfähigkeit, Modell, Integration, Steuerung und Mensch-Maschine-Interaktion.

Jede Kategorie besteht aus Unterkategorien, die drei Arten von Bewertungen verwenden: hierarchisch-kategoriale, additive und optional-additive Bewertung (Scoring). Jede dieser Kategorien umfasst weitere Unterkategorien, die primär zwei Bewertungsmechanismen nutzen. Eine kategoriale Bewertung erlaubt nur eine Auswahl aus einem definierten Satz gewichteter Eigenschaften. Das volle Gewicht der ausgewählten Eigenschaft fließt in die Gesamtpunktzahl ein. Eine additive Bewertung erlaubt die Mehrfachauswahl aus einem definierten Satz gewichteter Eigenschaften. Alle Gewichte der ausgewählten Eigenschaften fließen in die Gesamtpunktzahl ein. Als Beziehung zwischen dem digitalen Zwilling und seinen Fähigkeiten wird eine 1:N-Objekteigenschaft „has capability“ („hat Fähigkeit“) definiert. Darüber hinaus wird die Bewertungslogik direkt durch Constraints (Einschränkungen) vorgegeben. Für eine kategoriale Bewertung wird eine 0:1-Relation „has capability“ („hat Fähigkeit“) über die Konjunktion des entsprechenden Eigenschaftssatzes definiert, wodurch sichergestellt wird, dass nur eine Auswahl möglich ist. Für jede additive Bewertung wird eine 0:1-Relation „has capability“ („hat Fähigkeit“) als Constraint für jede additive Eigenschaft hinzugefügt. Da diese Constraints Teil der Ontologie-Struktur sind, muss der Bewertungsalgorithmus des digitalen Zwillings lediglich die über SPARQL-Abfragen gesammelten Gewichte summieren, was die Berechnung signifikant vereinfacht.

Zum Überprüfen der Scoring-Verfahren und Metriken zur Bewertung der Prognosen hinsichtlich der Nutzung bzw. dem Anwendungszweck der Assets wurden die jeweiligen Fähigkeiten der im Projekt entwickelten Asset Administration Shells der Netzkomponenten und Prognosen bewertet.

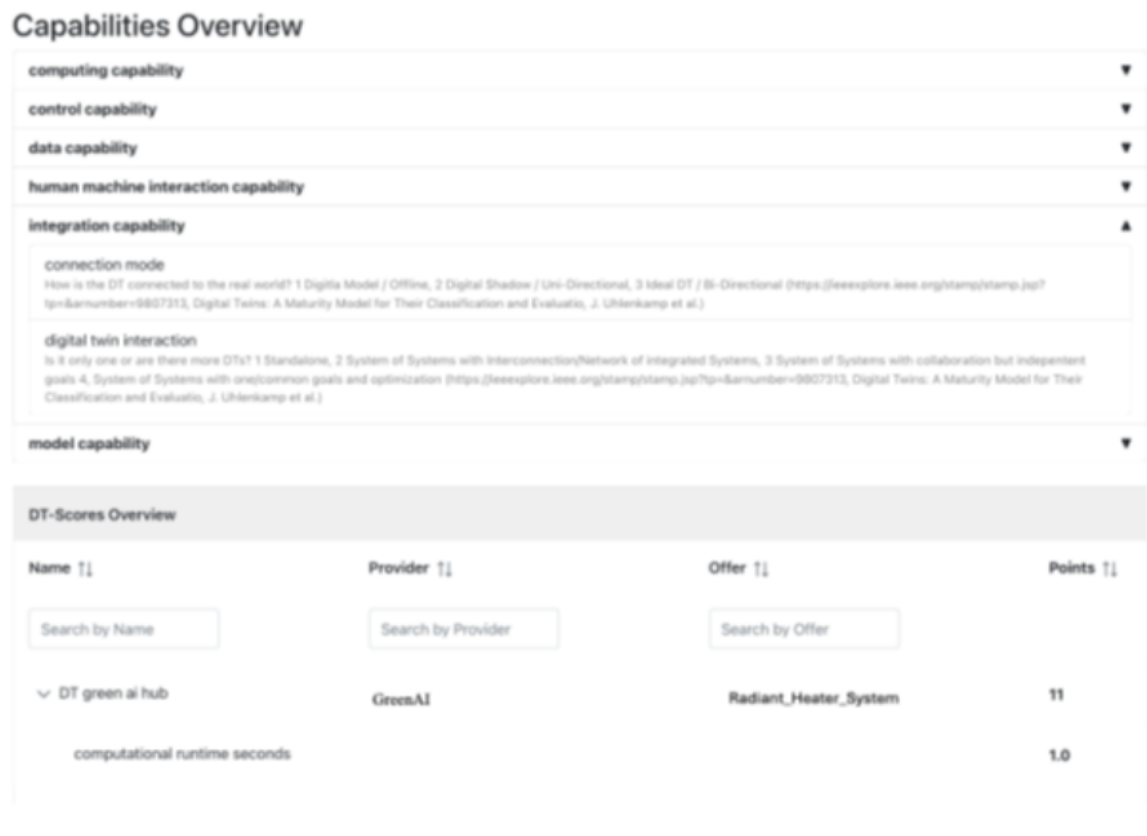


Abbildung 79: Capabilities Overview

Zur einfachen Auswahl der Vorhersagekomponente wurde ein Assistenzsystem entwickelt, das Prognosen nach Anwendungszweck und Bewertungskriterien sortiert anzeigt.

Das Framework stellt verschiedene Nutzerschnittstellen bereit, um die angebotenen Produkte zu filtern und zu durchsuchen. Durch die Integration der Ontologie lassen sich zielgerichtet spezialisierte Algorithmen für einzelne Anwendungsfälle ohne Eingreifen des Nutzers automatisiert auswählen. Die Angebote werden auf ihre Konsistenz überprüft, was bei den Nutzern Vertrauen schafft. Als Beispiele werden hier Screenshots des Demonstrators für (a) die Filterung der Zeitreihen nach Einheiten und (b) eine ontologische Suche auf dem gesamten Marktplatz gezeigt.



Abbildung 80: Zeitreihen

Um eine Kopplung von Vorhersageverfahren mit einer digitalen Identität mit Scoring und digitalem Produktgedächtnis zu realisieren, wurden die im Projekt genutzten Prognosen in der OEO beschrieben und die Daten bereitgestellt. Ein Agent stellte diese tagesaktuell über eine Schnittstelle als Ressource auf dem Marktplatz zur Verfügung. Dort wurden die angebotenen Prognosen anhand der Ontologie-Regeln auf Konsistenz überprüft und nach erfolgreicher Überprüfung dem Endnutzer bereitgestellt. Zur Übertragung werden zudem nur Datenraumschnittstellen genutzt, sodass eine sichere Ende-zu-Ende-Datenintegration erfolgreich etabliert wurde. Zudem nutzt das Framework eine native BaSyx-Integration über einen Messenger (RabbitMQ oder Kafka). Dies schafft eine nahtlose Integrationschnittstelle, so dass digitale Zwillinge und ihre gekapselten Informationen direkt in ein Produktivsystem integriert werden können.

7.3 Cyber-physische Systeme

Spherity testete gemeinsam mit anderen Projektpartnern die Integration der idFlexNetz-Systeme mit der EUBW-Vertrauensinfrastruktur, um den sicheren und interoperablen Datenaustausch zwischen Unternehmen, digitalen Zwillingen und Datenraum-Infrastrukturen zu demonstrieren. Der Schwerpunkt lag auf der Verknüpfung von physischen Anlagen, Datenraum-Konnektoren und Unternehmens-Identitäten über das EUBW-basierte Trust-Framework.

Dafür wurde ein containerisiertes, API-basiertes CPS-Testsystem mit EDC-Konnektoren, European Business Wallets (EUBW) und einer Verifiable Data Registry (VDR) aufgebaut. Eine Simulation des Unternehmens-Onboardings über den Bundesanzeiger Verlag (Issuer-Rolle) und die Dataspace Authority wurde durchgeführt; eine Ausstellung von Legal Person Identity (LPID)-Credentials und Business-Partner-Number-Credentials wurde initiiert. Die Registrierung des EDC-Konnektors über die European Business Wallet mit DSP-/DCP-basierter Authentifizierung war erfolgreich und die Anbindung realer Systeme (AAS-Server, Prognoseservices, Energieanlagen) über REST- und MQTT-Schnittstellen unter Nutzung von DID:web-basierten Identitäten funktionierte problemlos. D.h. der Aufbau einer vertrauensbasierten Kommunikationskette zwischen Datenanbieter (Schneider Electric), Datenkonsument (VSE) und Marktplatz (DFKI) konnte nachgewiesen werden.

Der Nachweis der Ende-zu-Ende-Interoperabilität zwischen physischen Assets, AAS-Infrastrukturen und dem idFlexNetz-Datenraum konnte erbracht werden. Datenzugriffe konnten ausschließlich durch verifizierte Unternehmens-Credentials autorisiert werden. Der EUBW-basierte Identitätsnachweis erwies sich als robust und interoperabel mit den Eclipse Dataspace Components (EDC) und der Gaia-X-Referenzarchitektur.

Das Zusammenschalten der Systeme belegt, dass eine eIDAS 2.0-konforme Identitätsinfrastruktur in industriellen CPS-Umgebungen praktikabel ist. Der Ansatz ermöglicht sichere Datenflüsse über Unternehmensgrenzen hinweg bei gleichzeitig hoher Nachvollziehbarkeit und Integrität.

Der nächste Schritt war die Bewertung der Leistungs- und Skalierbarkeitsmerkmale des idFlexNetz-Cyber-physischen-Systems unter realistischen Bedingungen. Dabei wurde insbesondere untersucht, wie sich Policy-Verhandlungen, Credential-Verifikationen und Datenübertragungen auf Latenz und Stabilität auswirken. Es wurde eine Testumgebung mit mehreren EDC-Instanzen (Anbieter/Konsument) und simulierten Unternehmen (Wallet-Clients) aufgebaut und parallele Datentransaktionen über den Datenraum (MVD-Messwerte/Prognosen/Digitale Zwillinge) durchgeführt.

Die Testumgebung zeigte, dass die Integration des EUBW-/EDC-Frameworks funktioniert (Policy-Negotiation und Credential-Prüfung). Das System zeigte eine hohe Stabilität.

Im nächsten Schritt ist es sinnvoll, einen Massen- und Lasttest unter Realbedingungen im Ökosystem mit einer Vielzahl an Teilnehmern, Daten und Assets (die im Idealfall mehrere Millionen umfassen sollten) durchzuführen.

Um die Praxistauglichkeit sicherzustellen, sollen der Import und die semantische Integration von Komponentendaten, die Schneider Electric in den IT-Systemen der VSE über das idFlexNetz-IKT-System bereitstellt, überprüft werden. Dabei sollte gezeigt werden, dass Datenflüsse aus Herstellersystemen über den Datenraum verifiziert, semantisch angereichert und sicher weiterverarbeitet werden können. Unter Nutzung des EUBW-Frameworks wurden die angebundenen Datenquellen authentifiziert und die autorisierte Bereitstellung von Komponentendaten sichergestellt. Anschließend erfolgte der Datenaustausch von Transformator-, Ringkabelschaltanlage- und PV-Anlagendaten über den BaSyx-AAS-Server, wobei die übertragenen Informationen erfolgreich in das Netzberechnungssystem PowerFactory integriert wurden. Zur konsistenten und eindeutigen Beschreibung der bereitgestellten Informationen kamen zudem semantische Annotationen auf Basis der OEO- und CIM-Kontexte zum Einsatz, um Messwerte, Zustände und Metadaten eindeutig zu klassifizieren und systemübergreifend interpretierbar zu machen.

Die Absicherung der Datenübertragung erfolgt über EDC-Konnektoren mit Credential- und Policy-basierten Zugriffskontrollen und Signaturprüfung. Alle relevanten Anlagen konnten erfolgreich im Datenraum registriert und im PowerFactory-Netzmodell eingebunden werden. Die semantische Konsistenz der Metadaten wurde durch eine Ontologie-Validierung (OEO/CIM-Mapping ohne Konflikte) sichergestellt. Der Zugriff auf die importierten Datensätze erfolgte ausschließlich über verifizierte Unternehmens-Identitäten, wodurch Datenintegrität und Herkunft eindeutig nachweisbar waren. Bewertung: Der Datenaustausch realer Feld- und Anlagendaten zeigte, dass das Zusammenspiel von EUBW-Identität, Policy-Engine, semantischer Ontologie und AAS-basierter Anlagenabbildung technisch stabil ist. Damit wurde die Grundlage geschaffen, reale Netz- und CPS-Daten sicher in den idFlexNetz-Marktplatz

zu integrieren und für Simulationen, Prognosen und digitale Zwillinge nutzbar zu machen.

Zusätzlich zu den bereits in BaSyx integrierten Systemen wurde die Bereitstellung von Angeboten auf dem Marktplatz erprobt. Grundlage bildete, wie zuvor erwähnt, ein REST-Service, dessen Schnittstellen über einen Datenraum-Konnektor bereitgestellt wurden. Dies erfolgte mithilfe der Standardkonfiguration des EDC. Damit konnte gezeigt werden, dass eine Integration verschiedener Systeme mit geringem Aufwand und nur kurzer Einarbeitungszeit möglich ist. Dies ist insbesondere von Bedeutung, um die Technologiehürde zur Teilnahme an Datenräumen für kleine und mittlere Unternehmen niedrig zu halten.

Um die Anwenderfreundlichkeit des Cyber-physischen Systems sicherzustellen, wurden sogenannte mehrphasige Schneider Electric Customer Journeys genutzt. Eine solche Schneider Electric Customer Journey umfasst mehrere Phasen, die darauf abzielen, Kundenbedürfnisse zu verstehen und sie durch den gesamten Kauf- und Serviceprozess zu begleiten. Die optimale Umsetzung der Customer User Journeys in Cyber-physischen Systemen (CPS) für elektrische Netze unter Verwendung digitaler Zwillinge kann zum Beispiel wie folgt aussehen ein digitaler Zwilling für Stromnetze

Bewusstsein

- **Marketing:** Informationen über die Vorteile digitaler Zwillinge zur Optimierung von Stromnetzen werden in Fachartikeln, in Webinaren und auf Social Media veröffentlicht. Interessenten erfahren, wie digitale Zwillinge helfen, die Effizienz und Zuverlässigkeit von Netzen zu erhöhen.
- **Erwägung:** Interaktive Demos: Interessierte Unternehmen können interaktive Modelle digitaler Zwillinge anfordern, um deren Funktionsweise in ihren jeweiligen Netzarchitekturen zu sehen.
- **Fallstudien:** Präsentation von Beispielen, in denen Unternehmen durch den Einsatz digitaler Zwillinge die Netzstabilität verbessert oder die Betriebskosten gesenkt haben.

Entscheidung

- **Beratung:** Maßgeschneiderte Beratungsdienste der Komponentenhersteller, um den spezifischen Bedarf des Kunden zu analysieren und zu ermitteln, wie sich digitale Zwillinge in bestehende IT-Systeme integrieren lassen.
- **Prototyping:** Entwicklung von Prototypen spezifischer digitaler Zwillinge von Netzkomponenten, um den Kunden die Funktionalitäten und Vorteile in ihrem jeweiligen Kontext zu demonstrieren.

Kauf

- **Reibungsloser Bestellprozess:** Bereitstellung eines klaren und unkomplizierten Bestellprozesses für die erforderliche Software und Hardware zur Implementierung des digitalen Zwillings.
- **Nutzung:** Implementierung: Unterstützung bei der Integration des digitalen Zwillings in das bestehende elektrische Netz, einschließlich der Anpassung an spezifische Anforderungen. Schulung: Bereitstellung von Schulungen für die Mitarbeiter des Unternehmens, um sicherzustellen, dass sie den digitalen Zwilling effektiv nutzen und interpretieren können.

- **Treue: Feedback und Optimierung:** Regelmäßige Nachverfolgung, um Nutzer-Rückmeldungen zu sammeln und den digitalen Zwilling entsprechend zu optimieren, um die Leistung zu verbessern. **Updates und Erweiterungen:** Informationen zu neuen Funktionen und Verbesserungen, damit Kunden den digitalen Zwilling optimal nutzen können.

Fazit

Durch den Einsatz digitaler Zwillinge für elektrische Netze in der Customer User Journey können Unternehmen nicht nur die Effizienz und Zuverlässigkeit ihrer Netze erhöhen, sondern auch ein spezifisches und nachvollziehbares Ergebnis für den Kunden erzielen. Im Fall von idFlexNetz wurde dies durch den Transfer des digitalen Zwillings sowohl als AASx-Datei in Binärform als auch als JSON-LD-Datei über den Datenraum zum Datenkonsumenten der VSE erreicht. Diese AAS-Datei enthält ein CIM der Komponente, das nach der Übertragung direkt in das Netzplanungstool PowerFactory integriert werden kann. Diese praktische Anwendung, die zukünftig vielfach beim weiteren Ausbau von PV, EV und Batterien im Einfamilienhausbereich ausgeführt werden muss, führt zu höherer Akzeptanz der Lösung und gesteigerter Bereitschaft, in digitale Zwillinge und deren umfassende Einführung zu investieren.

Die Bereitstellung digitaler Güter als Cyber-physische Systeme (CPS) durch Komponentenhersteller wie Schneider Electric und andere Softwareanbieter kann auf verschiedene Weise erfolgen. Die nachfolgenden als sinnvoll erachteten Punkte wurden gemäß Projektantrag umgesetzt:

1. **Cloud-basierte Plattformen (Software-as-a-Service, SaaS):** Anbieter können Softwarelösungen anbieten, die über das Internet zugänglich sind, sodass Kunden digitale Güter wie Analytik-Tools, Überwachungssoftware und Fernsteuerungssysteme nutzen können, ohne lokale Infrastruktur zu benötigen. Der PV-Forecast von Fraunhofer und DFKI wird über eine Docker-Lösung über Konnektoren in den Marktplatz eingebunden. Grundsätzlich kann jede Cloud-Lösung in den idFlexNetz-Marktplatz integriert werden
2. **Digitale Zwillinge und virtuelle Modelle:** Anbieter können digitale Zwillinge physischer Anlagen oder Prozesse bereitstellen. Diese Modelle helfen Kunden, die Leistung in Echtzeit zu überwachen und durch Simulationen Optimierungen vorzunehmen. In idFlexNetz werden digitale Zwillinge ausgewählter Netzkomponenten als AASx-Datei über BaSyx in den Datenraum-Marktplatz integriert.
3. **IoT-Integration (nicht im Rahmen von idFlexNetz umgesetzt) Sensoren und Aktoren:** Durch die Bereitstellung von IoT-fähigen Geräten können Hersteller Daten in Echtzeit erfassen und analysieren, um die Effizienz und Wartung von Systemen zu verbessern. AAS-Dateien der Sensoren und Aktoren können in die Asset Administration Shells der Netzkomponenten in nahezu beliebiger Granularität integriert werden.
4. **APIs und SDKs Entwicklerressourcen:** Anbieter können APIs (Application Programming Interfaces) und Software Development Kits (SDKs) zur Verfügung stellen, damit Kunden eigene Anwendungen entwickeln und die digitalen Güter nahtlos in ihre bestehenden Systeme oder in Datenräume/Marktplätze integrieren können.
5. **E-Learning und Schulungsressourcen (nicht im Rahmen von idFlexNetz betrachtet) Schulungsplattformen:** Digitale Güter können auch in Form von Online-Kursen, Tutorials und Webinaren bereitgestellt werden, um Kunden und Partner zu schulen und die Nutzung der Produkte zu maximieren.

6. Datenanalytik und KI-Analyse-Tools: Anbieter können fortschrittliche Datenanalysen und KI-gestützte Lösungen bereitstellen, um Muster zu erkennen, Vorhersagen zu treffen und die Entscheidungsfindung zu unterstützen. Beispielsweise können historische Daten eines Transformators, z.B. Lastkurven einer zeitlichen Periode, genutzt werden, um ein zustandsorientiertes und damit kosteneffizientes Warten anbieten zu können.
7. Kollaborationsplattformen (nicht im Rahmen von idFlexNetz betrachtet) und Online-Communities: Schaffung von Plattformen, auf denen Kunden Erfahrungen austauschen, Best Practices diskutieren und Unterstützung erhalten können.
8. Modularer Ansatz flexibler Lösungen: Bereitstellung modularer Komponenten, die sich nach Bedarf kombinieren lassen, um maßgeschneiderte Lösungen für spezifische Anforderungen zu schaffen.

Fazit

Durch diese verschiedenen Ansätze können Komponentenhersteller und Softwareanbieter digitale Güter effektiv bereitstellen, um die Effizienz, Flexibilität und Leistung von Cyber-physischen Systemen zu verbessern.

7.4 Integration

Bereitstellung von Prognosedaten: Im Rahmen des UAS wurde eine Möglichkeit geschaffen Prognosedaten vom Marktplatz bzw. Prognoseanbieter auf einen zentralen Datenablageort (hier: Sharepoint) zu transferieren. Diese Prognosedaten wurden anschließend als Zeitreihen in das Netzberechnungsprogramm integriert. Die Integration ist darauf ausgelegt, dass eine aktualisierte Prognose nicht manuell in das System eingepflegt werden muss. Die Zeitreihen werden in einem Netzberechnungsmodell den jeweiligen Betriebsmitteln (z. B. PV-Anlage, Wallbox) zugewiesen und bei jedem Neuaufwurf des Netzberechnungsprogramms aktualisiert. Somit ist sichergestellt, dass stets eine aktualisierte Zeitreihe im Netzberechnungsprogramm zur Verfügung steht und keine manuellen Arbeiten erforderlich sind, um sie zu aktualisieren.

Neben dem automatisierten Import von Prognosedaten mussten außerdem Anpassungen des Common Grid Model Exchange Standards (CGMES) im Zielsystem vorgenommen werden. Nur unter Beachtung dieser Anpassungen ist es möglich, das CIM in das verwendete Netzberechnungsprogramm zu importieren. Es wurden Betriebsmittel wie Transformator, Schalter, Verbraucherlasten wie Wallboxen oder Wärmepumpen importiert.

Die Betreuung der Maßnahmen erfolgte u.a. durch nachgelagerte Fachabteilungen des Verteilnetzbetreibers (VSE) im IKT-System.

Alle im Datenraum/Marktplatz verfügbaren digitalen Zwillinge werden nach Aktualisierungen einem Funktionstest unterzogen. Hierbei werden die Einträge/Daten in den AAS-Dateien der digitalen Zwillinge in einem Testlauf über den Marktplatz/Datenraum in Zusammenarbeit mit der VSE in einer PowerFactory-Testumgebung übertragen und auf ihre Funktionalität geprüft.

Die Ontologien sind Bestandteil des gesamten Marktplatzframeworks. Somit ist es diesbezüglich ein interoperabler Datenknoten für andere Softwaresysteme. Zusätzlich erlaubt es aber auch eine einfach natürlichsprachliche Verbalisierung der Marktplatzangebote, die dem Endnutzer als Graph zur

Verfügung gestellt wird:

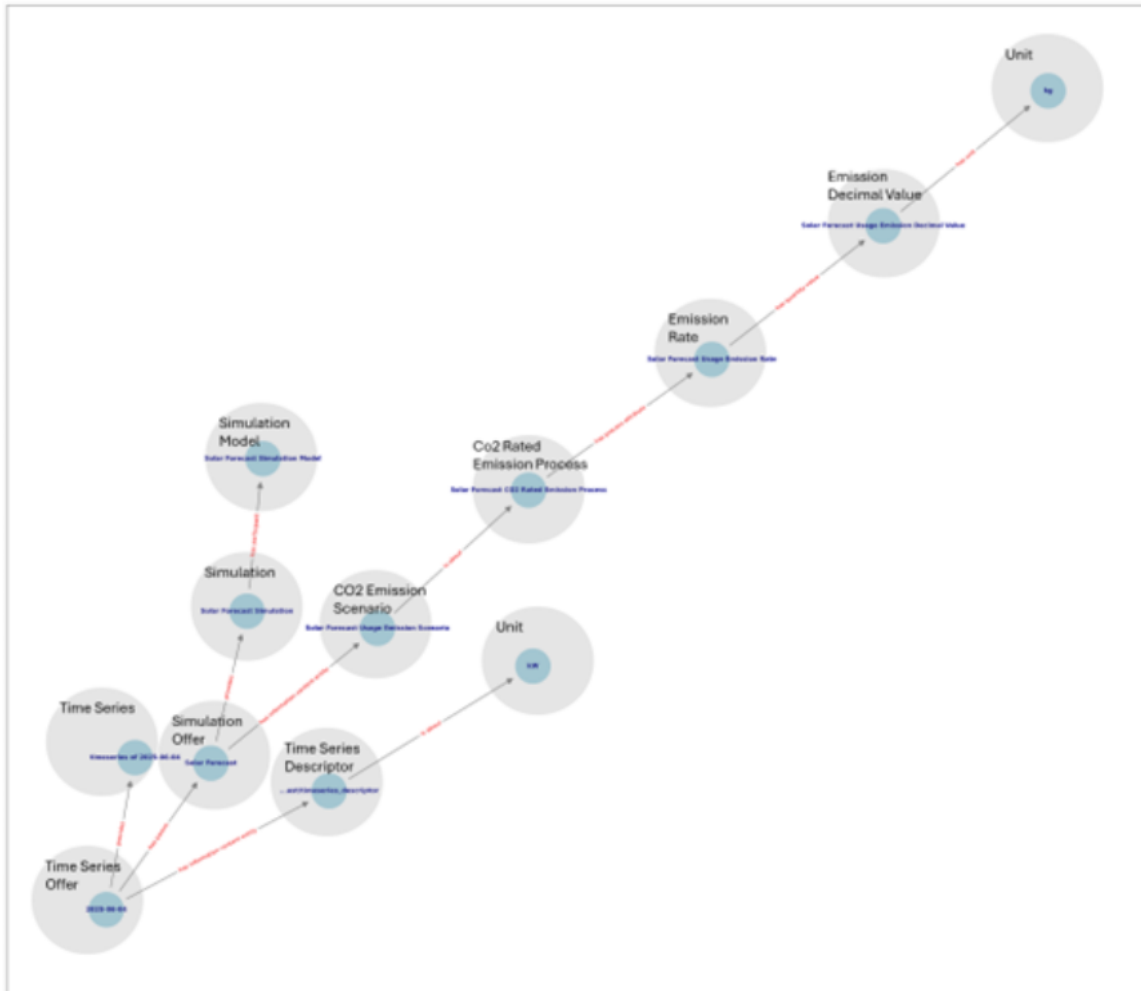


Abbildung 81: Ontologie als interoperabler Datenknoten für andere Softwaresysteme

Das Marktplatzframework stellt modular die notwendigen Algorithmen eines Marktplatzes bereit und fungiert als zentraler interoperabler Knotenpunkt. Dies umfasst sowohl den automatisierten Datenaustausch als auch Bewertungen und Suchfunktionen. Es wurde eine zentrale Nutzer- und Anbieterverwaltung integriert, um auf dem Marktplatz verschiedene Angebote bereitzustellen. Die entwickelten Verfahren sind fester Bestandteil des Marktplatzframeworks. Dieses Marktplatzframework ermöglicht die automatisierte Auswahl und Bereitstellung dieser für einzelne Anwendungsfälle anhand des abgeleiteten Wissens aus den ontologischen Beschreibungen. Das Framework ist damit sehr effizient bei der Bereitstellung von Daten und Analysen.

Output

Die Erprobung des idFlexNetz Marktplatzes basierend auf Datenraumtechnologien hat folgende Ergebnisse bestätigt bzw. geliefert:

Die im Rahmen des Arbeitsschritts 5 durchgeführte Erprobung bestätigt die prototypische Umsetzung eines IKT-Ökosystems für Energiedatenräume unter Berücksichtigung der Gaia-X-Prinzipien sowie des IDS-Referenzarchitekturmodells (IDS-RAM Version 4). Die Architektur erfüllt die Anforderungen an

Datensouveränität, die Nutzung offener Standards, semantische Interoperabilität sowie Identitäts- und Vertrauensmechanismen.

Als technische Basis wurden die Eclipse Dataspace Components (EDC) eingesetzt und um spezifische Erweiterungen ergänzt. Diese Konnektoren ermöglichen den sicheren und kontrollierten Datenaustausch zwischen Datenanbietern und -nutzern. Sie integrieren Policy-Management-Funktionen und unterstützen die Verarbeitung heterogener Datenquellen, darunter digitale Zwillinge, Prognosedaten und Messwertzeitreihen.

Digitale Zwillinge wurden auf Basis der Asset Administration Shell (AAS) bereitgestellt und in die Netzberechnungsumgebung PowerFactory integriert. Die Austauschformate basieren auf JSON-LD und dem Common Information Model (CIM), ergänzt durch semantische Identifikatoren und IDTA-Templates. Damit konnte eine interoperable Verbindung zwischen den physischen Anlagen und den datenraumbezogenen Anwendungen hergestellt werden.

Zur Sicherstellung von Identität und Vertrauen wurde eine European Business Wallet (EUBW) implementiert, die auf Self-Sovereign Identity (SSI) und eIDAS 2.0-konformen Mechanismen basiert. Die Integration von W3C-konformen Decentralized Identifiers (DID) und Verifiable Credentials (VC) ermöglicht eine durchgängige Authentifizierung und Autorisierung. Die Echtzeitprüfung von Revocation Lists sowie die Einbindung in die Policy-Engine des EDC gewährleisten, dass ausschließlich verifizierte Teilnehmer Zugriff auf Daten und Dienste erhalten.

Die semantische Interoperabilität wurde durch den Einsatz der Open Energy Ontology (OEO) und JSON-LD sichergestellt. Netzmodelle wurden zusätzlich über CIM/CGMES eingebunden. Die ontologiebasierte Beschreibung ermöglicht eine konsistente Annotation von Messwerten, Prognosen und digitalen Zwillingen. Darüber hinaus wurde ein Marktplatz-Katalog auf Basis einer Neo4j-Graphdatenbank entwickelt, der die semantische Auffindbarkeit und Vermittlung von Datenressourcen gemäß den FAIR-Prinzipien unterstützt.

Die Ende-zu-Ende-Datenflüsse für Messwertzeitreihen und Prognosen wurden erfolgreich getestet. Die Datenübertragung der semantisch mit OEO-Kontexten annotierten Daten erfolgt über EDC-Konnektoren. Die Daten werden in PowerFactory ohne Schemafehler importiert. Damit konnte die technische Machbarkeit einer interoperablen Datenintegration demonstriert werden.

Zur Absicherung der Infrastruktur wurde eine Secure-DevOps-Architektur implementiert. Diese umfasst TLS 1.3 für alle Kommunikationskanäle, gehärtete Container-Images, automatisierte Schwachstellenscans sowie eine Vault-basierte Verwaltung von Secrets. Die Policy-as-Code-Methodik ermöglicht eine versionierte und automatisierte Integration von Zugriffspolicies in die EDC-Konnektoren.

Ergänzend wurde die Ontologie um einen Reifegrad-Index für digitale Zwillinge erweitert. Dieser umfasst Merkmale wie Kontext, Datenqualität, Modellintegration und Steuerungsfähigkeit. Die Bewertungslogik ermöglicht die automatisierte Berechnung von Scoring-Werten für digitale Güter und Prognosen.

7.5 Zusammenfassung und Empfehlungen

Die Erprobung des Arbeitspakets 5 zeigt, dass die prototypische Umsetzung des IKT-Ökosystems für

Energiedatenräume erfolgreich war. Die Integration von Gaia-X und IDS-Prinzipien, die Nutzung semantischer Ontologien sowie die Implementierung von Sicherheitsmechanismen ermöglichen eine skalierbare und vertrauenswürdige Dateninfrastruktur. Empfehlungen umfassen die weitere Standardisierung der Connector-Mechanismen, die Durchführung von Skalierungstests mit großen Datenmengen und die Erweiterung des Identitäts- und Autorisierungsmanagements. Einschränkungen bestehen in fehlenden produktiven Penetrationstests und in der Notwendigkeit einer engeren Verzahnung der Industriestandards. Insgesamt bildet das Projekt eine wesentliche Grundlage für zukünftige operative Datenräume im Energiesektor.

8 Wirtschaftliche Betrachtung

8.1 Geschäftsmodelle und Wertschöpfung

Die wirtschaftliche Betrachtung des idFlexNetz-Projekts umfasst die Analyse der Geschäftsmodelle und Wertschöpfungspotenziale, die sich aus dem Energiedatenraum erschließen lassen. Ein zentrales Geschäftsmodell basiert auf der Bereitstellung von Prognosen als Service. Prognosedienstleister können ihre Prognosen über den Energiedatenraum vermarkten und dafür Vergütungen von den Netzbetreibern erhalten. Die Wertschöpfung entsteht durch die verbesserte Netzplanung und Netzführung, die durch präzise Prognosen ermöglicht werden.

Ein zweites Geschäftsmodell basiert auf der Bereitstellung digitaler Zwillinge durch Anlagenhersteller. Anlagenhersteller können digitale Zwillinge ihrer Produkte als zusätzlichen Service anbieten und dafür Lizenzgebühren oder Servicegebühren erheben. Die Wertschöpfung entsteht durch die Differenzierung der Produkte und die Erschließung neuer Erlösquellen. Digitale Zwillinge können auch als Grundlage für weitere Services wie Predictive Maintenance oder Optimierungsdienstleistungen dienen.

Ein drittes Geschäftsmodell basiert auf dem Betrieb der Datenraum-Infrastruktur. Plattformbetreiber können Gebühren für die Nutzung der Infrastruktur erheben, beispielsweise in Form von Transaktionsgebühren oder Abonnements. Die Wertschöpfung entsteht durch die Koordination des Datenaustauschs und die Bereitstellung von Mehrwertdiensten wie Suche, Qualitätsprüfung oder Abrechnung.

Die Wertschöpfung im Energiedatenraum ist durch Netzwerkeffekte gekennzeichnet. Je mehr Akteure den Datenraum nutzen, desto höher ist der Wert für jeden einzelnen Akteur. Dies schafft Anreize für eine breite Beteiligung und kann zu einem selbstverstärkenden Wachstum führen. Allerdings erfordert dies auch eine kritische Masse an Teilnehmern, die zunächst erreicht werden muss.

8.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten des Energiedatenraums hängen von verschiedenen Faktoren ab. Ein wichtiger Faktor ist die Zahlungsbereitschaft der Netzbetreiber für Prognosen und digitale Zwillinge. Studien zeigen, dass Netzbetreiber bereit sind, für hochwertige Prognosen zu zahlen, wenn diese zu einer Reduktion der Netzausbaukosten oder zu einer Verbesserung der Versorgungssicherheit führen. Die Zahlungsbereitschaft hängt von der Qualität der Prognosen und dem konkreten Nutzen ab.

Ein zweiter Faktor ist die Bereitschaft der Anlagenhersteller, digitale Zwillinge bereitzustellen. Anlagenhersteller sehen digitale Zwillinge zunehmend als strategisches Differenzierungsmerkmal und sind bereit, in deren Entwicklung zu investieren. Allerdings bestehen Bedenken hinsichtlich des Schutzes des geistigen Eigentums, die durch geeignete technische und rechtliche Maßnahmen adressiert werden müssen.

Ein dritter Faktor ist die regulatorische Unterstützung. Die Regulierung kann Anreize für die Nutzung von Datenräumen schaffen, beispielsweise durch die Verpflichtung zur Bereitstellung bestimmter Daten oder durch die Anerkennung von Investitionen in digitale Infrastrukturen bei der Netzentgeltregulierung. Die europäische Datenstrategie und Initiativen wie der Data Act schaffen einen günstigen regulatorischen Rahmen.

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten werden auch durch die Kostenstruktur beeinflusst. Die

Investitionskosten für den Aufbau eines Energiedatenraums sind erheblich und umfassen Kosten für Softwareentwicklung, Hardwareinfrastruktur und Betrieb. Diese Kosten müssen durch die generierten Erlöse gedeckt werden. Die Analyse zeigt, dass bei einer ausreichenden Anzahl von Teilnehmern ein wirtschaftlich tragfähiger Betrieb möglich ist.

8.3 Verwertungsstrategien

Die Verwertung der Projektergebnisse erfolgt auf mehreren Ebenen. Auf technischer Ebene werden die entwickelten Softwarekomponenten als Open Source veröffentlicht, um eine breite Nutzung und Weiterentwicklung zu ermöglichen. Die EDC- und AAS-Erweiterungen werden in die jeweiligen Open-Source-Projekte integriert. Dies fördert die Standardisierung und erhöht die Akzeptanz der Lösungen.

Auf kommerzieller Ebene planen die Projektpartner, die entwickelten Lösungen in ihre Produktportfolios zu integrieren. Schneider Electric plant, digitale Zwillinge als zusätzlichen Service für seine Produkte anzubieten. Das Fraunhofer IOSB-AST plant, Prognoseservices über den Energiedatenraum zu vermarkten. Die VSE plant, den Energiedatenraum für die Optimierung ihres Netzbetriebs zu nutzen und die Erfahrungen an andere Netzbetreiber weiterzugeben.

Auf strategischer Ebene wird die Gründung eines Betreiberkonsortiums für den Energiedatenraum angestrebt. Dieses Konsortium soll die Infrastruktur betreiben, Standards weiterentwickeln und neue Teilnehmer gewinnen. Die Governance-Struktur des Konsortiums soll sicherstellen, dass alle Stakeholder angemessen vertreten sind und Entscheidungen transparent getroffen werden.

Die Verwertung wird auch durch Transferaktivitäten unterstützt, die in Arbeitspaket 6 beschrieben werden. Diese umfassen die Beteiligung an Standardisierungsgremien, die Veröffentlichung wissenschaftlicher Publikationen, die Durchführung von Workshops sowie die Zusammenarbeit mit anderen Projekten und Initiativen im Bereich Datenräume.

9 AP6 – Ausblick

Das Arbeitspaket 6 des Forschungsprojekts idFlexNetz widmet sich der systematischen Übertragung, Verbreitung und Verstetigung der im Projekt erzielten Ergebnisse. Dabei fokussiert das AP auf die Sicherstellung der Allgemeingültigkeit der entwickelten Konzepte, deren technische und organisatorische Übertragbarkeit auf andere Branchen sowie die Implementierung konkreter Transfermechanismen in Forschung, Standardisierung und industrielle Praxis. Mit der Kombination aus wissenschaftlicher Validierung, Open-Source-Veröffentlichungen und enger Zusammenarbeit mit industriellen Stakeholdern bildet AP6 das Bindeglied zwischen Forschungsergebnissen und einer nachhaltigen, sektorübergreifenden Anwendung.

9.1 Herstellung der Allgemeingültigkeit der Ergebnisse

Erarbeitung einer Strategie zur Übertragung der Ergebnisse auf andere Anwendungsszenarien

Zentrales Ziel des Arbeitsschrittes 6.1.1 war die Entwicklung einer systematischen Strategie zur Übertragung der im Projekt entwickelten Konzepte rund um digitale Zwillinge, Netzmodelle und interoperable Datenräume auf andere Branchen. Der Fokus lag darauf, Anwendungsdomänen in der Energiewirtschaft und der Industrie sowie wissenschaftliche Einrichtungen zu identifizieren, die von den methodischen und technischen Bausteinen profitieren können. Hierzu wurden zunächst relevante Zielbranchen systematisch kategorisiert, darunter Netzbetreiber, Kraftwerksbetreiber, Hersteller energiebezogener Betriebsmittel, Softwareanbieter im Bereich der Prozessautomatisierung sowie wissenschaftliche Forschungseinrichtungen.

Im Rahmen der Übertragbarkeitsanalyse wurde insbesondere der Vergleich technischer Anforderungen verschiedener Sektoren durchgeführt. Dies umfasste die Untersuchung unterschiedlicher Datenmodelle, variierender Schnittstellenstandards sowie des notwendigen Grades an Echtzeitfähigkeit. Parallel dazu wurden regulatorische und sicherheitsrelevante Rahmenbedingungen bewertet, um realistische Anwendungsbedingungen zu ermitteln. Die Analyse zeigt, dass insbesondere durch modularisierte Architekturansätze, semantische Datenmodelle und standardisierte Kommunikationsschnittstellen eine strukturelle Anschlussfähigkeit in unterschiedlichen Branchen besteht.

Aus diesen Erkenntnissen wurde ein generisches Konzept für branchenübergreifende digitale Zwillinge abgeleitet. Das Konzept betont die Modularität der Architektur sowie die Konfigurierbarkeit digitaler Zwillinge für spezifische Domänen. Weiterhin thematisiert es die Standardisierung von Datenformaten und Protokollen sowie die Integration von KI-gestützten Analyseverfahren. Als Bindeglied zwischen Theorie und Praxis wurden zudem Kooperations- und Transfermechanismen definiert, die von Pilotprojekten über Austauschplattformen bis hin zu Workshops reichen. Begleitende Podcasts unterstützten den Wissenstransfer breiterer Zielgruppen.

Der Arbeitsschritt belegt, dass die im Projekt entwickelten Konzepte nicht nur technische Innovationen darstellen, sondern durch ihre modulare Ausgestaltung und Interoperabilität eine tragfähige Grundlage für eine branchenübergreifende Verwertung bilden.

Identifikation von Ansatzpunkten für Weiterentwicklungen des Netzbetriebs sowie einer Akzeptanz

Im Arbeitsschritt 6.1.2 wurden konkrete Ansatzpunkte identifiziert, die insbesondere den Netzbetrieb

betreffen und darauf abzielen, Effizienz, Automatisierungsgrad und Akzeptanz digitaler Methoden zu erhöhen.

Ein zentrales Problem ist die steigende Zahl an Netzanschlussanfragen, die in vielen Netzbetreiberorganisationen zu erheblichen Belastungen führt. Als technischer Lösungsansatz wurde die systematische Automatisierung wiederkehrender Prozesse vorgeschlagen. Dies erfolgt unter anderem durch Workflow-Automatisierung, die Implementierung von API-Gateways sowie den Einsatz von Robotic Process Automation (RPA). Solche Verfahren ermöglichen eine effiziente Bearbeitung standardisierter Anfragen und entlasten die Fachabteilungen.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der digitalen Bewertung von Betriebsmitteln. Hier wurde die Einführung digitaler Zwillinge als zentraler Baustein identifiziert. Durch digitale Abbilder kritischer Betriebsmittel – beispielsweise Transformatoren oder Schaltanlagen – lassen sich standardisierte Datenmodelle nutzen, um Zustände konsistent darzustellen. Die Kopplung mit KI-gestützten Asset-Management-Systemen ermöglicht zudem die Ableitung vorausschauender Instandhaltungsmaßnahmen. Ontologien und semantische Datenbanken ermöglichen darüber hinaus eine vergleichbare Bewertung verschiedener Betriebsmittel.

Die Integration externer Prognosen stellt einen weiteren relevanten Anwendungsfall dar. Der Aufbau automatisierter Datenpipelines und die Nutzung offener Schnittstellen ermöglichen die kontinuierliche Aktualisierung betriebsrelevanter Prognosen. Dies unterstützt den Netzbetrieb bei der dynamischen Betriebsführung, insbesondere bei hoher fluktuierender Einspeisung aus erneuerbaren Energien.

Bewertung des Marktpotenzials von Retrofitting-Werkzeugen

Die Analyse des Marktpotenzials im Rahmen des Arbeitsschritts 6.1.3 ergab, dass digitale Zwillinge zunehmend an Bedeutung gewinnen. Eine Vielzahl großer Anbieter im Energiesektor bietet bereits integrierte Plattformen mit digitalen Zwillingen an, darunter EcoStruxure, EnergyIP, Asset Suite und Twin-Hub. Gleichzeitig entstehen neue spezialisierte Plattformen, insbesondere im Bereich KI-basierter Analysen.

Auf der Nachfrageseite zeigt sich ein stark wachsender Bedarf, insbesondere bei großen Verteilnetzbetreibern. Die zunehmende Integration erneuerbarer Energien, regulatorische Anforderungen und der Druck zur Modernisierung der Netzinfrastruktur machen digitale Zwillinge zu einem strategischen Werkzeug.

Trotz der bereits bestehenden digitalen Abbildung vieler Betriebsmittel bestehen erhebliche Defizite hinsichtlich der Interoperabilität und der Vernetzung. Dies eröffnet ein großes Marktpotenzial für Retrofitting-Werkzeuge, die bestehende Anlagen mit interoperablen Datenräumen kompatibel machen. Spherity identifiziert insbesondere regulatorischen Druck, Nachrüstbedarf in der Mittel- und Niederspannung sowie steigende Anforderungen an interoperable Datenräume als maßgebliche Treiber. Das Marktpotenzial wird bis 2030 auf 400–600 Millionen Euro geschätzt.

Entwicklung einer Markteinführungsstrategie

Die Entwicklung einer Markteinführungsstrategie basiert unmittelbar auf den im Projekt nachgewiesenen Retrofitting-Fähigkeiten. Die Integration bestehender Systeme großer Anlagenhersteller in den

idFlexNetz-Datenraum konnte erfolgreich mittels standardisierter APIs demonstriert werden. Dies gilt sowohl für bestehende industrielle Plattformen wie EcoStruxure oder TwinHub als auch für Netzleit- und Planungssysteme wie PowerFactory oder NEPLAN.

Die Markteinführung erfolgt in drei Phasen:

1. Phase – Etablierung über Großanbieter:

Große Hersteller werden als initiale Knotenpunkte angebunden. Dadurch entstehen erste interoperable Ökosysteme digitaler Zwillinge.

2. Phase – Öffnung für Mittelstand und Start-ups:

Sobald eine kritische Masse erreicht ist, können KMU über offene Schnittstellen eigene Dienste bereitstellen.

3. Phase – Skalierung über europäische Ökosysteme:

Die Integration in Gaia X und die Nutzung des EUBW ermöglichen eine europaweite Verbreitung interoperabler Identitäts- und Datenraumkomponenten.

Die Fähigkeit zum Retrofitting wird zu einem strategischen Differenzierungsmerkmal für Anbieter und Anwender.

Transfer der Ergebnisse in das Gaia-X-Ökosystem

Dieser Arbeitsschritt befasst sich mit der Übertragung der im Projekt entwickelten Vertrauensmechanismen in das Gaia-X-Ökosystem. Das Projekt zeigt, dass EUBW, Policy Engines, Revocation-Mechanismen und semantische Schnittstellen vollständig mit den Gaia-X-Spezifikationen kompatibel sind.

Die Übertragung betrifft mehrere initiativenbasierte Datenräume, darunter Manufacturing X, ed X, Catena X, Chem X, Aerospace X und Scale X. Die im Projekt umgesetzten Methoden unterstützen diese Initiativen durch:

- verifizierbare Unternehmensidentitäten
- interoperable AAS-Integration
- Verknüpfung digitaler Zwillinge mit einer Ontologie
- automatisierte Zertifizierung und Verifikation

Damit liefert idFlexNetz konkrete technische Bausteine für zukünftige europäische Datenräume.

Gremienarbeit

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse wurden in verschiedenen nationalen und internationalen Gremien vorgestellt. Dies umfasst Beiträge zu ZVEI-Arbeitskreisen, E World Veranstaltungen, T&D Europe sowie die Industrial Digital Twin Association. Die diskutierten Inhalte flossen direkt in Weiterentwicklungen ein, beispielsweise im Bereich der Echtzeitfähigkeit von AAS-Implementierungen.

Veröffentlichung White Paper / Guideline

Zur weiteren Verbreitung wurde eine umfassende Präsentation erstellt, die technische Grundlagen, Use Cases und wirtschaftliche Aspekte von Energiedatenräumen vermittelt. Sie dient als

Orientierungsrahmen für Organisationen, die den Einstieg in datenraumfähige Ökosysteme erwägen.

9.2 Wissens- und Ergebnistransfer

Wissenstransfer und Wissensaustausch

Ein zentraler Baustein des Wissensaustauschs bestand in der engen Zusammenarbeit mit externen wissenschaftlichen Akteuren, insbesondere im Rahmen einer Begleitforschung mit der Universität Genf. Darüber hinaus wurden wesentliche Projektergebnisse direkt in bestehende Open-Source-Infrastrukturen überführt. Teile der im Projekt entwickelten Konzepte und Algorithmen, insbesondere zur Integration von Verwaltungsschalen (Asset Administration Shell, AAS) in Graphdatenbanken, wurden nach wissenschaftlicher Veröffentlichung vom BaSyx-Entwicklerteam übernommen und praktisch umgesetzt. Die im Projekt entwickelten Ansätze wurden dadurch nicht nur theoretisch validiert, sondern auch iterativ weiterentwickelt und in produktionsnahe Software integriert. Diese Arbeiten mündeten in mehrere begutachtete wissenschaftliche Publikationen, unter anderem auf internationalen Konferenzen, und dokumentieren die erfolgreiche Kreuzvalidierung der Projektergebnisse zwischen Forschung und praktischer Anwendung.

Übertragung der Erkenntnisse an andere Nutzer

Der Wissenstransfer an externe Zielgruppen erfolgte über ein breites Spektrum an Kommunikationsformaten. Neben wissenschaftlichen Fachveröffentlichungen und Konferenzbeiträgen wurden Präsentationen auf branchenrelevanten Veranstaltungen gehalten. Ergänzend kamen praxisorientierte Formate wie Podcasts zum Einsatz, die zentrale Ergebnisse und Anwendungsbeispiele verständlich aufbereiteten. Ein wesentlicher Bestandteil war zudem der direkte Austausch mit Netzbetreibern, Industriepartnern und Verbänden in interaktiven Formaten. Durch die aktive Mitarbeit in Normungs- und Fachgremien wurde darüber hinaus ein Beitrag zur Überführung der Projektergebnisse in Standardisierungsprozesse geleistet. Insgesamt stellte dieser multiperspektivische Transfer sicher, dass die Ergebnisse sowohl wissenschaftlich rezipiert als auch praktisch anschlussfähig wurden.

Wissenschaftliche Veröffentlichungen und Projektvorstellungen

Im Rahmen der Arbeitsschritte 6.2.2 und 6.2.3 wurden gezielt wissenschaftliche Publikationen im Bereich der Energieinformatik verfasst und auf internationalen Konferenzen präsentiert. Der Fokus lag auf semantischer Interoperabilität in Energiedatenräumen unter Nutzung domänenspezifischer Ontologien sowie auf der Implementierung des International Data Space Reference Architecture Models (IDS RAM 4). Die Arbeiten verdeutlichen, wie sich digitale Zwillinge und Messdaten interoperabel bereitstellen lassen und wie etablierte Standards wie das Common Information Model (CIM) eingebunden werden können. Die vorgestellten Fallstudien belegen das Potenzial semantischer Technologien zur Verbesserung der Effizienz, Sicherheit und Resilienz von Energiedaten-Ökosystemen und unterstreichen deren Bedeutung für die Energiewende sowie für sektorübergreifende Anwendungen.

Durchführung von Hackathons

Zur praktischen Validierung der im Projekt entwickelten Konzepte wurden gemeinsam mit Partnern mehrere Hackathons durchgeführt. Diese zielten darauf ab, Entwicklern, Forschenden und Start-ups den Einsatz der idFlexNetz-Technologien in eigenen Prototypen zu ermöglichen. Hierfür wurde eine

umfangreiche technische Sandbox bereitgestellt, bestehend aus Datenraum-Konnektoren, Wallet-Komponenten für verifizierbare Unternehmensidentitäten, einer Verifiable Data Registry sowie AAS-basierten digitalen Zwillingen. Die Teilnehmer erprobten unter anderem credentialbasierte Zugriffskontrollen, semantisch annotierte Zwillinge sowie Retrofitting-Schnittstellen für bestehende Systeme. Die Ergebnisse bestätigten die technische Reife, die Offenheit des Frameworks sowie dessen Eignung für Gaia-X-konforme, interoperable Ökosysteme.

Veröffentlichung von Open Source Code

Ein wesentlicher Beitrag zum nachhaltigen Ergebnistransfer bestand in der Veröffentlichung zentraler Projektkomponenten als Open Source. Im Mittelpunkt stand dabei das „Organizational Identity Vocabulary“ (OID), ein semantisches Vokabular zur Beschreibung verifizierbarer Organisationsidentitäten auf Basis offener Standards wie Verifiable Credentials, Decentralized Identifiers und RDF. Das Vokabular ist kompatibel mit den Gaia-X-Spezifikationen und dem Eclipse Dataspace Connector und unterstützt sektorübergreifende Erweiterungen. Durch die Veröffentlichung unter einer offenen Lizenz und die enge Kooperation mit weiteren Open-Source-Initiativen wurde eine breite Wiederverwendbarkeit der entwickelten Identitäts- und Vertrauensmodelle erreicht. Das OID-Vokabular wird bereits in mehreren Datenrauminitiativen als Referenz verwendet.

Veröffentlichungen der ökonomischen Analyse

Die Ergebnisse der ökonomischen Begleitforschung wurden in Präsentationen und Berichtsform zusammengeführt und für eine weitere wissenschaftliche Verwertung vorbereitet. Es sind Präsentationen auf energiewirtschaftlichen Fachkonferenzen (bspw. Hannover Messe Industrie 2026). Des Weiteren wird sichergestellt, dass die wirtschaftlichen Analysen über das Projektende hinaus fortgeführt werden.

Transfer in Lehre und Forschung

Die Projektergebnisse flossen umfassend in Lehre und Forschung ein. Der im Projekt entwickelte Ansatz digitaler Zwillinge wurde aus dem Industrie-4.0-Kontext systematisch auf die Energiewirtschaft übertragen und weiterentwickelt. Die erarbeiteten Konzepte zu Verwaltungsschalen, Submodellen und Standardisierung dienten als Grundlage für weitere Forschungsprojekte und wurden in Vorlesungsmaterialien integriert. Zahlreiche wissenschaftliche Publikationen begleiteten diesen Prozess und dokumentieren den Aufbau eines Gaia-X-konformen Marktplatzes für digitale Modelle und Daten. Ergänzend wurden Open-Source-Implementierungen bereitgestellt, die sowohl wissenschaftliche als auch technische Fortschritte widerspiegeln.

Transfer in das Gaia-X-Ökosystem

Die Ergebnisse des Projekts wurden in unterschiedlichen Gremien, Arbeitsgruppen und Austauschformaten vorgestellt und diskutiert. Thematisch umfasste dies Ontologien, digitale Zwillinge, Verwaltungsschalen, KI-Dienste, Graphdatenbanken sowie den Gaia-X-konformen Marktplatz für digitale Modelle. Durch Vorträge auf nationalen und internationalen Veranstaltungen wurden die Projektergebnisse einem breiten Fachpublikum zugänglich gemacht und in laufende Entwicklungen im Gaia-X-Umfeld eingebracht.

Transfer in das Projekt „energy data x“

Abschließend wurden die gewonnenen Erkenntnisse gezielt in das Folgeprojekt „energy data x“ eingebracht. Dadurch wird sichergestellt, dass die im Arbeitsschritt 6.2 entwickelten Konzepte, Methoden und Ergebnisse langfristig weiterverwendet und in neue Forschungsvorhaben integriert werden.

10 Abschließende Zusammenfassung

Das idFlexNetz-Projekt erreichte vollumfänglich seine gesetzten Ziele und leistet hiermit einen wichtigen Beitrag zur Digitalisierung der Energiewende. Es wurde ein funktionsfähiger Energiedatenraum aufgebaut, der den souveränen Austausch von Daten und digitalen Gütern zwischen verschiedenen Akteuren ermöglicht. Die entwickelten Lösungen basieren auf offenen Standards und gewährleisten Datensouveränität, Datenschutz und IT-Sicherheit.

Kernbotschaften

Erstens wurde demonstriert, dass föderale Datenraum-Architekturen auf Basis von Gaia-X und IDS im Energiesektor praktisch umsetzbar sind und einen konkreten Nutzen für Netzbetreiber, Anlagenhersteller und Dienstleister bieten. Zweitens wurde gezeigt, dass dezentrale Identitäten und digitale Zwillinge als handelbare digitale Güter etabliert werden können, deren Authentizität kryptographisch nachgewiesen wird. Drittens wurde nachgewiesen, dass die Integration bestehender Systeme in Datenräume möglich ist, aber erheblichen Aufwand erfordert und eine konsequente Standardisierung voraussetzt. Viertens wurden wirtschaftlich tragfähige Geschäftsmodelle für den Betrieb von Energiedatenräumen identifiziert, die auf Netzwerkeffekten basieren und verschiedene Erlösquellen erschließen.

Empfehlungen

Erstens sollte die Standardisierung im Bereich der Asset Administration Shell und der IDS-Protokolle konsequent fortgesetzt werden, wobei die im Projekt entwickelten Erweiterungen für Zeitreihendaten in die offiziellen Standards integriert werden sollten. Zweitens sollten Regulierungsbehörden Anreize für die Nutzung von Datenräumen schaffen und regulatorische Hürden abbauen. Drittens sollte die öffentliche Förderung von Pilotprojekten fortgesetzt werden, mit Fokus auf Skalierung und Transfer. Viertens sollten geeignete Governance-Strukturen für den Betrieb von Energiedatenräumen entwickelt werden, die eine faire Beteiligung aller Stakeholder sicherstellen. Fünftens sollten Ausbildungsprogramme im Bereich Datenräume und Energieinformatik aufgebaut werden. Sechstens sollte die internationale Zusammenarbeit intensiviert werden, um einen europäischen Energiedatenraum zu schaffen.

Einschränkungen

Die Projektergebnisse unterliegen bestimmten Einschränkungen. Die Erprobung erfolgte in einem begrenzten regionalen Kontext mit einer überschaubaren Anzahl an Teilnehmern. Die Übertragbarkeit auf größere Skalen muss noch nachgewiesen werden. Die Performance des Systems ist für viele Anwendungsfälle ausreichend, jedoch nicht für Anwendungen mit sehr hohen Echtzeitanforderungen. Die Integration bestehender Systeme erfordert erheblichen Aufwand, und die Heterogenität der Systeme im Energiesektor stellt eine Herausforderung dar. Die wirtschaftliche Tragfähigkeit hängt vom Erreichen einer kritischen Teilnehmerzahl ab, was Zeit und zusätzliche Investitionen erfordert. Die regulatorischen Rahmenbedingungen wandeln sich, und künftige Änderungen können Anpassungen an die Lösungen erfordern.

11 Glossar

AAS: Siehe Asset Administration Shell.

Asset Administration Shell (AAS): Standardisiertes Informationsmodell für digitale Zwillinge, entwickelt von der Industrial Digital Twin Association. Ermöglicht die strukturierte Beschreibung von Assets mithilfe verschiedener Submodelle.

BaSyx: Open-Source-Software für die Implementierung von Asset Administration Shell-Umgebungen. Bietet RESTful APIs für den Zugriff auf digitale Zwillinge.

Blockchain: Distributed Ledger Technology, die eine dezentrale, manipulationssichere Speicherung von Transaktionen ermöglicht. Die Distributed Ledger Technology wird im Projekt zur Verwaltung dezentraler Identitäten eingesetzt.

Broker-Service: Zentraler oder dezentraler Service in einem Datenraum, der die Suche nach verfügbaren Datenquellen und digitalen Gütern ermöglicht.

Cyber-Physical System: Siehe Cyber-physisches System.

Cyber-physisches System: Ein Cyber-physisches System, engl. „cyber-physical system“ (CPS), bezeichnet den Verbund informatischer, softwaretechnischer Komponenten mit mechanischen und elektronischen Teilen, die über eine Dateninfrastruktur, wie z. B. das Internet, kommunizieren. Ein Cyber-physisches System ist durch seinen hohen Grad an Komplexität gekennzeichnet.

Data Act: Europäische Verordnung zur Regelung des Datenzugangs und der Datennutzung. Schafft Rahmenbedingungen für Datenräume.

Datensouveränität: Prinzip, wonach Datenbereitsteller die Kontrolle über ihre Daten behalten und selbst entscheiden können, wem sie welche Daten zu welchen Bedingungen zur Verfügung stellen.

Decentralized Identifier (DID): Standard des W3C für dezentrale Identifikatoren, die ohne zentrale Autorität erstellt und verwaltet werden können.

Dezentrale Identität: Siehe Decentralized Identifier.

DID: Siehe Decentralized Identifier.

Digitaler Zwilling: Digitale Repräsentation eines physischen Assets, die dessen Eigenschaften, Zustand und Verhalten abbildet.

Distributed Ledger Technology (DLT): Technologie für dezentrale, verteilte Datenbanken. Umfasst Blockchain und andere Ansätze

DLT: Siehe Distributed Ledger Technology.

Eclipse Dataspace Components (EDC): Open-Source-Implementierung der IDS-Referenzarchitektur,

entwickelt von der Eclipse Foundation.

EDC: Siehe Eclipse Dataspace Components.

Energiedatenraum: Datenraum für den Austausch energiebezogener Daten und digitaler Güter zwischen verschiedenen Akteuren im Energiesektor.

Energiemanagementsystem (EMS): System zur Überwachung, Steuerung und Optimierung von Energieflüssen in Gebäuden, Anlagen oder Netzen.

Föderale Architektur: Architekturprinzip, bei dem verschiedene autonome Systeme miteinander interagieren, ohne dass eine zentrale Kontrollinstanz erforderlich ist.

Gaia-X: Europäische Initiative für den Aufbau einer souveränen Dateninfrastruktur. Definiert Architekturkonzepte und Anforderungen für Datenräume.

IDS: Siehe International Data Spaces.

IDSA: Siehe International Data Spaces Association.

IDTA: Siehe Industrial Digital Twin Association.

IKT-Ökosystem: Informations- und Kommunikationstechnologie-Ökosystem, das verschiedene Akteure, Systeme und Services umfasst.

Industrial Digital Twin Association (IDTA): Organisation zur Standardisierung digitaler Zwillinge in der Industrie. Entwickelt und pflegt den AAS-Standard.

International Data Spaces (IDS): Referenzarchitektur für souveräne Datenräume, entwickelt von der International Data Spaces Association.

International Data Spaces Association (IDSA): Die IDSA ist ein gemeinnütziger Verband mit mehr als 140 Mitgliedern, der nach deutschem Recht eingetragen ist. Es schafft Standards für den Datenaustausch in Datenräumen, die den Teilnehmern die volle Kontrolle über ihre Daten ermöglichen.

Konnektor: Softwarekomponente, die als Schnittstelle zwischen lokalen Systemen und einem Datenraum dient. Implementiert Funktionen für Authentifizierung, Autorisierung und die Policy-Durchsetzung.

Netzwerkeffekt: Phänomen, bei dem der Wert eines Produkts oder einer Plattform mit der Anzahl der Nutzer steigt.

Plattformökonomie: Wirtschaftsmodell, bei dem Plattformen verschiedene Nutzergruppen zusammenbringen und deren Interaktionen ermöglichen.

Policy: Regel, die definiert, unter welchen Bedingungen Daten genutzt werden dürfen. Die Bedingungen umfassen Aspekte wie Zweckbindung, zeitliche Beschränkungen und Nutzergruppen.

PROPHET: Energiemanagement- und Energiedatenmanagement-Software des Fraunhofer IOSB-AST.

PV-Anlage: Photovoltaikanlage zur Erzeugung elektrischer Energie aus Sonnenlicht.

RESTful API: Programmierschnittstelle, die auf den Prinzipien von REST (Representational State Transfer) basiert. Ermöglicht standardisierte Kommunikation zwischen Systemen.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition): System zur Überwachung und Steuerung technischer Prozesse, häufig in der Energieversorgung eingesetzt.

Submodell: Komponente einer Asset Administration Shell, die einen bestimmten Aspekt eines Assets beschreibt, beispielsweise technische Daten oder Betriebsdaten.

Teilmodell: Siehe Submodell.

TLS (Transport Layer Security): kryptographisches Protokoll zur sicheren Kommunikation über Netzwerke. Nachfolger von SSL.

Usage Control: Mechanismus zur Durchsetzung von Nutzungsbedingungen für Daten. Stellt sicher, dass Daten nur gemäß den definierten Policies verwendet werden.

Verifiable Credential: Digitaler Nachweis, der bestimmte Eigenschaften eines Identitätsinhabers bestätigt. Verifiable Credentials lassen sich ohne Rückfrage bei der ausstellenden Instanz kryptographisch verifizieren.

Verteilnetzbetreiber: Unternehmen, das für den Betrieb und die Instandhaltung von Stromverteilnetzen verantwortlich ist.

Verwaltungsschale: Siehe Asset Administration Shell.

Zeitreihendaten: Daten, die zeitlich geordnete Messwerte oder Prognosen enthalten. Im Energiesektor beispielsweise Einspeise- oder Verbrauchswerte.

Literaturverzeichnis

- [1] N. Maisch, „Wie bringt man Semantik auf eine Website? Eine Einführung in JSON-LD, RDFa und Microdata,“ July 2021. [Online]. Available: <https://www.tecislava.com/blog/json-ld>.
- [2] J. Landwehr, „Was bedeutet Ontologie in der Informatik?“ May 2019. [Online]. Available: <https://it-talents.de/it-wissen/ontologie-in-der-informatik/>.
- [3] T. C. Jepson, „Just What Is an Ontology, Anyway?,“ 2009. [Online]. Available: https://protegewiki.stanford.edu/images/b/b1/Solution_paper.pdf.
- [4] M. Booshehri, L. Emele, S. Flügel, H. Förster, J. Frey, U. Frey, M. Glauer, J. Hastings, C. Hofmann, C. Hoyer-Klick und others, „Introducing the Open Energy Ontology: Enhancing data interpretation and interfacing in energy systems analysis,“ *Energy and AI*, Bd. 5, p. 100074, 2021.
- [5] N. Maisch, „Was ist eigentlich eine Ontologie? Eine Erklärung,“ July 2021. [Online]. Available: <https://www.tecislava.com/blog/ontology>.
- [6] semantisches-web.net, „Resource Description Framework (RDF) | semantisches web // semantic web // web 3.0,“ [Online]. Available: <https://semantisches-web.net/technologien/resource-description-framework-rdf/>.
- [7] M. Jastram, „Was ist eine Ontologie? Und brauche ich eine?,“ November 2020. [Online]. Available: <https://www.se-trends.de/ontologie/>.
- [8] semantisches-web.net, „Ontology Web Language (OWL),“ [Online]. Available: <https://semantisches-web.net/technologien/ontology-web-language-owl/>.
- [9] A. Hogan, *The Web of data*, Springer, 2020.
- [10] protege.stanford.edu, „A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems,“ [Online]. Available: <https://protege.stanford.edu/>.
- [11] BFO-Ontology, „GitHub - BFO-ontology/BFO: BFO repository including source code and latest documents,“ [Online]. Available: <https://github.com/bfo-ontology/BFO>.
- [12] openenergy-platform.org, „Open Energy Ontology,“ [Online]. Available: <https://openenergy-platform.org/ontology/>.
- [13] CIMug-org, „IEC-CIM-Ontology,“ [Online]. Available: <https://github.com/CIMug-org/IEC-CIM-Ontology>.
- [14] cim.puffinsemantics, „CIM viewer,“ [Online]. Available: <http://cim.puffinsemantics.com/#>.
- [15] saref.etsi.org, „SAREF4ENER: an extension of SAREF for the energy domain created in collaboration with Energy@Home and EEBus associations,“ [Online]. Available: <https://saref.etsi.org/saref4ener/v1.1.2/>.
- [16] rwth-aachen.de, „ACS / Public / Ontology / SARGON · GitLab (rwth-aachen.de),“ [Online]. Available: <https://git.rwth-aachen.de/acs/public/ontology/sargon>.
- [17] M. Haghgoo, I. Sychev und F. Fitzek, „SARGON – Smart energy domain ontology,“ *IET Smart Cities*, 2020.
- [18] L. Yehong et al., „An EM-KPI Ontology for Enhancing Energy Management at District and Building Levels,“ [Online]. Available: <http://energy.linkeddata.es/em-kpi/ontology/index-en.html>.

- [19] ERO, „Energy Resource Ontology (ERO),“ [Online]. Available: <https://www.auto.tuwien.ac.at/downloads/thinkhome/ontology/EnergyResourceOntology.owl>.
- [20] w3c, „Semantic Sensor Network Ontology,“ [Online]. Available: <https://w3c.github.io/sdw/ssn/>.
- [21] OpenADR, „OpenADR Alliance,“ [Online]. Available: <https://www.openadr.org/>.
- [22] OpenADR, „OpenADR ontology,“ [Online]. Available: <https://albaizq.github.io/OpenADRontology/OnToology/ontology/openADRontology.owl/documentation/index-en.html>.
- [23] OpenADR, „OpenADR: Using OpenADR for DER,“ [Online]. Available: https://www.openadr.org/assets/docs/openadr_der_factsheet_pdfx4.pdf.
- [24] F. L. E. C. Javier Cuenca, „A Unified Semantic Ontology for Energy Management Applications,“ *WSP/WOMoCoE@ ISWC*, pp. 86-97, 2017.
- [25] T. G. e. a. Stavropoulos, „BOnSAI: a smart building ontology for ambient intelligence,“ *Proceedings of the 2nd international conference on web intelligence, mining and semantics*, pp. 1-12, 2012.
- [26] C. Reinisch, M. J. Kofler und W. Kastner, „ThinkHome: A Smart Home as Digital Ecosystem,“ *4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies*, pp. 256-261, 2010.
- [27] S. Gillani et al., „A Generic Ontology for Prosumer-Oriented Smart Grid,“ *EDBT/ICDT Workshops*, pp. 134-139, 2014.
- [28] N. L. Novère und D. Waltemath, „Mathematical Modelling Ontology Wiki,“ [Online]. Available: <https://sourceforge.net/p/mamo-ontology/wiki/Home/>.
- [29] J.-F. Uhlenkamp et al., „Digital twins: A maturity model for their classification and evaluation,“ *IEEE Access* 10, pp. 69605-69635, 2022.
- [30] B. Meisam et al., „Introducing the Open Energy Ontology: Enhancing data interpretation and interfacing in energy systems analysis,“ *Energy and AI*, Bd. 5, 2021.