

Kurzbericht zum Projektverbund

„National 5G Energy Hub“

Projektpartner: TU Dresden / RWTH Aachen



Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. J Seifert (TUD) /

Prof. Dr.-Ing. D. Müller (RWTH Aachen)

Bearbeiter-TUD: Dr.-Ing. M. Knorr / Dipl.-Ing. M. Altenburger /

Dipl.-Ing. S. Hohenthal / Dr.-Ing. L. Haupt

Bearbeiter-RWTH Aachen: apl. Prof. Dr.-Ing. R. Streblow / S. Blechmann, M. Sc. /

J. Du, M. Sc. / J. Odeyemi, M. Sc.

Dipl.-Ing. B. Schäfer / C. Emehel, M. Sc. /

R. Hamila, M. Sc. / L. Roth, M. Sc.

Dresden / Aachen, 08.03.2026



Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 03EN4066B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

**Copyright-Hinweis**

Dieser Bericht steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).

Inhalt

1	Projektverbund	1
2	Vorstellung der Satellitenprojekte	4
2.1	Satellitenprojekt Skamo	4
2.1.1	Projektsteckbrief	4
2.1.2	Use Case	4
2.1.3	Ergebnisse	5
2.1.4	Ausblick	6
2.2	Satellitenprojekt Booster	7
2.2.1	Projektsteckbrief	7
2.2.2	Use Case	7
2.2.3	Ergebnisse	8
2.2.4	Ausblick	9
2.3	Satellitenprojekt E3	10
2.3.1	Projektsteckbrief	10
2.3.2	Use Case	10
2.3.3	Ergebnisse	11
2.3.4	Ausblick	13
2.4	Satellitenprojekt TWE Flex	15
2.4.1	Projektsteckbrief	15
2.4.2	Use Case	15
2.4.3	Ergebnisse	16
2.4.4	Ausblick	18
2.5	Satellitenprojekt DymoBat	20
2.5.1	Projektsteckbrief	20
2.5.2	Use Case	20
2.5.3	Ergebnisse	21
2.5.4	Ausblick	22
2.6	Satellitenprojekt DIGIHAST	24
2.6.1	Projektsteckbrief	24
2.6.2	Use Case	24
2.6.3	Ergebnisse	25
2.6.4	Ausblick	27
2.7	Satellitenprojekt DIGiHeat	29
2.7.1	Projektsteckbrief	29
2.7.2	Use Case	29



2.7.3	Ergebnisse.....	30
2.7.4	Ausblick.....	32
2.8	Satellitenprojekt Loct4AR.....	33
2.8.1	Projektsteckbrief	33
2.8.2	Use Case.....	33
2.8.3	Ergebnisse.....	34
2.8.4	Ausblick.....	37
2.9	Satellitenprojekt Strom.....	39
2.9.1	Projektsteckbrief	39
2.9.2	Use Case.....	39
2.9.3	Ergebnisse.....	40
2.9.4	Ausblick.....	41
3	Zusammenfassung und Entwicklungspfade	43

1 Projektverbund

Die Transformation des Energiesystems von zentralen zu dezentralen Strukturen ist eine der größten Herausforderungen der Energiewende. Diese Entwicklung erfordert innovative digitale Lösungen, die eine effiziente Integration und Steuerung verschiedener energietechnischer Komponenten ermöglichen. Mit dem National 5G Energy Hub (N5GEH) wurde ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördertes Forschungsprojekt ins Leben gerufen, das genau hier ansetzt.

Projektrahmen und Zielsetzung

Das N5GEH-Projekt verfolgt das Ziel, eine umfassende digitale Infrastruktur für energietechnische Anwendungen zu entwickeln. Im Mittelpunkt steht dabei eine Open-Source-Plattform, die moderne Kommunikationstechnologien nutzt, um Sensoren und Aktoren in Energiesystemen zu vernetzen und darauf aufbauend intelligente Dienste zu ermöglichen. Die entwickelte softwaretechnische Struktur umfasst alle wesentlichen Elemente der Datenerfassung, -übertragung, -speicherung und -visualisierung. Dabei wurde besonderer Wert auf eine skalierbare Architektur gelegt, die auch komplexe Anwendungsszenarien bewältigen kann und flexibel erweitert werden kann, um den vielfältigen Anforderungen der Energietechnik gerecht zu werden.

Projektverbund und Zusammenarbeit

Das N5GEH-Projekt bildet den Kern eines thematischen Verbundes eines Serviceprojektes mit mehreren "Satellitenprojekten". Diese eigenständigen Projekte nutzen die im Serviceprojekt entwickelte gemeinsame Plattform für spezifische Anwendungsfälle in verschiedenen Bereichen der Energietechnik. Das Serviceprojekt stellt dabei Referenzimplementierungen bereit, die von Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen angepasst und genutzt werden können.

Durch diese Struktur wird ein wertvoller Wissenstransfer ermöglicht: Erfolgreiche Lösungsansätze aus den Satellitenprojekten können in die Kernplattform zurückfließen und stehen damit allen Nutzenden zur Verfügung. Diese modulare Entwicklung stärkt die Effizienz des gesamten Verbundes und ermöglicht eine breite Abdeckung unterschiedlicher Anwendungsfälle.

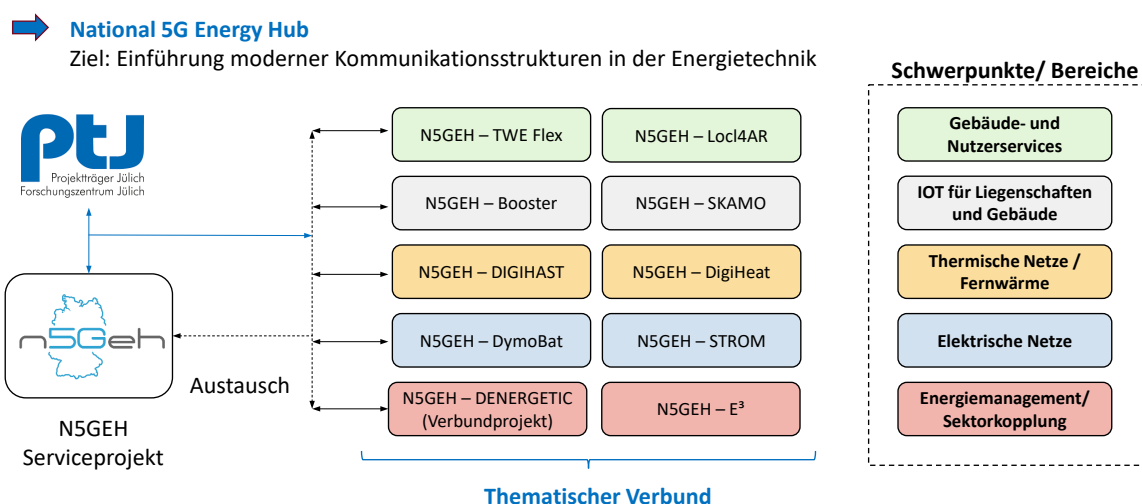


Abb. 1.1: Struktur des N5GEH-Projektverbundes

Die technische Basis: FIWARE-Framework

Die N5GEH-Plattform basiert auf dem FIWARE-Framework, einer europäischen Initiative zur Entwicklung offener und standardisierter Komponenten für Smart-City-Anwendungen und IoT-Lösungen.

Durch die Nutzung dieses etablierten Frameworks profitiert das Projekt von einer aktiven Entwicklergemeinschaft und einer Vielzahl wiederverwendbarer Komponenten. Die Architektur der Plattform folgt einem modularen Ebenenmodell:

1. **Feldebene:** Hier werden Sensoren und Aktoren über verschiedene Protokolle angebunden. Optional können Smart-Edge-Geräte als Gateways zur Plattform dienen und lokale Datenverarbeitung übernehmen.
2. **Middleware/ Plattformkern:** Der Kontext-Broker als zentrales Element koordiniert den Datenfluss zwischen allen Komponenten. Die Datenhaltung erfolgt mit spezialisierten Datenbanken für Zustandsdaten (MongoDB) und Zeitreihendaten (CrateDB).
3. **Anwendungsebene:** Hier werden spezifische Services und Benutzerschnittstellen bereitgestellt.

Die gesamte Infrastruktur ist containerisiert und kann mittels Orchestrierungssystemen wie Kubernetes oder Docker Swarm Mode flexibel skaliert werden.

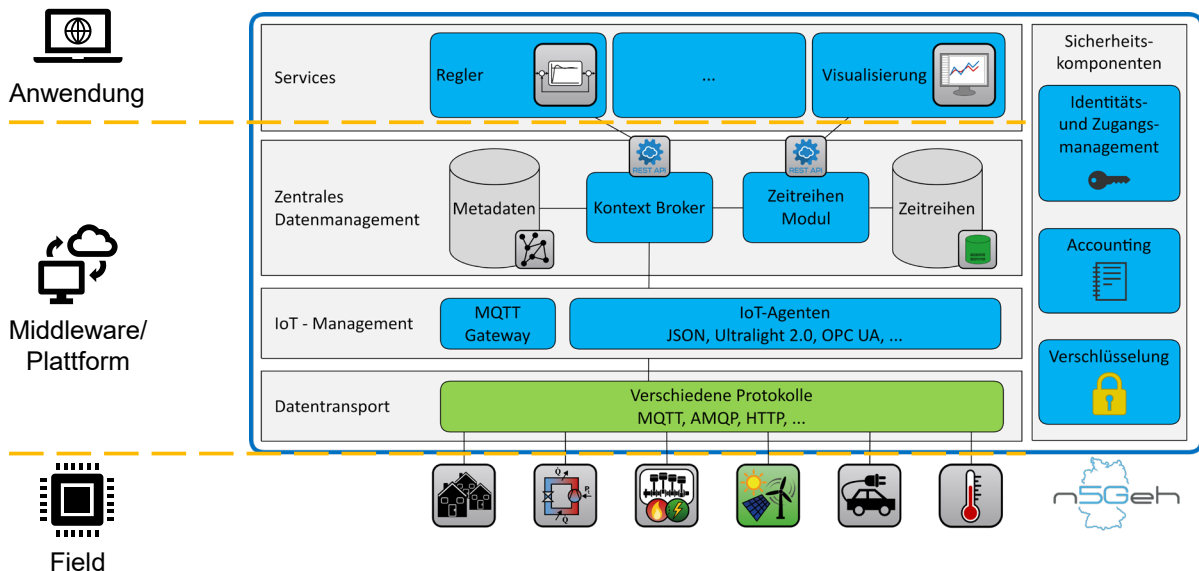


Abb. 1.2: Ebenenmodell der N5GEH-Cloudplattform

Benutzerfreundliche Werkzeuge

Um die Komplexität der Plattform für unterschiedliche Nutzergruppen zu reduzieren, wurden spezielle Werkzeuge entwickelt.

ENTIRETY: Vereinfachte Geräteverwaltung

Die Webapplikation ENTIRETY (sEmanNTIc pRovisioning and govErning IoT devices in smart energy domain) bietet eine intuitive Benutzeroberfläche zur Verwaltung von IoT-Geräten. Mit ENTIRETY können auch Anwender ohne tiefgehende IT-Kenntnisse neue Geräte in die Plattform integrieren und verwalten. Die Anwendung generiert automatisch passende Formulare für verschiedene Gerätetypen und übersetzt die Eingaben in die komplexen Datenstrukturen der FIWARE-Plattform.

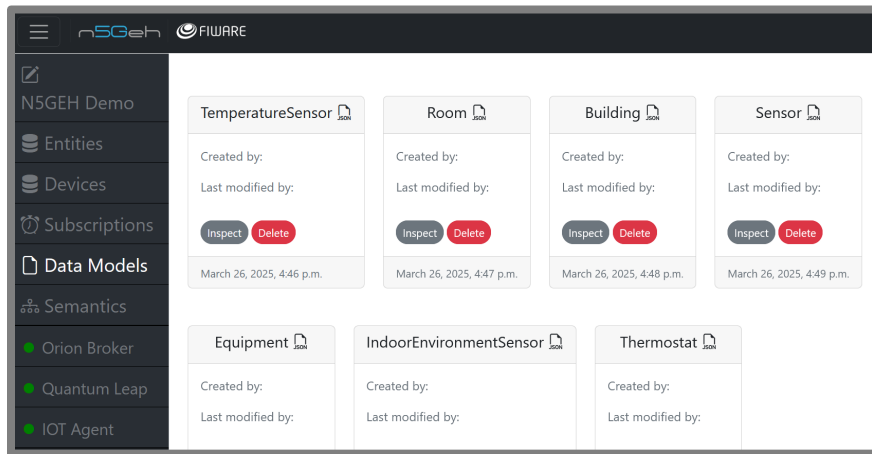


Abb. 1.3: Grafische Benutzeroberfläche Entirety für FIWARE

FiLiP: Entwicklerbibliothek für Python

Die FIWARE Library for Python (FiLiP) erleichtert Entwicklern die Programmierung von Anwendungen für die N5GEH-Plattform. Als spezialisiertes Software Development Kit (SDK) abstrahiert sie die Komplexität der FIWARE-APIs und bietet eine intuitive, objektorientierte Programmierschnittstelle. FiLiP implementiert robuste Mechanismen zur Datenvalidierung und -transformation und reduziert so den Entwicklungsaufwand erheblich.

Vorteile des N5GEH-Ansatzes

Die N5GEH-Plattform bietet mehrere wesentliche Vorteile:

- **Open Source:** Alle Komponenten basieren auf frei verfügbarer Software, was die Einstiegshürden senkt und die Nachhaltigkeit der Lösungen sichert.
- **Standardisierung:** Durch die Verwendung etablierter Standards wird die Interoperabilität mit bestehenden Systemen gewährleistet.
- **Modularität:** Der "Baukasten"-Ansatz ermöglicht flexible Anpassungen an spezifische Anforderungen.
- **Skalierbarkeit:** Die containerbasierte Architektur erlaubt ein problemloses Wachstum mit steigenden Anforderungen.
- **Sicherheit:** Ein umfassendes Sicherheitskonzept schützt sensible Daten und Systeme.

2 Vorstellung der Satellitenprojekte

2.1 Satellitenprojekt Skamo

2.1.1 Projektsteckbrief

Name des Teilprojektes:	SKAMO – Skalierbares Anlagenmonitoring in großen Liegenschaften
Laufzeit:	01.04.2022 – 31.07.2025
Förderkennzeichen:	03EN1060A-D
Beteiligte Organisationen:	Flughafen München GmbH, Volue Energy GmbH, WEPTECH elektronik GmbH, Fraunhofer-Institut für integrierte Schaltungen IIS
Kontaktperson	Dr.-Ing. Andreas Wilde / andreas.wilde@ea-energie.de
Branche:	IoT für Liegenschaften und Gebäude
Anforderungen an die Datenübertragung:	• Datenübertragung: Abtastrate abhängig von Datenpunkt variabel im Bereich von 1/15s bis 1/1Tag, typisch 1/900s – 1/1h. • Datenmenge: ca. 287.000 Datenpunkte
Schwerpunkte / Schlagworte:	Automatische Konfiguration von Effizienzanalysen / Automatische Integration bei Nachrüstung von Sensoren, semantische Technologien, Wissensgraphen, mioty

2.1.2 Use Case

Im Betrieb von Gebäuden werden durch kleine, unbemerkte Havarien, fehlerhafte Betriebsstrategien wie falsche Betriebszeiten oder ungünstige Parametrierungen im Durchschnitt ca. 10-30% der eingesetzten Energie verschwendet. Die Behebung der Fehler ist im Allgemeinen sehr billig und es existieren auch erprobte Verfahren zur automatischen Detektion und Diagnose solcher Fehler. Diese Verfahren sind jedoch kaum verbreitet, weil einerseits die Einrichtung der automatischen Verfahren seinerseits aufwändig ist und andererseits häufig für Energieeffizienz-Analyse zusätzliche Messungen gebraucht werden, die für die normale Steuerung der Anlage nicht notwendig sind. Die Nachrüstung stellt im Allgemeinen auch einen erheblichen Kostenpunkt dar.

Das Projekt N5GEH-Skamo hat das Ziel, die Kosten sowohl für die Einrichtung von automatischen, kontinuierlich laufenden Effizienzanalysen als auch die Nachrüstung von Messpunkten drastisch zu reduzieren. Zu diesem Zweck sollte ein sogenanntes Metadaten-Management-System aufgebaut werden, das einerseits generische Analysefunktionen automatisch mit den benötigten Daten versorgen kann und andererseits neue Sensoren automatisiert in das System integrieren kann.

Das neue System selbst stellt keine besonderen Anforderungen hinsichtlich Rechenzeit und Verfügbarkeit, weil der laufende Betrieb durch dann fertig konfigurierte Funktionsblöcke kontrolliert wird. Das System sollte im Projekt für eine kleine Anzahl von Demonstrationsgebäuden implementiert werden, jedoch so aufgebaut sein, dass die Anwendung auch auf eine große Zahl von Gebäude wie z.B. den gesamten Flughafen München möglich ist.

Am Flughafen München existiert eine große Zahl von Gebäuden, die u.a. durch ein Nahwärme- und Nahkältenetz versorgt werden. Die Netze werden ihrerseits durch zentrale Erzeuger versorgt, die ihrerseits Energie aus den öffentlichen Netzen für Strom und Gas beziehen können. Zu Beginn des Projektes war bekannt, dass zahlreiche Probleme zu Energieverschwendung führen, dazu zählen u.a. Betriebsfehler in Lüftungsanlagen (unangepasste Laufzeiten, kleine Havarien, Schwingungen in den Anlagenregelungen. Andererseits wird an vielen Stellen nicht nach Bedarf gesteuert, z.B. werden die

Vorlauftemperaturen des Kältenetzes nicht an den Bedarf angepasst. Am gesamten Flughafen München existieren ca. 250.000 Datenpunkte, die sich durch Neu-, Um- und Rückbauten ständig ändern. Für eine solche Installation permanent automatische Effizienzanalysesystem manuell zu implementieren und zu warten, ist wirtschaftlich nicht zielführend.



Abb. 2.1: Flughafen München

2.1.3 Ergebnisse

Das Projekt SKAMO zielte auf die Verbesserung des Energiemanagements in komplexen Anlagen, insbesondere Flughäfen, basierend auf der Entwicklung skalierbarer digitaler Services. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen.

IT-Infrastruktur und -Elemente

- Mioty-Sensorik: Es wurde eine Funkbasierte Sensorik eingesetzt, um die Installationskosten für Sensorik-Erweiterungen zu senken.
- N5GEH Plattform: Es wurde die Linked-Data Variante der FIWARE bzw. N5GEH Plattform genutzt. Diese Plattform diente als Basis für die Entwicklung der digitalen Services.

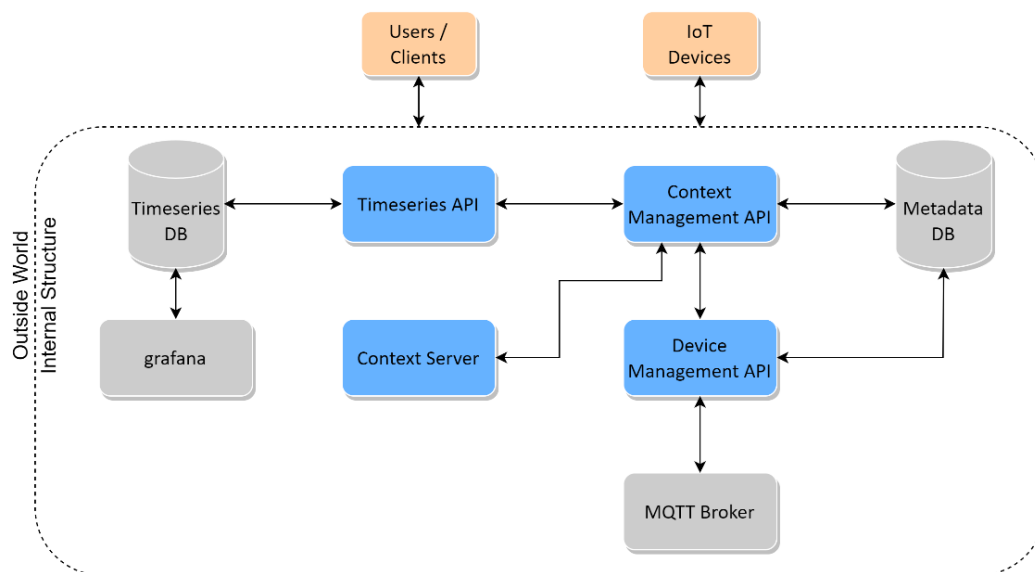


Abb. 2.2: IT-Infrastruktur basierend auf N5GEH/FIWARE Stack

Gelöste Probleme:

- Integration neuer Messpunkte: Die Nachrüstung neuer, für Energie-Effizienz benötigter Messpunkte ist mit mehreren hundert € pro Datenpunkt kostenintensiv. Dabei entfällt der mit Abstand größte Teil der Kosten auf Arbeitsleistungen, die Hardwarekosten sind gering. Durch Einsatz funkbasierter Systeme mit mioty-Technologie und die Entwicklung eines automatischen Integrationsflows wird der notwendige Arbeitsaufwand drastisch gesenkt werden.
- Manuelle Konfiguration: Das Projekt ermöglicht die Vermeidung früher notwendiger, sehr aufwändiger manueller Konfiguration der Monitoring- und Optimierungsservices.
- Automatisierung: Die Dienste können sich selbstständig an unbekannte Gebäude und Anlagen anpassen, wodurch ein adaptives Energiemanagement ermöglicht wird.

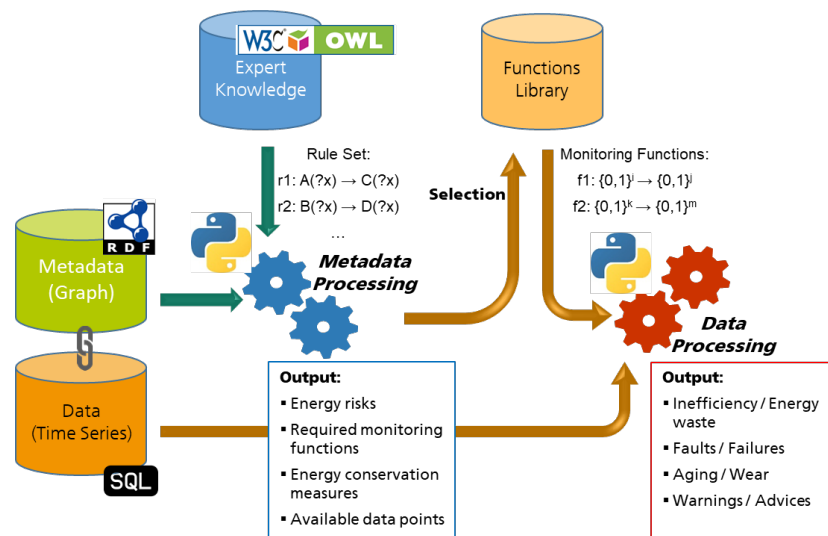


Abb. 2.3: Automatisierte Konfiguration und Ausführung von Monitoring und Optimierungsfunktionen

2.1.4 Ausblick

Die wesentlichen Herausforderungen waren einerseits die Einbindung der IT-Plattform in die Strukturen am Flughafen München, der als Teil der kritischen Infrastruktur erhöhte Sicherheitsanforderungen stellt. Die damit verbundenen Aufgaben konnten jedoch alle gelöst werden. Andererseits bestanden die Herausforderungen aus technischer Sicht in der Entwicklung einer für die geplanten Monitoring- und Optimierungsaufgaben geeigneten Ontologiestruktur sowie der Entwicklung von geeigneten Werkzeugen zur automatisierten Nutzung der so entstandenen Wissensgraphen. Eine weitere technische Herausforderung war die automatische Integration neuer Messpunkte sowohl in die mioty-Kommunikationsinfrastruktur als auch den Wissensgraphen. Mit der Installation und Inbetriebnahme des Systems am Flughafen München konnte dieses Ziel erreicht werden. Dabei ist besonders hervorzuheben, dass die genannten Eigenentwicklungen Teil des N5GEH-FIWARE-Stacks sind und somit prinzipiell auch in anderen Liegenschaften genutzt werden können. Bei der entwickelten Software handelt es sich jedoch um frühe Entwicklungsstände, eine Weiterentwicklung in Bezug auf Nutzerfreundlichkeit und Robustheit wird angestrebt. Weiter werden noch Module zur automatisierten Erzeugung des Wissensgraphen, insbesondere im Bereich der Anlagenbeschreibung benötigt. In diesem Projekt wurde der Wissensgraph aus der vorhandenen Dokumentation weitgehend manuell erstellt. Es wurden jedoch im wissenschaftlichen Bereich schon heute zahlreiche Ansätze zur automatisierten Erzeugung von Wissensgraphen vorgestellt, die jedoch noch verbessert werden müssen.

2.2 Satellitenprojekt Booster

2.2.1 Projektsteckbrief

Name des Teilprojektes:	Booster – IoT-Based Operational Optimization for SusTainable EneRgy systems
Laufzeit:	01.04.2022 – 30.09.2025
Förderkennzeichen:	03EN1058A-B
Beteiligte Organisationen:	Drees & Sommer SE, RWTH Aachen University
Kontaktperson:	Thomas Storek / thomas.storek@dreso.com
Branche:	IoT für Liegenschaften und Gebäude
Anforderungen an die Datenübertragung:	470 Datenpunkte alle 30 min. Im Stresstest konstante Datenraten bis 100 Werte pro Sekunde und für Datenratenspitzen bis 6 000 Werte pro Sekunde.
Schwerpunkte / Schlagworte:	IoT basierte Betriebsoptimierung; Energiemanagement in Quartieren

2.2.2 Use Case

Das Projekt BOOSTER fokussiert sich auf die IoT-basierte Betriebsoptimierung für nachhaltige Energiesysteme im Gebäudesektor. Im Zentrum steht die Entwicklung und praktische Demonstration von Optimierungsdiensten für Gebäudeenergiesysteme mittels Internet of Things (IoT).

Die technischen Anforderungen sind vielschichtig: Das System muss mit den typischen Kommunikationsintervallen von LoRaWAN-Geräten (5-10 Minuten) zuverlässig funktionieren und dennoch eine präzise Regelung ermöglichen. Bei den Performance-Tests bewies die Plattform ihre Leistungsfähigkeit, indem sie bis zu 6.000 Werte pro Sekunde ohne Datenverlust verarbeiten konnte – deutlich mehr als für die reale Anwendung erforderlich. Für die Gewährleistung der Systemresilienz wurden mehrere Replicas angelegt, wodurch selbst bei Ausfall einzelner Instanzen die Funktionalität aufrechterhalten bleibt. Als Demonstrationsgebäude diente das "Pentagon"-Gebäude im Neckarspinnerei-Quartier in Wendlingen-Unterboihingen bei Stuttgart, ein saniertes Industriegebäude aus dem Jahr 1955. Die Ausgangssituation war geprägt von einem bivalenten Heizungssystem mit Wärmepumpen und einem Gasbrennwertkessel, dessen Steuerung lediglich zeit- und Außentemperaturgeführt erfolgte. Die Raumtemperaturregelung beschränkte sich auf manuelle Thermostatventile ohne zentrale Steuerungsmöglichkeit. Die technischen Anlagen kommunizierten über heterogene Protokolle wie Modbus/TCP, Modbus/RTU und KNX, ohne dass eine einheitliche Integration bestand. Zudem fehlte eine dedizierte Infrastruktur für IoT-Kommunikation sowie Sensorik zur Erfassung von Raumzuständen wie Temperatur, CO₂-Niveau oder Präsenz.

Das Projekt verfolgte mehrere Ziele: Zunächst sollte eine übergreifende IoT-Plattform entwickelt werden, die verschiedene Kommunikationsprotokolle integriert und eine einheitliche Datenbasis schafft. Diese war als Grundlage für die Entwicklung von IoT-Diensten vorgesehen, die über ein standardisiertes Datenmodell automatisierbar auf die Daten zugreifen und in den Anlagenbetrieb eingreifen können. Auf dieser Basis sollten Dienste für die strukturierte Visualisierung und Analyse der Gebäudedaten sowie für die Raumtemperaturoptimierung mittels modellprädiktiver Regelung entwickelt werden. Letzterer sollte Energieeinsparungen bei gleichzeitiger Verbesserung des thermischen Komforts ermöglichen. Ein weiteres zentrales Ziel war die Entwicklung eines wiederverwendbaren Frameworks für die Integration von IoT-Komponenten in Bestandsgebäuden. Hierzu gehörte die Nachrüstung mit Sensoren und Aktoren sowie die Etablierung eines strukturierten Planungs- und

Inbetriebnahmeprozesses. Die praktische Wirksamkeit der entwickelten Lösungen sollte an zwei realen Gebäuden demonstriert werden – dem Hauptdemonstrator im Neckarspinnerei-Quartier und einem Testgebäude auf dem Drees & Sommer Campus in Stuttgart. Besonderes Augenmerk lag auf der Skalierbarkeit und Übertragbarkeit der Lösungen, um eine breite Anwendbarkeit im Gebäudebestand zu ermöglichen. Durch die Kombination aus automatisierter Konfiguration, semantischer Datenmodellierung und modularer Softwarearchitektur sollte der Aufwand für die Digitalisierung von Bestandsgebäuden deutlich reduziert werden.

2.2.3 Ergebnisse

Das Projekt BOOSTER hat eine umfassende IT-Infrastruktur entwickelt und implementiert, die sowohl Cloud-basierte als auch Edge-Computing-Komponenten umfasst. Für die Produktivumgebung wurde Microsoft Azure Kubernetes Service (AKS) gewählt, da dieser Dienst besonders starke Compliance- und Datenschutzfunktionen bietet und mit der EU-Datengrenze kompatibel ist. Die Cloud-Infrastruktur besteht aus einem Kubernetes-Cluster mit mehreren Knoten, die sowohl für Applikationen als auch für Datenbanken genutzt werden. Die Kommunikation zwischen dem Gerätenetzwerk der Pilotimmobilie und der Cloud erfolgt über eine TLS-verschlüsselte HTTPS-Verbindung. Auf Feldebene wurden über 90 IoT Sensoren und Aktoren sowie mehrere Hardware-Komponenten für die Harmonisierung der verschiedenen Kommunikationsprotokolle installiert: ein LoRaWAN-Gateway mit externer Antenne für die Funkverbindung mit den IoT-Sensoren und -Aktoren, ein Edge-Device mit Gateway-Software zur Protokollübersetzung und ein MBS-Gateway zur Integration der bestehenden Gebäudeautomationsysteme. Das Projekt nutzte intensiv Komponenten der N5GEH Plattform. Im Zentrum stand die FIWARE-Technologie mit dem Orion Context Broker für die Verwaltung von Kontextinformationen, dem IoT Agent JSON für die Integration von IoT-Geräten und QuantumLeap für die Historisierung von Zeitreihendaten. Als Datenbanken kamen MongoDB für Kontextdaten, CrateDB für Zeitreihendaten und Redis als Caching-Tool zum Einsatz. Die Kommunikation zwischen Feldgeräten und Plattform wurde über den EMQX MQTT-Broker realisiert. Für die Visualisierung der IoT-Daten wurde Grafana eingebunden. Die Anbindung der IoT-Dienste an die Plattform erfolgte mittels der FiLiP-Bibliothek (FIWARE Library for Python). Ein zentrales Ergebnis des Projekts ist die Entwicklung einer modularen Edge-Software, die als Middleware zwischen den verschiedenen Feldbus-Protokollen und der IoT-Plattform fungiert. Diese Software umfasst mehrere Module: ein BACnet-Modul zur Integration von BACnet-Geräten, ein FIWARE-Modul für die Kommunikation mit der Plattform und ein prototypisches Modbus-Modul. Die modulare Architektur ermöglicht eine flexible Anpassung an unterschiedliche Gebäudeinfrastrukturen. Im Bereich der IoT-Dienste wurden sowohl informative als auch direktwirkende Lösungen entwickelt. Zu den informativen Diensten zählen ein Grafana-Dashboard zur Echtzeitvisualisierung der IoT-Daten, ein Python-Framework für semiautomatisierte Datenanalysen des Gebäudeenergiesystems und eine virtuelle Wetterstation zur Integration von Wetterdaten. Die direktwirkenden Dienste umfassen einen Referenz-Controller als digitales Abbild eines herkömmlichen Thermostatventils sowie eine modellprädiktive Regelung für die optimierte Raumtemperaturregelung.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis ist die Entwicklung semantischer Datenmodelle auf Basis der Brick-Ontologie. Diese ermöglichen eine einheitliche Darstellung der heterogenen Gebäudekomponenten und bilden die Grundlage für die automatisierte Inbetriebnahme. Hierfür wurden Tools und Prozesse entwickelt, darunter ein Planungstool in Excel zur strukturierten Erfassung von IoT-Komponenten, Skripte zur automatischen Generierung von Gerätekonfigurationen und ein Templating-System für verschiedene Gerätetypen. Das Projekt konnte mehrere zentrale Probleme lösen: Die Protokollheterogenität wurde durch eine harmonisierte BACnet-Kommunikationsschicht überwunden, die

Kommunikationsverzögerungen der LoRaWAN-Geräte durch ein angepasstes Regelungskonzept kompensiert und eine sichere bidirektionale Kommunikation zwischen Feldebene und Cloud-Plattform implementiert. Es wurde eine kosteneffiziente und skalierbare Nachrüstlösung für IoT-Komponenten in Bestandsgebäuden entwickelt, die komplexe Betriebsoptimierung durch modellprädiktive Regelung realisiert und den Inbetriebnahmeprozess weitgehend automatisiert. Die entwickelte MPR konnte in Simulationen eine Reduktion des Heizwärmebedarfs um 7,8 % bei gleichzeitiger Verbesserung des Nutzerkomforts erreichen. Diese Ergebnisse unterstreichen das Potenzial der IoT-basierten Betriebsoptimierung für die energetische Modernisierung von Bestandsgebäuden.

2.2.4 Ausblick

Das BOOSTER-Projekt stellte sich sowohl technischen als auch regulatorischen Herausforderungen. Technisch erwies sich besonders die Integration der heterogenen Kommunikationsprotokolle als komplex. Die ursprüngliche Lösung mit Modbus/TCP als Harmonisierungsschicht wurde aufgrund mangelnder Standardisierung und hohem Dokumentationsaufwand durch BACnet ersetzt, was die langfristige Wartbarkeit verbesserte. Eine weitere technische Herausforderung stellten die LoRaWAN-Kommunikationsintervalle dar, die mit 5-10 Minuten zu lang für klassische Regelungstechniken waren und angepasste Ansätze erforderten. Aus regulatorischer Perspektive mussten Datenschutzanforderungen gemäß DSGVO berücksichtigt werden, was zur Wahl von Microsoft Azure mit EU-Datengrenze führte. Die IT-Sicherheit wurde durch VPN-Verbindungen und TLS-Verschlüsselung gewährleistet. Das Berechtigungsmanagement in der Cloud-Umgebung erforderte intensive Abstimmungen zwischen den Projektpartnern. Die zentralen Projektziele wurden erreicht: Eine funktionsfähige IoT-Plattform zur Integration heterogener Gebäudesysteme wurde entwickelt, IoT-Komponenten in den Demonstrationsgebäuden erfolgreich nachgerüstet und sowohl informative als auch direktwirkende IoT-Dienste im Echtbetrieb erprobt. Die modellprädiktive Regelung demonstrierte in Simulationen erhebliche Energieeinsparungen bei verbessertem Nutzerkomfort. Zudem wurde ein skalierbarer Prozess zur Planung und Inbetriebnahme von IoT-Systemen in Bestandsgebäuden etabliert. Die entwickelten Lösungen werden als bedeutender Fortschritt für kostengünstige Nachrüstlösungen in der Raumautomation angesehen und sollen für die kommerzielle Nutzung durch Drees & Sommer aufbereitet werden. Nach Projektende soll die Betriebsverantwortung für die IoT-Plattform von der RWTH Aachen auf Drees & Sommer übergehen. Aktuell wird untersucht, inwiefern die entwickelten IoT-Systeme bereits in aktuelle Projekte integriert werden können, um deren Einbindung in bestehende Betriebsabläufe zu evaluieren. Die Verknüpfung mit der N5GEH Plattform wurde erfolgreich umgesetzt: Die Core-Komponenten der FIWARE-Plattform bildeten das Rückgrat der Lösung, die Python-Bibliothek FiLiP wurde für die Anbindung der IoT-Dienste verwendet und im Projektverlauf erweitert. Die IoT-Dienste wurden als containerisierte Anwendungen in die Plattform integriert und die entwickelten Datenmodelle mit anderen N5GEH-Verbundprojekten abgestimmt, um eine hohe Wiederverwendbarkeit zu gewährleisten.

Der Wissensaustausch mit anderen Satellitenprojekten zu Themen wie Datenmodelle, Betriebsführungsframework und Geschäftsmodelle mit FIWARE trug zur Weiterentwicklung bei. Als wichtiger Faktor wurde die frühzeitige Einbeziehung der Gebäudenutzer identifiziert, da deren Akzeptanz für den Projekterfolg entscheidend ist. Insgesamt demonstriert das Projekt, dass die N5GEH-Plattform erfolgreich für die IoT-basierte Betriebsoptimierung von Gebäudeenergiesystemen eingesetzt werden kann und bietet einen vielversprechenden Ansatz für die energetische Modernisierung des Gebäudebestands. Die entwickelten Prozesse und Tools haben das Potenzial, die digitale Transformation im Gebäudesektor signifikant zu beschleunigen und damit einen wichtigen Beitrag zur Energiewende zu leisten.

2.3 Satellitenprojekt E3

2.3.1 Projektsteckbrief

Name des Teilprojektes:	E ³ – Emissionsarme und energieeffiziente Energiebereitstellung im urbanen Raum unter Nutzung neuester, intelligenter IKT-Strukturen
Laufzeit:	01.06.2022- 31.05.2026
Förderkennzeichen:	03EN3058A-E
Beteiligte Organisationen:	Yados GmbH, TU Berlin, TU Dresden, BEW Berliner Energie und Wärme GmbH, Danfoss GmbH (Leanheat)
Kontaktperson:	Dr.-Ing. Paul Seidel / paul.seidel@tu-dresden.de
Branche:	Heizungstechnik / Klimatechnik / Energietechnik
Anforderungen an die Datenübertragung:	• Datenübertragung (Intervall): 1s ... 1 min • Datenmenge: 10 ... 500 Datenpunkte (je nach Gebäudegröße)
Schwerpunkte / Schlagworte:	Monitoring / Steuerung / Optimierung

2.3.2 Use Case

Besonders im städtischen Kontext stellen hydraulische Netze zur Wärme- und Kälteversorgung eine erprobte Technologie dar, da sie mit zentralen energetischen Wandlungseinheiten ausgestattet sind. Die Einbindung von regenerativen Quellen in diese zentralen Systeme ist erstrebenswert, jedoch technisch anspruchsvoll. Ebenso existieren bei Photovoltaik (PV)-Systemen Hemmnisse, obwohl im urbanen Raum ausreichend Dach- und theoretisch auch Fassadenflächen zur Verfügung stehen. Die Kombination der beiden Technologien Wärmenetz und PV sowie deren ganzheitliche Betrachtung weist in diesem Kontext ein hohes Potential zur Ressourcenschonung sowie sektorenübergreifenden Energiebereitstellung und -nutzung auf.

Bezugnehmend auf diese Themenstellung werden im Forschungsprojekt anlagentechnische sowie digitale Lösungen entwickelt, welche es ermöglichen, ein lokales Energiemanagementsystem zu realisieren, mit dem multienergetische Systeme leicht und skalierbar umzusetzen sind. Das System besteht hierbei aus einem Wärmenetz (Ziel 5. Generation - kalte Nahwärme), vielen dezentralen Energiewandlungseinheiten unter Berücksichtigung einer hohen Einbindung von regenerativen Energien sowie dezentralen Energiewandlungseinheiten. Der Fokus liegt hierbei auf der gebäudeseitigen Anlagentechnik. Im Rahmen des Projektes wurde ein Prototyp einer bidirektionale Wärmeübergabestation, welche als Schnittstelle zwischen Liegenschaft und Wärmenetz dient, entwickelt und umfangreich im Labor erprobt. Neben der technischen Entwicklung lag der Schwerpunkt auf der Informations- und Kommunikationstechnik sowie den regelungstechnischen Algorithmen.

Die betrachteten Use Cases unterscheiden sich in der dezentralen Anlagentechnik zur Wärmebereitstellung. Betrachtet werden jeweils in Kombination mit dem Anschluss an ein Wärmenetz:

- Heizstab in Kombination mit einer PV-Anlage,
- Wärmepumpe in Kombination mit einer PV-Anlage,
- sommerliche Gebäudekühlung mittels Wärmepumpe,
- sowie KWK.

Der skalierbare Einsatz soll durch die entwickelte bidirektionale Wärmeübergabestation (siehe Abb. 2.4) sowie den modularen Aufbau der Algorithmen zur Systemsteuerung und -optimierung ermöglicht werden.



Abb. 2.4: Prototyp der bidirektionalen Wärmeübergabestation im Labor

Ziel der Entwicklung war es, zum einen die lokale Steuerung der Wärmeübergabestation für die zwei Betriebsweisen Consumer/ Prosumer zu entwickeln bzw. zu optimieren. Zum anderen erfolgte die Entwicklung der Algorithmen für den multienergetischen Systemregler, welcher auf Basis von aktuellen und historischen Messdaten Prognosen für den zukünftigen Wärmebedarf sowie die Betriebsflexibilität erstellt. Unter Berücksichtigung der Betriebsweise kann somit der Betrieb lokal optimiert oder für eine übergeordnete Steuerung verfügbar gemacht werden. Eine flexible Ansteuerung und ein fortlaufendes Monitoring sind dabei nur mit aktuellen und zuverlässigen Daten möglich, sodass die Kommunikation der Komponenten untereinander entscheidend ist und ebenfalls entwickelt wurde. Dies betrifft vor allem die erforderlichen Datenpunkte für die folgenden Kernkomponenten:

- Wärmeerzeuger und Anschluss an das Wärmenetz,
- der thermische Speicher,
- der thermische Verbrauch (Heizung & Trinkwarmwasser)
- sowie Prognosen für Wetter, Bedarfs- & Erzeugung.

Insgesamt sind verschiedene Mess-, Betriebs- und Sollwerte sowie Zeitpläne zu erfassen und zu verarbeiten. Eine konkrete Übersicht sowie das verwendete Datenmodell wurde gemeinsam mit dem N5GEH-Serv Projekt diskutiert und auf GitHub¹ veröffentlicht.

2.3.3 Ergebnisse

Das Projekt umfasste verschiedene Arbeitspakete von der Komponenten- und Algorithmenentwicklung bis zu messtechnischen Untersuchungen und ökonomischen Betrachtungen. Folgende Bereiche werden vorgestellt:

- Kommunikationsstruktur & Datenmanagement
- Multienergetischer Systemregler
- Funktionstests und Betriebsoptimierung der bidirektionalen Wärmeübergabestation

Kommunikationsstruktur & Datenmanagement

Im Projekt wurden verschiedene Ansätze zur Datenerfassung analysiert und umgesetzt. Die Basis

¹ Repo Datenmodelle: https://github.com/gewv-tu-dresden/n5geh.data_models

bildete die Struktur der FIWARE-Plattform² wie sie durch das N5GEH-Serv-Projekt bereitstellt wird. Als vorteilhaft ist hier herauszustellen, dass verschiedene Datenquellen und Kommunikationswege (MQTT, API von zwei Projektpartnern sowie zu externen Prognoseanbietern für Wetterdaten) angebunden werden konnten.

Es wurde ein lokaler Controller zur Anbindung der bidirektionalen Wärmeübergabestation an die FIWARE-Plattform erstellt. Dieser setzt die entsprechenden Sollsignale lokal spezifisch für die Übergabestation um und bildet die Schnittstelle zwischen dem lokalen Feldbusprotokoll Modbus-IP und der Datenübertragung zum IoT Agent (JSON)³ per MQTT. Es wurde auf eine vorhandene Eigenentwicklung zurückgegriffen, welche eine bidirektionale Kommunikation zur Weitergabe von Sollwerten inkl. einer Bestätigung der Umsetzung über die FIWARE-Plattform ermöglicht wurde.

Für die Datenauswertung und Betriebsoptimierung wurde es notwendig eine grundlegende Software bereitzustellen, die eine fortlaufende Datenauswertung und Kommunikation mit der FIWARE-Plattform ermöglicht. Dazu wurde gemeinsam mit dem N5GEH-Serv-Projekt ein Framework⁴ entwickelt, welches es ermöglicht eine variable Datenauswertung oder Ansteuerung umzusetzen und diese als Service an die FIWARE-Plattform anzubinden.

Multienegergetischer Systemregler

Der Systemregler basiert auf unterschiedlichen Komponenten, deren Funktionen bzw. Ergebnisse aufeinander aufbauen. Somit kann eine optimierte Betriebsweise der zu steuernden Anlage ermöglicht werden. Die Regelung erfolgt zyklisch, sodass fortlaufend neue Sollwerte der Stellgrößen ermittelt werden. Zu Beginn erfolgt hierbei die Erfassung der jeweils benötigten Daten (wie u.a. Messwerte aus der Anlage, Prognosedaten für zukünftige Systemzustände oder Steuersignale aus einer übergeordneten Steuerung⁵) und anschließend die Datenaggregation des Energietrendbandes der jeweiligen energetischen Bedarfe. Auf Basis dieser Daten kann daraufhin mit einem Steuerungsalgorithmus ein anwendungsbezogener optimaler Fahrplan ermittelt werden.

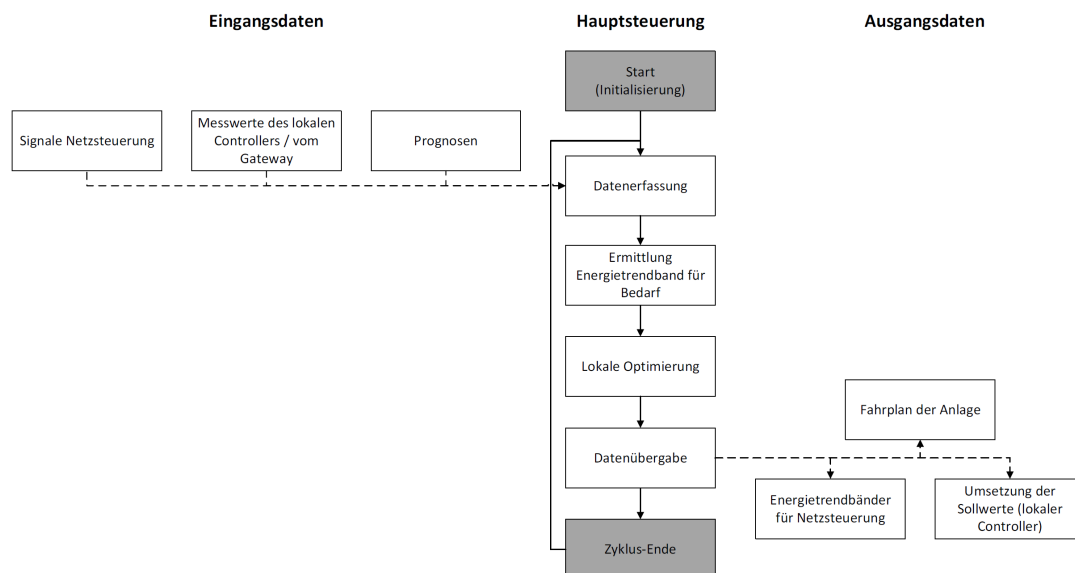


Abb. 2.5: Schematische Darstellung des Ablaufplans des lokalen Regelalgorithmus

² FIWARE-Plattform des N5GEH: <https://github.com/N5GEH/n5geh.platform/tree/master>

³ IoT Agent (JSON): <https://github.com/telefonicaid/iotagent-json>

⁴ EnCoDaPy: <https://github.com/gewv-tu-dresden/encodapy>

⁵ Die übergeordnete Steuerung ist hierbei beliebig und kann, je nach Einsatzgebiet des Systemreglers, eine elektrische Netz- bzw. Quartierssteuerung oder die Steuerung eines Wärmenetzes sein.

In der Abb. 2.5 ist dieser beschriebene Ablaufplan mit unterschiedlichen Eingangs- und Ausgangsparameter schematisch dargestellt. Dieser Ablauf ist das zentrale Element des Systemreglers für die lokale Optimierung des angebundenen Energiesystems. Die Ausgangsdaten können an eine übergeordnete Instanz, wie z.B. die N5GEH-Plattform, weitergeleitet werden. Dort wiederum werden diese für die Umsetzung der notwendigen Berechnungen des Gesamtsystems herangezogen, wobei die Daten Informationen hinsichtlich des möglichen Energieaustausches mit dem vorgelagerten Bilanzbereich sowie aktueller Istwerte enthalten. Nach Abschluss werden die Sollwerte wieder an den lokalen Controller übergeben und dort umgesetzt.

Funktionstest und Betriebsoptimierung der bidirektionalen Wärmeübergabestation

In Zusammenhang mit dem Prototyp der digitalen Wärmeübergabestation und der Verknüpfung des entwickelten Reglers mit einer Simulationsumgebung werden die einzelnen Komponenten im Software-in-the-Loop(SiL)- sowie im Hardware-in-the-Loop(HiL)-Verfahren stetig weiterentwickelt. Dies umfasst u.a. die Funktionstests zum bidirektionalen Betrieb der Wärmeübergabestation und die Optimierung der internen Regelparameter für einen zügigen und reibungslosen Betrieb der Anlage. In Abb. 2.6 ist hierzu exemplarisch der zeitliche Verlauf eines Wärmebezugs- bzw. Einspeisevorganges der Übergabestation dargestellt.

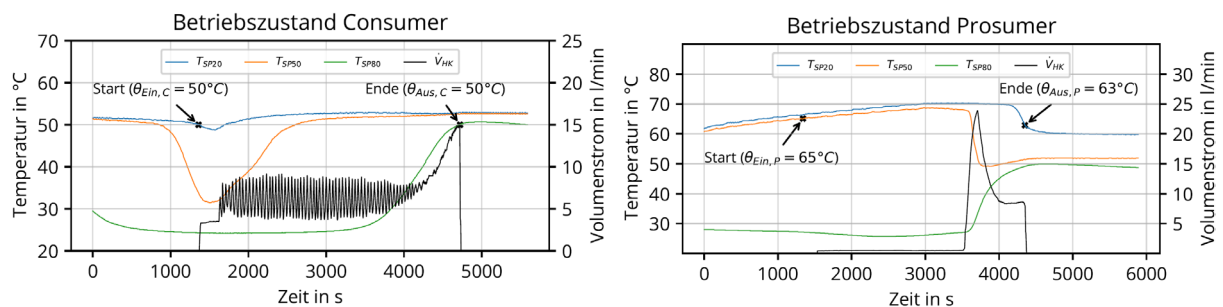


Abb. 2.6: zeitlicher Verlauf der Speichertemperaturen für die zwei umsetzbaren Betriebsweisen Consumer (Wärmebezug) und Prosumer (Wärmeeinspeisung)

Je nach Randbedingungen und Betriebsweise ist hierbei die Regelung der Übergabestation mit nur einem Parameterdatensatz für die notwendigen Komponenten anspruchsvoll. In diesem Beispiel ist zu erkennen, dass bei dem Wärmebezug (links) der Volumenstrom in einem geringen Bereich schwingt. Im Vergleich dazu, ist der Volumenstrom bei der Einspeisung (rechts) stabil. Es treten jedoch, je nach Randbedingung, unterschiedliche Anlauf-/Startzeit auf, welche im Betrieb zu berücksichtigen sind. Somit ist eine stetige Anpassung der Parameter zur Anlagenregelung notwendig. Der reibungslose Betrieb der Übergabestation in den Betriebsweisen konnte erfolgreich nachgewiesen werden.

2.3.4 Ausblick

Das Projekt E3 umfasste Themenbereiche von der Kommunikations- und Dateninfrastruktur, der Einbindung von Algorithmen in einer Cloud-Infrastruktur über die Entwicklung von Algorithmen zur Datenaggregation und Ermittlung der möglichen Betriebsflexibilität einer dezentralen Anlage zur Einspeisung von Wärme in ein Wärmenetz. Aufgrund dieses breiten thematischen Spektrums und der unterschiedlichen betrachteten Use Cases war es notwendig, die jeweiligen technischen Anforderungen sowie die IT-Infrastruktur mit allen Projektpartnern abzustimmen. Dies erfolgte mit einem Lastenheft sowie einer Detailbeschreibung der betrachteten Anwendungsszenarien. Die Anwendung der FIWARE-

Plattform im N5GEH erfolgte für ein Beispiel mit dezentralen Wärmeerzeugungsanlagen in einem Wärmenetz, mit dem Fokus auf der Gebäudeseite. Damit wurde das Projektziel erreicht. Zentrale Herausforderungen aus technischer Sicht waren dabei:

- die Datenhaltung in einem leicht nachvollziehbaren und reproduzierbaren Datenmodell,
- die Entwicklung von Algorithmen für Datenaggregation, Fahrplanerstellung und Betriebsoptimierung unter Beachtung der möglichen Systemzustände für ein stabilen und robusten Betrieb,
- die Erstellung einer Service-Struktur (Software) die einen zuverlässigen Betrieb garantiert,
- und die umfangreiche Untersuchung der Algorithmen im Labor mit unterschiedlichen Randbedingungen für diverse Betriebsszenarien.

Für den N5GEH-Verbund wurden aus dem Projekt E3 das verwendete Datenmodell öffentlich zugänglich gemacht, sodass der verwendete Ansatz nachvollzogen und weiterverwendet werden kann. Außerdem wurde das zentrale Framework zur Integration der Algorithmen als Service in die FIWARE-Plattform ebenfalls in Zusammenarbeit mit dem N5GEH-Serv öffentlich zur Verfügung gestellt. Somit wurde eine neue Möglichkeit zur Verknüpfung von Anwendungen mit der Plattform geschaffen.

2.4 Satellitenprojekt TWE Flex

2.4.1 Projektsteckbrief

Name des Teilprojektes:	TWE-Flex – Optimierung und Flexibilisierung von Erzeugungsanlagen zur Trinkwassererwärmung
Laufzeit:	01.04.2022- 30.06.2025
Förderkennzeichen:	
Beteiligte Organisationen:	TU Berlin, TU Dresden, BEW Berliner Energie und Wärme GmbH, EL-REHA Elektronische Regelungen GmbH
Kontaktperson:	Prof. Dr.-Ing. habil. Joachim Seifert (Joachim.Seifert@tu-berlin.de)
Branche:	Heizungs-/Klimatechnik
Anforderungen an die Datenübertragung:	• Datenübertragung (Intervall): 1s ... 1 min • Datenmenge: 10 ... 100 Datenpunkte (je nach Gebäude)
Schwerpunkte / Schlagworte:	Monitoring / Steuerung

2.4.2 Use Case

Die Trinkwassererwärmung (TWE) in Gebäuden erfolgt häufig zentral und aus hygienischen sowie funktionellen Gründen sind Systeme zur Warmhaltung des Verteilsystems erforderlich. Neben Zirkulationssystemen kommen elektrische Temperaturhaltebänder (THB) zur Anwendung, welche über einen dezentralen Wärmeeintrag die Warmhaltung sicherstellen. Die zentrale Wärmeerzeugung erfüllt oft eine Doppelfunktion zur Heizung und TWE. Während für die Heizung durch die Korrelation zur Außentemperatur bewährte Prädiktionsalgorithmen zur Verfügung stehen, ist die Prädiktion des TWE-Bedarfs nur eingeschränkt möglich. Im Vorhaben bestand daher das Ziel, ein in der Trinkwarmwasserinstallation (TWI) installiertes THB als Sensor zu nutzen, um Informationen über den Zustand des Trinkwarmwassers (TWW) im System sowie über das Verbrauchsverhalten detektieren zu können.

Darauf aufbauend galt es, die genutzten Daten für die Betriebsoptimierung von THB als auch der TWE zu nutzen. Die Untersuchungen wurden für ein Konzept einer zentralen TWE eines Mehrfamilienhauses durchgeführt. Dieses Konzept wird durch das in Abb. 2.7 dargestellte hydraulische Schema definiert.

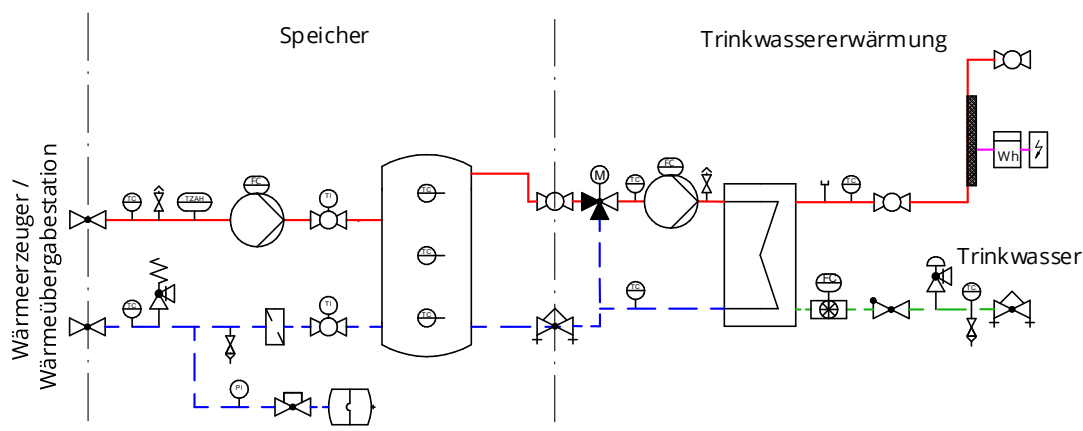


Abb. 2.7: Schema zentrale TWE mit THB

Ziel der Untersuchungen war es, die Betriebsführung einerseits hinsichtlich des energetischen

Einsatzes zu optimieren und andererseits den Nutzerkomfort sowie die hygienische Güte des TWW zu garantieren bzw. im Bedarfsfall zu verbessern. Dazu wurden Algorithmen für Datenauswertung und Sollwertbestimmung in der Betriebsführung betrachtet. Eine flexible Ansteuerung und ein fortlaufendes Monitoring sind dabei nur mit aktuellen und zuverlässigen Daten möglich, sodass die Kommunikation der Komponenten untereinander entscheidend ist und ebenfalls entwickelt wurde.

Dies betrifft vor allem die erforderlichen Datenpunkte für die folgenden Kernkomponenten aus dem zuvor dargestellten Schema: das THB, der Wärmeerzeugers / der Anschluss an ein Wärmenetz und der thermische Speicher. Hier sind jeweils verschiedene Mess-, Betriebs- und Sollwerte zu erfassen und zu verarbeiten. Eine konkrete Übersicht sowie das verwendete Datenmodell wurde gemeinsam mit dem N5GEH-Serv Projekt diskutiert und auf GitHub⁶ veröffentlicht.

2.4.3 Ergebnisse

Das Projekt umfasste verschiedene Arbeitspakete und kann somit Untersuchungen und Ergebnisse aus den folgenden drei Bereichen vorstellen:

- Kommunikationsstruktur & Datenmanagement
- Datenauswertung / Virtuelle Sensoren durch das THB
- Betriebsoptimierung des THB sowie der TWE

Kommunikationsstruktur & Datenmanagement

Im Projekt wurden verschiedene Ansätze zur Datenerfassung analysiert und umgesetzt. Die Basis bildete die Struktur der FIWARE-Plattform⁷, wie sie durch das N5GEH-Serv-Projekt bereitgestellt wird. Als vorteilhaft ist hier herauszustellen, dass verschiedene Datenquellen und Kommunikationswege (MQTT, API eines Projektpartners) angebunden werden konnten. Es wurde eine Anbindung der Steuerbox des THB an die FIWARE-Plattform erstellt, für die ein Gateway zur Verbindung zum Feldbusprotokoll Modbus-RTU verwendet wurde, welches einen Datenaustausch mit IoT Agent (JSON)⁸ ermöglicht. Dabei wurde auf eine vorhandene Eigenentwicklung zurückgegriffen, da so auch eine bidirektionale Kommunikation zur Weitergabe von Sollwerten inkl. einer Bestätigung der Umsetzung über die FIWARE-Plattform ermöglicht werden konnte. Weiterhin wurden Datenerfassungen mittels verschiedener bereits eingesetzter Gateways des Projektpartners BEW untersucht, um Datenpunkte an einer zentralen Stelle zusammenzuführen und nutzbar zu machen. Dies machte ein verbessertes Monitoring der Anlagen möglich und zeigte einige Möglichkeiten zur Betriebsoptimierung auf, sodass seitens BEW eine weitere Analyse anderer Anlagen außerhalb des Forschungsvorhabens geprüft wird. Für die Datenauswertung und Betriebsoptimierung wurde es notwendig, eine grundlegende Software bereitzustellen, die eine fortlaufende Datenauswertung und Kommunikation mit der FIWARE-Plattform ermöglicht. Dazu wurde gemeinsam mit dem N5GEH-Serv-Projekt ein Framework⁹ entwickelt, welches es ermöglicht eine variable Datenauswertung oder Ansteuerung umzusetzen und diese als Service an die FIWARE-Plattform anzubinden.

Datenauswertung / Virtuelle Sensoren durch das THB

Ein wichtiger Bestandteil des Projektes war die Untersuchung zur Datenauswertung der Messdaten des THB mit dem Ziel weitere Informationen über die TWI zu gewinnen. Dazu wurden Messungen an einem Versuchsstand und einem realen Gebäude vorgenommen. Grundsätzlich konnte gezeigt

⁶ Repo Datenmodelle: https://github.com/gewv-tu-dresden/n5geh.data_models

⁷ FIWARE-Plattform des N5GEH: <https://github.com/N5GEH/n5geh.platform/tree/master>

⁸ IoT Agent (JSON): <https://github.com/telefonicaid/iotagent-json>

⁹ EnCoDaPy: <https://github.com/gewv-tu-dresden/encodapy>

werden, dass es am THB einen Zusammenhang zwischen den elektrischen Kenngrößen (elektrischer Widerstand R_{THB} und elektrische Leistung P_{THB}) und der Temperatur des THB ϑ_{THB} gibt. Die folgende Abb. 2.8 stellt den Zusammenhang am Beispiel von Messungen am Versuchsstand für verschiedene Messkombinationen (Rohr und THB) dar.

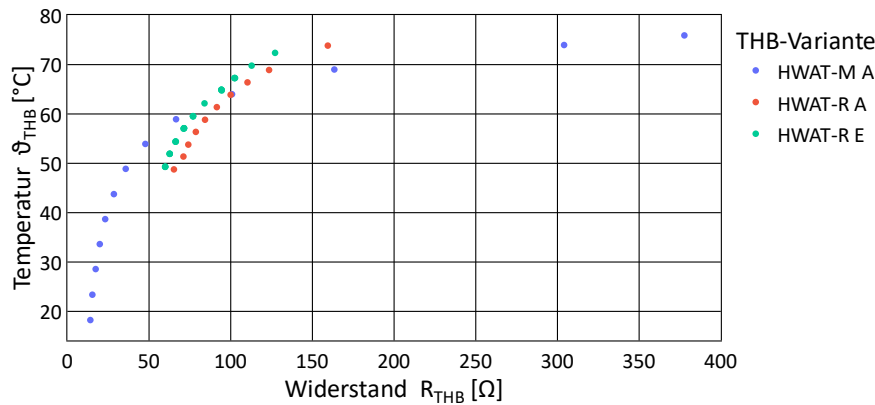


Abb. 2.8: Widerstandskennlinie über der Temperatur für verschiedene THB

Der gezeigte Zusammenhang kann genutzt werden, um virtuelle Sensoren zu berechnen, die eine reale Größe analog zu einer Messgröße beschreiben, ohne dass diese direkt gemessen wird. Folgende Größen wurden im Projekt untersucht:

- Mittlere Temperatur des TWW ϑ_{TWW}
- Entnahmen von TWW (Volumenstrom)

Bei beiden Größen ist das Ergebnis mit einer Unsicherheit behaftet, die bei einer späteren Verwendung zu berücksichtigen ist. Aufgrund der Unsicherheiten wurde eine gleichzeitige Berechnung beider Größen als nicht zu empfehlen eingestuft. Die Berechnung der TWW-Temperatur ϑ_{TWW} hingegen wird als vielversprechend betrachtet, da diese auch für die Betriebsführung des THB selbst als Referenzwert von hoher Relevanz ist.

Betriebsoptimierung des THB sowie der TWE

Die zuvor gewonnen Erkenntnisse können genutzt werden, um einerseits den Betrieb des THB an den Bedarf (die Temperatur des TWW ϑ_{TWW} und / oder vorhandene TWW-Entnahme) anzupassen und andererseits die zentrale TWE hinsichtlich der Wärmebereitstellung zu optimieren.

Der Betrieb des THB erfolgt i.d.R. ohne eine aktive Regelung, sodass die Betriebsparameter anhand der Auslegung gewählt werden. Im Projekt wurde ein Ansatz entwickelt, mit dem der Betrieb anhand der Temperaturmessung geregelt wird, wobei der Algorithmus als Cloud-Service umgesetzt und die Kommunikation über die FIWARE-Plattform läuft. Gleichzeitig konnte der Algorithmus auch auf einer lokalen Steuereinheit implementiert werden. Als Ergebnis zeigt sich, dass die hygienischen Anforderungen sichergestellt werden können und zeitgleich der Energieeinsatz elektrischer Energie reduziert werden kann. Dies ist möglich, da die Umgebungstemperatur i.d.R. über der Auslegungstemperatur liegt und damit meist höhere Temperaturen in der TWI gehalten werden. Das Verhalten kann bspw. anhand der Ergebnisse einer Simulation in Abb. 2.9 nachvollzogen werden, da hier der genutzte Duty Cycle (φ_{DC}) sowie die Temperatur des TWW mit $\vartheta_{\text{TWW Regler}}$ und ohne Regler $\vartheta_{\text{TWW Ref}}$ dargestellt sind. Im Falle einer Verletzung der hygienischen Grenzwerte könnte der Regler eine Verbesserung dieses Zustandes durch einen höheren dezentralen Wärmeeintrag erreichen, was aber eine Erhöhung des

Energieeinsatzes zu Folge hätte.

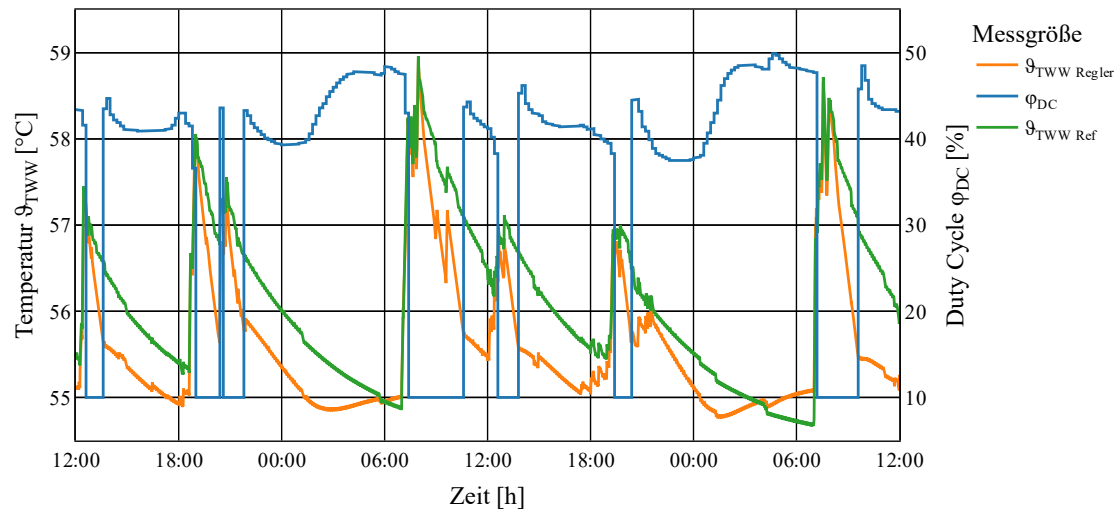


Abb. 2.9: Temperaturverlauf bei Ansteuerung des THB

Die Optimierung des Betriebs der TWE wurde hinsichtlich der Energiebereitstellung im Speicher mit verschiedenen Ansätzen und unterschiedlichen Zielen betrachtet. Es konnte gezeigt werden, dass:

- mit einem regelbasierten Ansatz für die Speicherladeregelung des zentralen Wärmespeichers die Speicherverluste und somit der Energiebezug reduziert werden können,
- mit einem modellprädiktiven Ansatz und einer wirtschaftlichen Optimierung bei schwankenden Energiepreisen die Kosten für den Energiebezug reduziert werden können. Dabei steigt jedoch die bezogene Energie an, da der Speicher auf höhere Temperaturen erwärmt wird, was wiederum zu höheren Verlusten führt.

2.4.4 Ausblick

Das Projekt TWE-Flex umfasste Themenbereiche von der Kommunikations- und Dateninfrastruktur, der Einbindung von Algorithmen in einer Cloud-Infrastruktur über die Entwicklung einer Datenauswertung zur Entwicklung von virtuellen Sensoren bis hin zur Anwendung der gewonnenen Daten in der Betriebsführung von TWE und THB. Aufgrund dieses breiten Spektrums war es notwendig, die jeweiligen Anforderungen und Möglichkeiten in den einzelnen Bereichen abzustimmen, um einen vollständigen Use Case einer Anwendung der FIWARE-Plattform im N5GEH für ein Beispiel in der Gebäudeenergie-technik umzusetzen. Damit wurde das Projektziel erreicht. Zentrale Herausforderungen aus technischer Sicht waren dabei:

- die Datenhaltung in einem leicht nachvollziehbaren und reproduzierbaren Datenmodell,
- die Entwicklung von Algorithmen für Datenanalyse und Betriebsführung unter Beachtung der möglichen Systemzustände für ein stabilen und robusten Betrieb,
- die Erstellung einer Service-Struktur (Software) die einen zuverlässigen Betrieb garantiert,
- und die Untersuchung der Algorithmen im Feldtest, wobei vor allem die Integration zusätzlicher Messpunkte in ein bestehendes System als Herausforderung zu meistern war.

Für den N5GEH-Verbund wurden aus dem Projekt TWE-Flex das verwendete Datenmodell öffentlich zugänglich gemacht, sodass der verwendete Ansatz nachvollzogen und weiterverwendet werden kann. Außerdem wurde das zentrale Framework zur Integration der Algorithmen als Service in die FIWARE-Plattform ebenfalls in Zusammenarbeit mit dem N5GEH-Serv öffentlich zur Verfügung gestellt. Somit

wurde eine neue Möglichkeit zur Verknüpfung von Anwendungen mit der Plattform geschaffen.

2.5 Satellitenprojekt DymoBat

2.5.1 Projektsteckbrief

Name des Teilprojektes:	DymoBat – KI unterstützte Kommunikationstechnologien zur dynamischen Optimierung von Mobilität und Energiespeichern zur Frequenzstabilisierung und Energieversorgung		
Laufzeit:	01.10.2022 - 30.09.2026		
Förderkennzeichen:	03EI6082A		
Beteiligte Organisationen:	1. TU Dresden	2. SAP Deutschland SE & Co. KG	
	3. Meshmerize GmbH	4. Campus Genius GmbH	
	5. SachsenNetze GmbH	6. SachsenEnergie	
	7. ComfortCharge GmbH	8. Landeshauptstadt Dresden	
Kontaktperson	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Frank H. P. Fitzek Email: frank.fitzek@tu-dresden.de		
Branche:	Schnittstelle der Branchen Energie, Telekommunikation und Verkehr		
Anforderungen an die Datenübertragung:	• Datenübertragung: Geringe Latenzen und Echtzeitfähigkeit • Datenmenge: groß – skalierbare Lösung		
Schwerpunkte / Schlagworte:	Steuerung / Energiemanagement/ Bidirektionales Laden/ Vehicle to Grid		

2.5.2 Use Case

Der Use Case befindet sich an der Schnittstelle der Branchen Energie, Telekommunikation und Verkehr. Im Fokus steht die digitale Transformation von Energiesystemen durch Smart Grids, unterstützt durch 5G/Mesh-Kommunikation, KI-basierte Steuerung und die Integration von Elektrofahrzeugen als mobile Speicherressourcen.

Das System erfordert eine äußerst zuverlässige Kommunikation mit geringer Latenz zwischen verteilten Ressourcen (PV, Wind, Elektrofahrzeuge usw.) und Koordinierungseinheiten, kombiniert mit Echtzeit-Entscheidungsfindung, die durch KI-Modelle und Optimierungsalgorithmen ermöglicht wird. Kommunikation und Datenverarbeitung müssen aufeinander abgestimmt sein und sofort reagieren, um die Frequenz zu stabilisieren, Lastschwankungen auszugleichen und das Laden und Entladen zu optimieren. Darüber hinaus entstehen große und heterogene Datenströme, die von IoT-Sensoren, dezentralen Energiequellen, Wettervorhersagen, Elektrofahrzeugflotten und Smart Metern generiert werden. Dies erfordert skalierbare Datenpipelines, die Edge-Computing für lokale Reaktionsfähigkeit mit cloudbasierter KI-Optimierung für globale Koordination kombinieren.

Die Resilienz des Systems muss auf zwei Ebenen gewährleistet sein: Zum einen ist eine Optimierungsresilienz notwendig, um mit Unsicherheiten bei den Zeitplänen der Elektrofahrzeuge, der Erzeugung erneuerbarer Energien und den Energiebedarfsmustern umgehen zu können und trotz unvollständiger oder stochastischer Informationen robuste Entscheidungen zu treffen. Zum anderen ist eine Kommunikationsresilienz erforderlich, die durch fehlertolerante 5G- und Mesh-Kommunikation, Redundanzmechanismen und sichere Interoperabilität einen zuverlässigen Stromnetzbetrieb auch bei Störungen sicherstellt.

Die Ausgangssituation ist dadurch geprägt, dass zwar bereits Energiemanagementsysteme für Haushalte und Standorte existieren, diese jedoch isoliert arbeiten und eine Echtzeit-Koordination zwischen den verschiedenen Akteuren bislang fehlt. Bidirektionales Laden im Rahmen von Vehicle-to-Grid (V2G) ist technisch zwar möglich, wurde jedoch bislang weder in Kommunikations- noch in

Marktrahmenbedingungen integriert und ist öffentlich noch nicht umgesetzt. Zudem mangelt es an robusten Planungs- und Optimierungsalgorithmen für die Koordination von bidirektionalen Elektrofahrzeugen und anderen dezentralen Ressourcen. Infolgedessen sind der Ausgleich des Energienetzes, die Frequenzstabilität und die effiziente Nutzung erneuerbarer Energien weiterhin begrenzt.

Ziel dieses Use Cases ist es daher, KI- und optimierungsbasierte Steuerungsalgorithmen für das Echtzeitmanagement dezentraler Energiequellen und Mikronetze zu entwickeln. Gleichzeitig soll eine äußerst zuverlässige Kommunikation mit geringer Latenz durch den Einsatz von 5G- und Mesh-Netzwerken ermöglicht werden, um die Echtzeitkoordination zu unterstützen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Integration von Elektrofahrzeugen als mobile Energiespeicher durch bidirektionales Laden (V2G) und der Validierung dieser Konzepte sowohl in virtuellen Testumgebungen als auch an realen Pilotstandorten. Abschließend sollen Leitlinien und Empfehlungen für Prosumenten, Ladestellenbetreiber und Energieversorger entwickelt werden, um marktreife Lösungen und Geschäftsmodelle zu fördern.

2.5.3 Ergebnisse

IT-Infrastruktur

Im Rahmen des Projektes wurde ein 5G-Campus-Netzwerk bereitgestellt, das eine äußerst zuverlässige Kommunikation mit geringer Latenz für Echtzeit-Energiemanagementaufgaben ermöglicht. Weiterhin wurde eine Mesh-Netzwerkinfrastruktur eingerichtet, um dezentrale Energiequellen (DERs) und IoT-Geräte auf Haushalts- und Mikronetzebene miteinander zu verbinden. Um eine lokale Datenverarbeitung mit minimaler Latenz zu ermöglichen, wurden Edge-Computing-Knoten eingerichtet. Bidirektionale Ladestationen wurden in die Infrastruktur integriert, einschließlich Backend-Kommunikationssystemen für die Verwaltung des Lade- und Entladevorgangs.

Das Projekt hat während der Umsetzung keine direkte Nutzung der N5GEH-Plattform vorgenommen. Die Architektur und die zugrunde liegende Codebasis der Plattform lieferten jedoch wertvolle Erkenntnisse für die Gestaltung unseres eigenen Frameworks. Darüber hinaus wurden im Rahmen des Projekts klare Möglichkeiten für eine künftige Angleichung und potenzielle Integration der entwickelten Ladelösungen in die N5GEH-Plattform identifiziert.

Eigenentwicklungen

Es erfolgte die Entwicklung von Echtzeit-Algorithmen auf Basis von KI und Optimierung für das Laden, Entladen und den Lastausgleich sowohl innerhalb lokaler Bereiche als auch über mehrere Zellen hinweg (in Entwicklung). Zudem wurde eine robuste mehrstufige Kommunikationsarchitektur entworfen, die 5G- und Mesh-Technologien kombiniert, um ein zuverlässiges Energiemanagement zu gewährleisten. Die Implementierung einer V2G-fähigen Ladeinfrastruktur und EV-Integration umfasst sowohl die hardwareseitige Bereitstellung von Ladestationen als auch die softwareseitige Koordination mittels OCPP-Protokoll und Algorithmen für bidirektionale Energieflüsse (in Entwicklung).

Weiterhin wurden Simulations- und Testumgebungen geschaffen, die eine virtuelle Validierung von Algorithmen vor dem Einsatz in der Praxis ermöglichen. Ergänzend dazu erfolgte die Entwicklung von Geschäfts- und Betriebsrichtlinien für Prosumer, Ladestationsbetreiber und Energieversorger auf der Grundlage der in den Testumgebungen gewonnenen Erkenntnisse

Gelöste Probleme

Im Projekt konnten zentrale technische und systemische Herausforderungen erfolgreich adressiert werden. Eine zuverlässige Echtzeit-Koordination dezentraler Energiequellen (DER) und Elektrofahrzeuge (EV) wurde durch den Einsatz latenzarmer 5G- und Mesh-Kommunikation erreicht. Darüber hinaus wurde die Skalierbarkeit des Systems nachgewiesen, indem große und heterogene Datenströme

aus IoT-Geräten, DER und EV durch die kombinierte Nutzung von Edge-Computing und Cloud-Optimierung effizient verarbeitet werden können.

Ein besonderer Schwerpunkt lag auf der Resilienz des Gesamtsystems, die auf zwei Ebenen umgesetzt wurde: Zum einen durch fehlertolerante 5G- und Mesh-Netzwerke zur Sicherstellung der Kommunikationsstabilität, zum anderen durch robuste Planungsalgorithmen, die auch unter Unsicherheiten hinsichtlich der Verfügbarkeit von Elektrofahrzeugen und der Einspeisung erneuerbarer Energien stabile Betriebszustände gewährleisten. Die Integration von Elektrofahrzeugen wurde über die reine technische Machbarkeit hinaus demonstriert, indem bidirektionales Laden (Vehicle-to-Grid, V2G) in die bestehende IT-Infrastruktur und die lokale Energiekoordination eingebunden wurde.

Zudem erfolgte der Übergang von virtuellen Modellen zu realen Testumgebungen, um die praktische Umsetzbarkeit zu validieren und die Grundlage für eine spätere Skalierung zu schaffen. Schließlich wurden die technischen Erkenntnisse in praxisnahe Empfehlungen für Prosumenten, Energieversorger und Kommunen überführt, um bestehende Implementierungs- und Markteintrittshürden zu reduzieren

2.5.4 Ausblick

Die technischen Herausforderungen des Projekts lagen insbesondere in der nahtlosen Integration heterogener Kommunikationstechnologien wie 5G, Mesh und IoT in ein robustes Echtzeitnetzwerk. Vor allem die Einrichtung klar definierter Schnittstellen zwischen 5G-Infrastruktur, Mesh-Netzwerken und IoT-Geräten erwies sich als anspruchsvoll, da eine reibungslose Interoperabilität eine grundlegende Voraussetzung für einen zuverlässigen Betrieb darstellt. Darüber hinaus stieß die Implementierung der V2G-Funktionalität auf praktische Grenzen, da bidirektionale Ladestationen derzeit nur sehr eingeschränkt im Handel verfügbar sind. Die notwendige enge Abstimmung zwischen Hardwarekomponenten, insbesondere Ladestationen und Elektrofahrzeugen, sowie Softwarekomponenten wie Steuerungsalgorithmen und Zeitplanungsmechanismen erhöhte die Systemkomplexität zusätzlich. Auch die Entwicklung robuster Zeitplanungsrahmen für die Koordination mehrerer Mikronetze stellte eine erhebliche technische Herausforderung dar, da die Lösungen sowohl skalierbar als auch flexibel an unterschiedliche Betriebsbedingungen anpassbar sein mussten.

Neben den technischen Aspekten bestanden erhebliche regulatorische Herausforderungen. Das Fehlen standardisierter Rahmenbedingungen für den Energiehandel behindert weiterhin den großflächigen Einsatz bidirektionaler Ladelösungen und dezentraler Energielösungen. Zentrale Fragestellungen, insbesondere zur Netzkompatibilität, zu Zertifizierungsverfahren sowie zu Abrechnungs- und Vergütungsmechanismen für die Rückspeisung von Energie in das öffentliche Stromnetz, sind nach wie vor nicht abschließend geklärt. Zusätzlich stellten Datenschutz- und Cybersicherheitsregelungen hohe Anforderungen an die Systemgestaltung, insbesondere im Umgang mit sensiblen Haushalts- und Mobilitätsdaten, was die praktische Umsetzung weiter erschwerte

Trotz dieser Herausforderungen konnte das Projekt seine Zielstellungen in den Bereichen Algorithmenentwicklung und Simulation erfolgreich erreichen. Echtzeit-Planungs- und Optimierungsalgorithmen wurden in virtuellen Umgebungen entworfen, implementiert und validiert. Die Arbeiten am realen Testfeld dauern weiterhin an, da das Projekt noch ein weiteres Jahr läuft. Verzögerungen im hardwarebezogenen Bereich ergeben sich vor allem aus der begrenzten Verfügbarkeit und den langwierigen Beschaffungsprozessen für bidirektionale Ladestationen. Die entwickelten Algorithmen und Kommunikationsrahmen werden kontinuierlich weiter verfeinert, um eine Integration in größere Smart-Grid-Implementierungen, einschließlich regionaler und kommunaler Energienetze, zu ermöglichen. Die Ergebnisse aus den Testumgebungen bilden dabei die Grundlage für zukünftige Implementierungsprojekte in Zusammenarbeit mit Industriepartnern wie Ladestationsbetreibern, Energieversorgern und Kommunen. Darüber hinaus werden die im Projekt erarbeiteten Geschäfts- und Betriebsrichtlinien zu

erweiterten Empfehlungsrahmen für Prosumenten und Marktakteure weiterentwickelt, um bestehende Einführungshürden zu reduzieren. Die Projektergebnisse eröffnen zudem neue Perspektiven für weitere Forschungsinitiativen, insbesondere in den Bereichen vorausschauende Planung, Sektorkopplung zwischen Strom, Mobilität und Wärme sowie der Konvergenz von Energie-, Mobilitäts- und Kommunikationsnetzen

Obwohl während des Projekts keine direkte technische Integration mit der N5GEH-Plattform erreicht wurde, lieferten deren Architektur und Codebasis wertvolle Impulse für die Gestaltung unseres eigenen Frameworks. Das Projekt zeigte klare konzeptionelle Synergien auf und schuf damit eine solide Grundlage für die künftige Angleichung und mögliche Integration der entwickelten Lade- und Energiemanagementlösungen in das N5GEH-Ökosystem.

2.6 Satellitenprojekt DIGiHAST

2.6.1 Projektsteckbrief

Name des Projektes:	DIGiHAST – Digitalisierung der Wärmeübergabe in Hausstationen und Netzknoten.
Laufzeit:	01.05.2022- 31.10.2026
Förderkennzeichen:	03EN3056A-C
Beteiligte Organisationen:	TU Dresden, AGFW Projekt GmbH, MVV Netze GmbH
Kontaktperson:	Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann (clemens.felsmann@tu-dresden.de)
Branche:	Fernwärme
Anforderungen an die Datenübertragung:	• Datenübertragung (Intervall): 15min ... 1h • Datenmenge: 6 ... 8 Datenpunkte (je nach Gebäude)
Schwerpunkte / Schlagworte:	Monitoring / Steuerung in Wärmenetzen (Fern- und Nahwärme)

2.6.2 Use Case

Vernetzte Wärmeversorgungsstrukturen mit zum Teil komplexen, historisch gewachsenen Topologien verbinden zentrale sowie in zunehmenden Maßen auch teilzentrale und dezentrale Wärmeerzeuger mit zum Teil stark volatilen Profilen mit den einzelnen Wärmeabnehmern. Einzelne Abnehmer wurden fast ausschließlich über Jahreswärmemengen bilanziert und abgerechnet. Auch aus Sicht des Wärmenetzes waren die Abnehmer zu Beginn des Projektes lediglich punktuell über die Jahreswärmeverbräuche charakterisiert. Weiterführende Informationen zu Wärmelastprofilen oder Rücklauftemperaturen an den Hausstationen waren nicht vorhanden. Mittels Digitalisierung sollten zeitlich höher aufgelöste Informationen zum Abnehmerverhalten und den Betriebszuständen im Wärmenetz gewonnen sowie für Lastmanagementmaßnahmen genutzt werden. Das Verbundvorhaben adressiert die speziellen Anforderungen an eine zukunftsfähige Digitalisierung für die Fern- und Nahwärmeversorgung auf drei Ebenen:

- Ebene 1: Technologische Ertüchtigung und Digitalisierung der Abnehmer und Prosumer im Wärmenetz, um Wärmelast- und Erzeugermodelle einschließlich des Temperaturniveaus von Vor- und Rücklauf zeitlich flexibel an das geänderte Abnehmer- bzw. Einspeiseverhalten zu adaptieren, aktive Regel- und Steuereingriffe zu unternehmen und neue Geschäfts- und Abrechnungsmodelle vorbereiten zu können;
- Ebene 2: Identifikation systemrelevanter Knoten im Wärmenetz und deren Implementierung in Gesamtstrategien der flexiblen, energetisch effizienten und thermohydraulisch sicheren Wärmebereitstellung und -verteilung (iKNOTEN);
- Ebene 3: Aufbereitung des Informationsgehaltes aus den Ebenen 1 und 2 für Betriebsführungs-, Optimierungs- und Prognosestrategien sowie für Geschäfts- und Abrechnungsmodelle sowohl auf der Ebene 1 als auch auf der übergeordneten zentralen, cloudbasierten Ebene (Third Party Infrastructure).

In einem Teilnetz der MVV wurden iKNOTEN zur Temperatur-, Volumenstrom- und Drucküberwachung in 15min-Auflösung installiert sowie Hausstationen (HAST) mit höher aufgelöster Datenübertragung (Messdaten des primärseitigen Wärmezählers in 15min-Takt und ggf. Vor- und Rücklaufdruck in 10min-Takt) ertüchtigt worden. Zudem wurde zusätzliche Messtechnik zur Erfassung der Betriebswerte in einer Beimischstation nachgerüstet.

Im Rahmen des Projektes DIGiHAST sollen auch folgende zwei Fragestellungen im Kontext der Betriebsoptimierung näher betrachtet werden:

- Wie wirkt sich die Absenkung der Vorlauftemperatur auf die zentrale Erzeugung aus?
- Welche Möglichkeiten der Betriebs- und Systemoptimierung bieten das Demand Side Management in fernwärmeversorgten Gebäuden?

Die Messdatenerfassung und Kommunikation sollte auch dabei helfen, die infolge von Effizienz- und Lastmanagementmaßnahmen im Bereich der Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung möglicherweise auftretenden kritischen Versorgungszustände an Abnehmerstationen rechtzeitig zu identifizieren.

2.6.3 Ergebnisse

Das Projekt besteht aus mehreren Arbeitspaketen und liefert daher Einblicke und Ergebnisse aus vier zentralen Themenbereichen:

- Kommunikationsstruktur & Datenmanagement,
- Datenauswertung zur Identifikation auffälliger Betriebszustände an den Hausstationen,
- Netzfahrversuche zur Absenkung der Vorlauftemperatur und
- Betriebsführungsoptimierung.

Kommunikationsstruktur & Datenmanagement

Für die Datenhaltung wurde die FIWARE-Plattform genutzt, wie sie durch das N5GEH-Serv-Projekt bereitgestellt wird. Abb. 2.10 zeigt beispielhaft den Datenfluss von einer HAST, dabei werden die Messdaten des primärseitigen Wärmezählers und ggf. der Druckmessung über ein LoRaWAN-Funknetz zunächst an ein Gateway und anschließend per LTE an einen Server übertragen. Von dort werden die Daten über das MQTT-Protokoll an die N5GEH-Plattform weitergeleitet, wo sie für Analyse- und Visualisierungszwecke gespeichert werden.

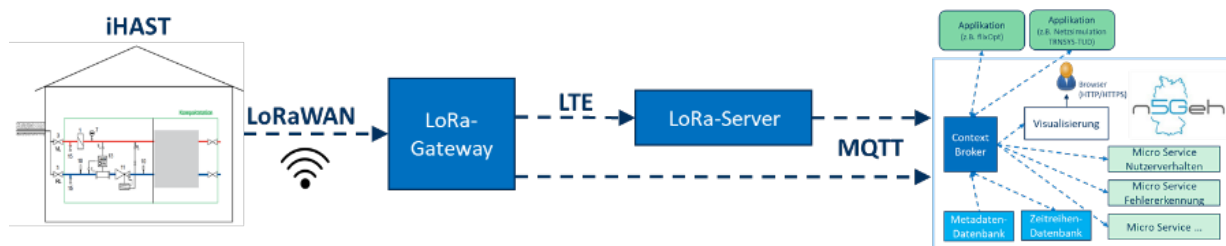


Abb. 2.10: Datenpfad der HAST-Messdaten

Mögliche Schwachstellen in der Datenübertragungskette ergeben sich insbesondere aus der begrenzten Bandbreite und Störanfälligkeit von LoRaWAN, potenziellen LTE-Verbindungsabbrüchen sowie fehlerhafter Konfiguration der MQTT-Verbindung. Ein robustes Datenmodell ist vor allem beim Zählerwechsel wichtig. Die Datenstruktur und das konkrete Datenmodell¹⁰ sind auf GitHub veröffentlicht. Die Datenvisualisierung in Form von Zeitreihen erfolgt in Grafana. Für weiterführende Datenauswertungen zur Identifikation auffälliger Betriebszustände oder der Diagnose von Fehlverhalten wurden eigene Anwendungen entwickelt. Diese werden zukünftig an die FIWARE-Plattform als Service angeboten.

¹⁰ GitHub Repo Datenmodell: https://github.com/gewv-tu-dresden/n5geh.data_models

Identifikation auffälliger Betriebszustände an den Hausstationen (HAST)

Es wurde ein Ansatz für Fehlererkennung und -diagnose entwickelt, bei dem eine automatisierte Analyse und Visualisierung von Wärmezählerdaten, die auf der N5GEH-Plattform ankommen, Python-basiert erfolgt. Dies erfordert ein detailliertes Verständnis der HAST, da nicht nur offensichtlich fehlerhafte Anlagen, sondern auch ungünstige Auslegungs- und Betriebsbedingungen in den Stationen eine häufige Ursache für erhöhte Netzzücklauftemperaturen bzw. andere Auffälligkeiten sind.

Um ineffizientes, auffälliges und unerwünschtes Verhalten einer HAST systematisch zu identifizieren, wurden vier wiederkehrende Betriebsmuster definiert, die jeweils mit potenziellen Ursachen verknüpft sind. Dazu gehören hohe Rücklauftemperaturen, sowohl hohe als auch niedrige hydraulische Auslastung, kontinuierlicher Volumenstrom außerhalb der Heizperiode sowie hydraulische Instabilität. Darüber hinaus werden HAST mit hoher hydraulischer Auslastung, aber optimaler Temperaturspreizung als hydraulisch kritisch eingestuft. Diese erfordern eine sorgfältige Untersuchung, bevor eine Absenkung der Vorlauftemperatur durchgeführt wird, um eine Unterversorgung zu vermeiden.

Das Monitoring der Kundenanlagen ermöglicht es den Stadtwerken, frühzeitig die Stationen mit ineffizientem Betrieb zu identifizieren und entsprechende Maßnahmen einzuleiten. Die Erkenntnisse der Messdatenanalyse wurden in OnePager (Abb. 2.11) zusammengefasst und dienen zukünftig der Kundeninformation.

Die Methodik wird an die N5GEH-Plattform als Service weitergegeben.

Netzfahrversuche zur Absenkung der Vorlauftemperatur

Die Reduzierung der Vorlauftemperaturen in Fernwärmenetzen ist entscheidend, um die Gesamteffizienz des FW-Netzes zu verbessern, Netzwärmeverluste zu minimieren und die Integration erneuerbarer Energiequellen zu ermöglichen. Ziel der Netzfahrversuche ist es, das veränderte thermohydraulische Verhalten des Fernwärmenetzes infolge der reduzierten Vorlauftemperatur systematisch zu erfassen und zu bewerten. Durch die Verknüpfung mit der N5GEH-Plattform konnten die Auswirkungen der Vorlauftemperaturabsenkung mittels iKNOTEN strangscharf analysiert werden.

Die Abb. 2.12 zeigt die Übersicht der eingestellten Vorlauftemperatur in fünf Fahrversuchen und eines Referenzfalls in der Heizperiode 2024/2025 mit einer maximalen Absenkung von 15 K.

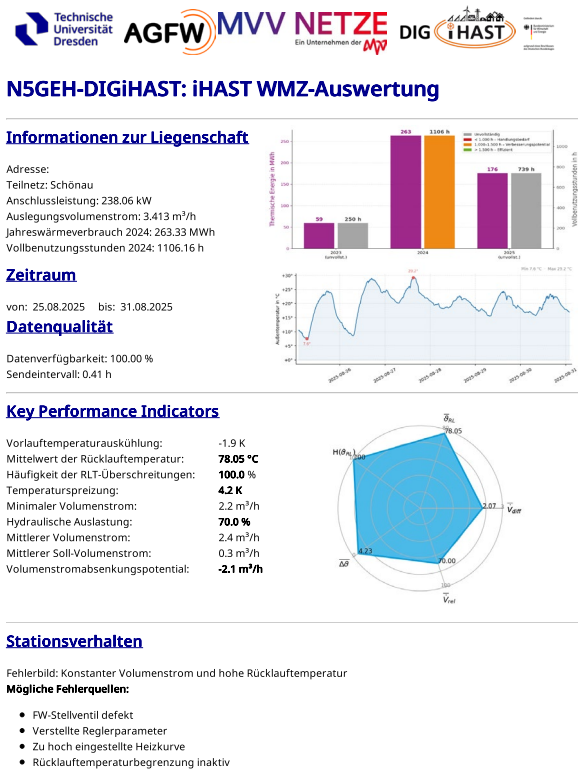


Abb. 2.11: OnePager WMZ-Auswertung

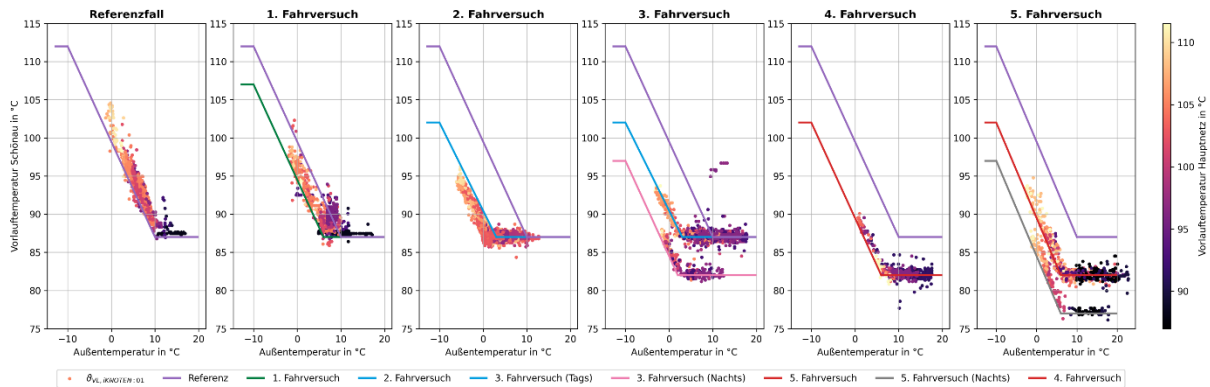


Abb. 2.12: Übersicht Vorlauftemperaturfahrweise während der Fahrversuche

Die Abweichungen zu den planmäßigen Fahrkurven sind auf die Regelgüte zurückzuführen. Während der Netzfahrversuche wurden weder Kundenbeschwerden noch hydraulische Probleme im FW-Netz festgestellt. Die Rücklauftemperatur blieb entweder unverändert oder stieg nur leicht (um ca. 2 K) an. Die Wärmeverteilungsverluste sinken infolge der Temperaturabsenkung, im Gegenzug steigt der Energiebedarf der Beimischpumpe.

Betriebsführungsoptimierung

Bereits bei kleineren Erzeugerparcs sind mögliche Investitionsentscheidungen, z.B. für zusätzliche Speicherrösungen oder die Investition in fernsteuerbare Regelungstechnik, und Betriebsweisen, sowohl der zentralen Erzeugung als insbesondere auch unter Beachtung von Demand-Side-Management (DSM), sehr vielfältig. Zur Vermeidung von Fehlinvestitionen und für die Bestimmung effizienter Fahrweisen sowie zur Identifikation versteckter Effizienzpotenziale ist die Anwendung von Optimierungssoftware zwingend. Für die Fragestellungen im DIGiHAST wurde das im Rahmen des Projektes SmartBioGrid¹¹ in Python entwickelte Optimierungs-Framework FlixOpt¹² genutzt.

Die ersten Ergebnisse zeigten ein großes Einsparungspotential, das durch den Einsatz von DSM bei bereits nur wenigen Abnehmern erschlossen werden kann. Zudem wirkt sich die zentrale Vorlauftemperaturabsenkung positiv auf die Performance regenerativer Erzeuger aus und reduziert den Einsatz fossiler Brennstoffe zur Spitzenlastdeckung. In den nächsten Schritten werden Kundenanreizmodelle entwickelt, um die theoretischen Ergebnisse zu konkretisieren. FlixOpt wird ebenfalls als Service zukünftig an die N5GEH-Plattform angeboten.

2.6.4 Ausblick

Die Digitalisierung in der Fernwärme einschließlich der kommunikativen Vernetzung von Komponenten bietet große Potenziale der Gesamtsystemoptimierung von der Erzeugung bis zum Fernwärmeabnehmer. Mithilfe der N5GEH-Plattform und des Service-Projektes konnten funktionale Kommunikationsstrukturen schnell eingerichtet werden. Zentrale Herausforderungen aus technischer Sicht waren dabei:

- Erstellung eines nachvollziehbaren, erweiterungsfähigen und robusten Datenmodells, die sowohl die Metadaten als auch die Messdaten vereint,
- Entwicklung der zuverlässigen Methodiken der (Mess-)Datenanalyse

¹¹ FKZ 03KB159B

¹² GitHub Repo FlixOpt: <https://github.com/flixOpt/flixopt>

Das in DIGiHAST entwickelte Datenmodell wurde dem N5GEH-Serv-Projekt zur Verfügung gestellt. Es besteht die Absicht, dieses Modell um die Sekundärseite der HAST zu erweitern und mit anderen N5GEH-Projekten weiter zu harmonisieren sowie Steuerungsfunktionen einzubinden. Außerdem werden die entwickelten Algorithmen der Datenauswertung durch experimentelle Untersuchungen sowie Hardware-in-the-Loop-Simulationen im Technikum der TUD verbessert und ebenfalls in Zusammenarbeit mit dem N5GEH-Serv-Projekt veröffentlicht.

2.7 Satellitenprojekt DIGiHeat

2.7.1 Projektsteckbrief

Name des Teilprojektes:	DigiHeat - Digitalisiertes Wärmekraftwerk für eine effizientere urbane Fernwärmeversorgung
Laufzeit:	November 2022 – vsl. April 2026
Förderkennzeichen:	03EN3065A-F
Beteiligte Organisationen:	• AGFW-Projektgesellschaft für Standardisierung, Rationalisierung und Information mbH • Stadtwerke Gießen AG • Stadtwerke Marburg GmbH • Stadtwerke Hanau GmbH • Danfoss GmbH • Fraunhofer – Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE)
Kontaktperson	Thomas Pauschinger, AGFW-Projekt GmbH
Branche:	Thermische Netze / Fernwärme
Anforderungen an die Datenübertragung:	• Datenübertragung (Intervall): 1s ... 1 min • Datenmenge: ca. 250000 Datenpunkte
Schwerpunkte / Schlagworte:	Digitalisierung im Fernwärmesektor, Digitalisiertes Wärmekraftwerk

2.7.2 Use Case

Das Vorhaben DigiHeat fokussiert auf Ansätze zum zielgerichteten und effizienzsteigernden Einsatz von Technologien zur Datenübertragung und -verarbeitung im Fernwärmesektor. Es kombiniert hierbei konkrete Digitalisierungsmaßnahmen der drei beteiligten Stadtwerke Gießen, Marburg und Hanau mit der Entwicklung und Praxiserprobung des innovativen Konzepts eines 'Digitalisierten Wärmekraftwerks'. Bei diesem wird die IKT-Systemarchitektur des virtuellen Kraftwerks, wie sie im Stromsektor bereits vielfach Anwendung findet, auf den Anwendungsfall Fernwärme vorgenommen. Der zielgerichtete und effiziente Einsatz von Kommunikationstechnologien und Datenübertragungsstandards soll dazu führen, dass ein Fernwärmesystem mit Erzeugern, Verteilung und Verbrauch möglichst effizient im Sinne eines 'Digitalisierten Wärmekraftwerks' betrieben werden kann. Dieses Maßnahmenbündel wird beispielhaft bei den drei beteiligten Stadtwerken implementiert und erprobt, um die wissenschaftlichen Ergebnisse direkt in Praxiserfahrungen übersetzen zu können. DigiHeat ist somit ein konkretes Umsetzungsprojekt für mittelgroße Stadtwerke mit unterschiedlichen Organisationsstrukturen aber identischen Herausforderungen im Digitalisierungsbereich. Durch die Aufbereitung und den aktiven Transfer der Projektergebnisse in die Fernwärmebranche, weist DigiHeat ein hohes Multiplikationspotenzial auf. DigiHeat gliedert sich in drei Arbeitsfelder:

Technologieanalyse Kommunikationstechnologien:

Die verfügbaren und im Fernwärmekontext relevanten Kommunikationstechnologien zur kabellosen Datenübertragung wurden systematisch auf Ihre Unterschiede hin beleuchtet. Eine detaillierte Gegenüberstellung soll dabei als Entscheidungshilfe für Energieversorgungsunternehmen dienen und für den jeweiligen Anwendungsfall und Unternehmenskontext zur passenden Kommunikationstechnologie hinleiten.

Die Umsetzung konkreter Digitalisierungsmaßnahmen bei den beteiligten Stadtwerken:

Die konkreten Digitalisierungsmaßnahmen der drei beteiligten Stadtwerke Gießen, Marburg und Hanau sind Teilschritte auf dem Weg zu einem perspektivischen Digitalen Wärmekraftwerk. Beispielfhaft werden folgende von den Stadtwerkepartnern umgesetzte Maßnahmen genannt:

- Stadtwerke Marburg: Digitalisierung der Schlechtpunktmessung zur Optimierung der Fahrweise der Netzpumpen; Ziel: Reduktion des Stromverbrauchs der Netzpumpe, bei gleichbleibend hoher Versorgungsqualität
- Stadtwerke Gießen: Nachrüstung eines Mischventils mit modellgestützter Vorlauftemperaturregelung für die Fernwärmeerzeugung in Lollar; Ziel: Reduzierung von Wärmeverlusten und Pumpstrombedarf
- Stadtwerke Hanau: Aufbau eines digitalen Zwillings für das Fernwärmesystem; Ziel: Optimierung des kompletten Netzbetriebs, Identifizierung von Engpässen und Kurzschlüssen, Planungsunterstützung für den Fernwärmeausbau

Die Entwicklung des Modells des „Digitalisierten Wärmekraftwerks“:

Das Digitalisierte Wärmekraftwerk beschreibt die datengetriebene und softwaregestützte Vernetzung von Wärmeerzeugung, -verteilung und -verbrauch innerhalb eines Fernwärmesystems. Wir sprechen beim DWK über Digitalisierungsmaßnahmen im gesamten Fernwärmesystem, einschl. Verteilung und Verbrauch. Jedoch bleibt beim DWK die betriebliche Optimierung dezentraler und verteilter Erzeuger als übergeordnetes Ziel erhalten. Im Rahmen des Vorhabens DigiHeat wird ein Teilmodul des DWK entwickelt, programmiert, implementiert sowie praktisch erprobt. Dieses Teilmodul dient zur Verbesserung von Netzmodellen wie LeanHeat z.B. bei der Netzausbauplanung durch die Einbindung von dynamischen (bisher statischen) Modellen von Verbrauchertypen (Kombinationen von Gebäude-, Anlagentechnik- und Übergabestationstypen).

2.7.3 Ergebnisse

Die für das Projekt benötigte IT-Infrastruktur wurde durch das Produkt „Leanheat Network“ des Projektpartners Danfoss bereitgestellt. Alle Elemente der IT-Infrastruktur, wie Datenmanagement und Kommunikation werden im „Leanheat-Framework“ abgebildet.

Die Möglichkeiten zur Anwendung der N5GEH-Plattform für die Bereitstellung der Eigenentwicklung, sowie die Integration mit der Leanheat-Plattform, wurden zwar im Projekt intensiv diskutiert. Jedoch lag der Fokus der Aktivitäten auf der Entwicklung der Methode und dem Aufsetzen eines Validierungsmodells. Für die Demonstration der Anwendung wurde eine lokale Implementierung des Modells verwendet. Ein intensiver und für das Satellitenprojekt DigiHeat nützlicher Austausch innerhalb der N5GEH-Plattform fand zu den Themen Datenerfassung, Standardisierung von Messstellenbezeichnungen und Datenmodellen statt. Basierend auf den im Projekt definierten Anwendungsfällen wurde ein Konzept zur digitalen Abbildung von Verbrauchern im Fernwärmenetz entwickelt. Ziel ist es, die Netzsimulation durch genauere Informationen über die Verbraucher zu verbessern, um den Betrieb des Gesamtsystems zu optimieren und die Netzausbauplanung zu unterstützen. Die herkömmliche Methode der Standardlastprofile wird aktuell im gesamten Anwendungsbereich für die Wärmenetzbe-rechnung eingesetzt. Dieses Verfahren kommt ebenfalls beim Projektpartner Danfoss zur Anwendung. Dabei wird den Wärmeleistungsbedarf einzelner Verbraucher durch skalierbare Stundenlastprofile abgebildet und für die Netzsimulation eingesetzt. Im Projekt wurde eine neue Methode zur digitalen Re-präsentation von Verbrauchertypen in Fernwärmenetzen entwickelt. Während der Stand der Technik Verbraucher als Standardlastprofile für die Netzauslegung und -optimierung betrachtet, verfolgt der

neue Ansatz:

- die Erstellung von standortspezifischen Lastprofilen
- und standortspezifischen Temperaturspreizungsprofilen für ausgewählte Verbrauchertypen
- anhand datengetriebener Ansätze
- und auf Basis hochauflösenden Wärmezählerdaten von Verbrauchern im Fernwärmenetz.

Der Einsatz von fernauslesbaren Wärmemengenzählern, nicht nur bei Schlüsselkunden sondern auch bei Haushalten, ermöglicht die Erfassung von hochauflösenden Wärmeverbrauchsdaten und legt die Grundlage für die genauere Abbildung einzelner Verbraucher. Während die Standardlastprofile ein statistisches Abbild für Verbraucher in ganz Deutschland darstellen, können datengetriebene Modelle, die auf Grundlage von Messdaten digitalisierter Verbraucher einer bestimmten Realität und Verbraucherklasse trainiert werden, eine genauere Repräsentation zusätzlicher nicht digitalisierter Verbraucher derselben Realität und Verbraucherklasse liefern. Darüber hinaus sollte der Ansatz ebenfalls ein Profil für die Temperaturspreizung an der Wärmeübergabe liefern. Diese zusätzliche Information sollte die nachgelagerte Netzsimulation verbessern, da aktuell nur Annahmen zu der Rücklauftemperaturniveau anhand bspw. der technischen Anschlussbedingungen (TAB) getroffen werden. Das Konzept wird in Abb. 2.13 schematisch dargestellt.

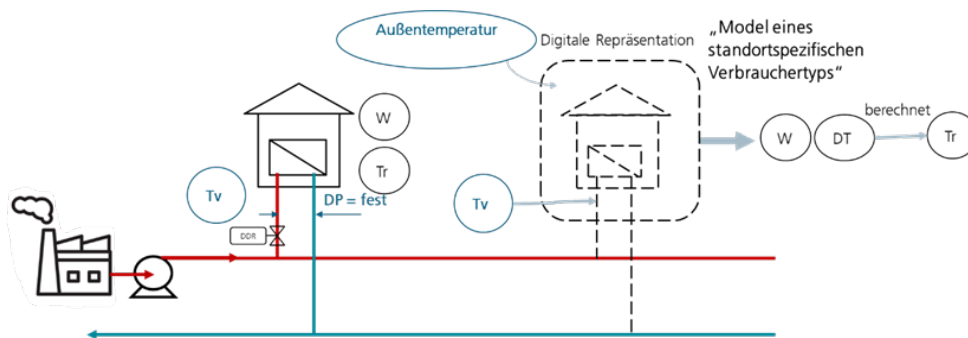


Abb. 2.13: Schematische Darstellung einer digitalen Repräsentation von standortspezifischen Verbrauchertypen im Fernwärmenetz

Der Ansatz ermittelt die jeweiligen standortspezifischen Stundenprofile für Wärmeverbrauch und Temperaturspreizung des abzubildenden Verbrauchers für einen spezifischen Verbrauchertyp und anhand vorgelegtem Referenzwertes der Außentemperatur und dem Jahreswärmebedarf. Das Vorgehen wird in Abb. 2.14 dargestellt.

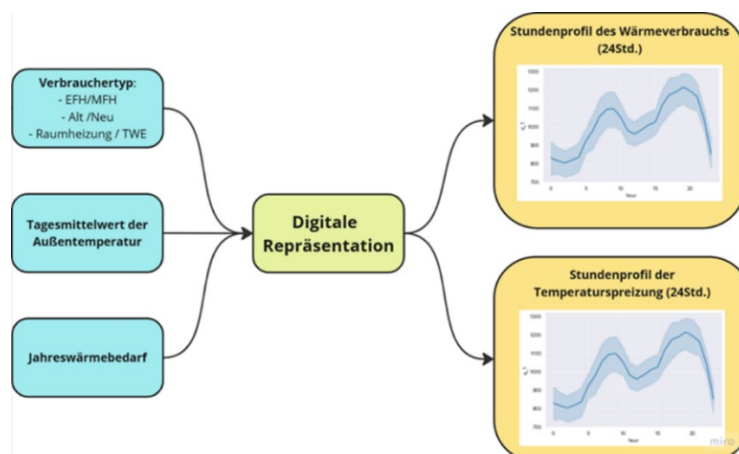


Abb. 2.14: Schematische Darstellung des Modells zur Ermittlung standortspezifischer Stundenprofile einzelner Verbraucher

2.7.4 Ausblick

Die Ergebnisse der Technologieanalyse von Kommunikationstechnologien wurde eine **Handreichung „Entscheidungshilfe für Kommunikationstechnologien“** praxisnah für die Versorgungsunternehmen aufbereitet. Sie steht auf der AGFW-Seite www.fernwaerme-digital.de im Wissensportal zum Download zur Verfügung. Sie wurde bei Veranstaltungen und durch Kommunikationsaktivitäten der Branche präsentiert und wird von den Unternehmen vielfach genutzt.

Praktische Erfahrungen und eine Bewertung von Nutzen und Aufwand der konkreten Digitalisierungsmaßnahmen wurden in **Steckbriefen zu den Anwendungsfällen** der beteiligten Stadtwerke zusammengefasst und auf diese Weise für weitere Branchenunternehmen aufbereitet.

Bezüglich der Weiterentwicklung des Digitalisierten Wärmekraftwerks wurde das **dynamische Modell für Verbrauchertypen** wie oben beschrieben als Teilmodul des DWK entwickelt, programmiert, implementiert sowie praktisch erprobt. Durch eine Implementierung in kommerziellen Softwarelösungen wie z.B. Danfoss LeanHeat kann eine breite Ergebnissenutzung in der Branche erreicht werden.

Sowohl die „Entscheidungshilfe für Kommunikationstechnologien in der Fernwärme“¹³ als auch die Steckbriefe zu den Anwendungsfällen werden im Wissensportal der AGFW-Plattform „Fernwärme digital“¹⁴ bereitgestellt.

¹³ https://www.fernwaerme-digital.de/fileadmin/Redakteure/fernwaerme-digital/Wissensportal/AGFW/251009_Brosch%C3%BCre_2.0_digitalversion_final_pub.pdf

¹⁴ <https://www.fernwaerme-digital.de/wissensportal>

2.8 Satellitenprojekt Locl4AR

2.8.1 Projektsteckbrief

Name des Teilprojektes:	Locl4AR – Location Intelligence im Bauwerk mit 5G für die augmentierte Realität
Laufzeit:	01.04.2022 - 30.09.2025
Förderkennzeichen:	03EN1059A-D
Beteiligte Organisationen:	• Internet Marketing Services GmbH (IMS) • IOX GmbH (IOX) • RWTH Aachen University, Geodätisches Institut & Lehrstuhl für Bauinformatik und Geoinformationssysteme (gia) • Wirtschaftsförderung im Landkreis Harburg GmbH (WLH)
Kontaktperson	Hendrik Tesche (E-Mail: tesche@ims.de)
Branche:	Gebäude- und Nutzerservices
Anforderungen an die Datenübertragung:	• Datenübertragung (Intervall): Übertragungsrate von ca. 20 Bildern der Auflösung von 640 x 640 Pixeln pro Sekunde
Schwerpunkte / Schlagworte:	Indoor-Positionierung und AR-Streaming in modernen Funknetzen, IoT-basierte Echtzeit-Sensordaten

2.8.2 Use Case

Die technische Gebäudeausrüstung (TGA) ist ein zentraler Bestandteil von modernen Gebäuden. Des- sen korrekte Funktion ist unter anderem für eine optimale Energieversorgung, Sicherheit und den Nutzerkomfort unerlässlich. Im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung und der steigenden Anforderungen an Energieeffizienz und Nachhaltigkeit hat sich die TGA durch die Vernetzung einzelner Komponenten sowie dem Einsatz intelligenter Steuerungs- und Sensortechnologien zu einem hochintegrierten System sektorübergreifender Komponenten entwickelt. Damit kommt der TGA eine zentrale Rolle bei der Umsetzung moderner, nachhaltiger und zukunftsorientierter Gebäudekonzepte zu. Parallel dazu verschärft sich der Fachkräftemangel, sodass insbesondere Handwerksunternehmen, Planer und Facility Manager vor der Herausforderung stehen, den effizienten Betrieb sicherstellen zu müssen. Folgendes Beispiel verdeutlicht die Problematik: Bei einer Störung der Klimaanlage in einem komplexen Bürogebäude ist die Fehlersuche zeitaufwändig, da oftmals zum Teil veraltete Papiergebäudepläne durchgesehen werden müssen, Anlagen und Leitungen (ggf. unter Putz) lokalisiert und Fehlerquellen Schritt für Schritt überprüft werden müssen. Vor diesem Hintergrund wurde das Forschungsprojekt N5GEH-LocI4AR initiiert. Ziel war die Entwicklung eines (prototypischen) mobilen standortgestützten Augmented Reality (AR)-Assistenzsystems zur Bereitstellung von relevanten visuellen Echtzeitinfor- mationen im Kontext und direkt im physischen Raum, um Wartungs-, Inspektions- und Installationsaufga- ben schneller und präziser auszuführen. Beispielsweise sollen so einem Handwerker eine visuelle Na- vigation zu den in Frage kommenden TGA-Komponenten bereitgestellt, relevante Informationen wie Temperatur am Objekt eingeblendet und verdeckte Leitungen dargestellt werden. Dadurch werden Betrieb und Instandhaltung nicht nur effizienter, sondern auch weniger fehleranfällig.

Gerade mittelständische (Handwerks-)Unternehmen, die in der Praxis überwiegend die Installations- und Inbetriebnahmeaufgaben sowie die Inspektions- und Wartungsdienstleistungen erbringen, kön- nen durch die Verwendung der AR-Technologie auf mobilen Endgeräten im hohen Maße profitieren. Mobile AR-Technologie bedarf jedoch einerseits einer schnellen automatischen und präzisen Lokalisie- rung (Innenraumpositionierung) der Endgeräte und andererseits einer schnellen Übertragung großer

Datenvolumina auf das Endgerät. Für beides bietet sich die Nutzung der Vorteile der modernen Funktechnologie 5G an bzw. kann erst mit dieser Technologie eine hinreichende Performanz erreicht werden. Auf diese Weise können Assistenzinformationen zielgerichtet und intuitiv Nutzern zur Verfügung gestellt werden, um die mitunter hochkomplexen Zusammenhänge bei Installation, Inbetriebnahme und im Betrieb der technischen Systeme vor Ort zu veranschaulichen und zu analysieren. Das Assistenzsystem birgt damit ein hohes Effizienzpotential und leistet einen Beitrag, die Energiesystemtechnik optimal und effizient zu betreiben.

2.8.3 Ergebnisse

Im Projekt N5GEH-LoCI4AR wurde prototypisch ein mobiles 5G-basiertes AR-Assistenzsystem für den Use Case entwickelt. Dafür mussten mehrere Herausforderungen gelöst werden:

- Die Aufbereitung der 3D-Gebäude- und TGA-Modelle für die Visualisierung in AR kann auf Grund der hohen Detailtiefe der geometrischen und semantischen Information (z.B. Abmessungen, Materialinformationen oder Herstellerdaten) mit zahlreichen kleinteiligen Einzelkomponenten sehr rechenaufwändig sein. Zur Speicherung und Visualisierung ist daher leistungsstarke Rechenhardware erforderlich.
- Nützliche, vor Ort sensorisch erfasste Daten (z.B. Temperatur, Luftfeuchtigkeit) stehen häufig nicht zur integrierten Visualisierung im Assistenzsystem zur Verfügung, da diese in isolierten Systemen ohne standardisierte, offene Schnittstellen gespeichert werden oder die Datenqualität und -frequenz für eine Echtzeitanwendung nicht ausreichend sind.
- Für die Navigation des Anwenders im Gebäude und die korrekte kontextbezogene AR-Visualisierung ist eine hohe Lokalisierungs Genauigkeit der Person bzw. des AR-Assistenzsystems erforderlich, die jedoch durch globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) auf Grund fehlender Himmelsfreiheit in Gebäuden nicht gegeben ist. Gleichzeitig sind alternative Lokalisierungsverfahren sehr rechenaufwändig, da diese u.a. komplexe Kamerabildverarbeitungen voraussetzen.

Die drei Herausforderungen konnten mit der in Abb. 2.15 dargestellten Systemarchitektur bestehend aus mehrere ineinandergreifenden Einzelkomponenten gelöst werden.

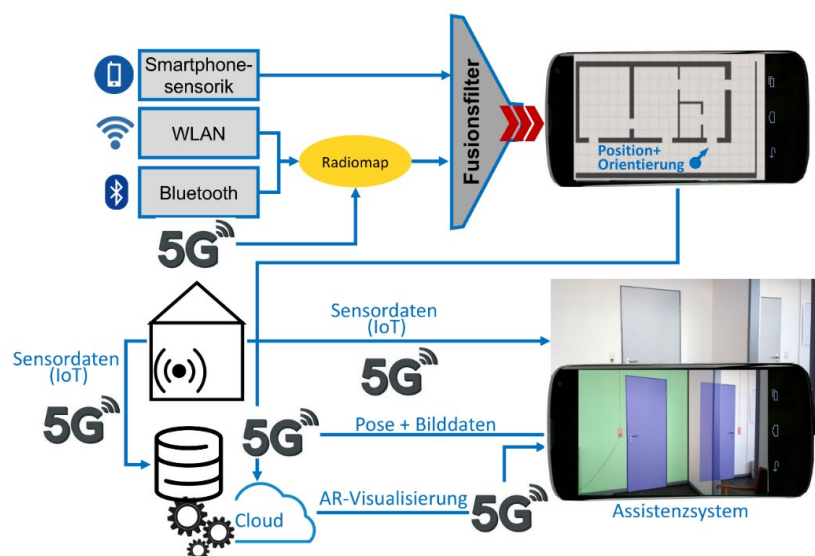


Abb. 2.15: Architektur der Lösung für das N5GEH-LoCI4AR-Forschungsprojekt.

AR-Smartphone-App

Als Hauptkomponente für den Anwender (z.B. Handwerker) wurde eine AR-Smartphone-App entwickelt, die eine mobile Nutzung des Assistenzsystems direkt am Einsatzort ermöglicht. Im Vordergrund standen eine maximale Zugänglichkeit und Minimierung der Hardware-Anforderungen. Die App ist konsequent für die Installation auf handelsüblichen Smartphones ausgelegt und dient primär als Visualisierungs- und Interaktionsschnittstelle. Die rechenintensiven Berechnungen werden serverseitig ausgeführt. Neben der AR-Darstellung zur Überlagerung digitaler Informationen (z.B. 3D-Modelle, Sensordaten) (Abb. 2.16) bietet die App einen Viewer zur Visualisierung digitaler 3D-Modelle (Abb. 2.17, links), sowie ein Sensordaten-Dashboard für die Echtzeit-Überwachung relevanter Messwerte (Abb. 2.17, rechts). Als Entwicklungsumgebung für die App wurde die Spiel-Engine „Unity“ verwendet, die eine plattformübergreifenden Bereitstellung der App ermöglicht (z.B. Android- und iOS-Smartphones).

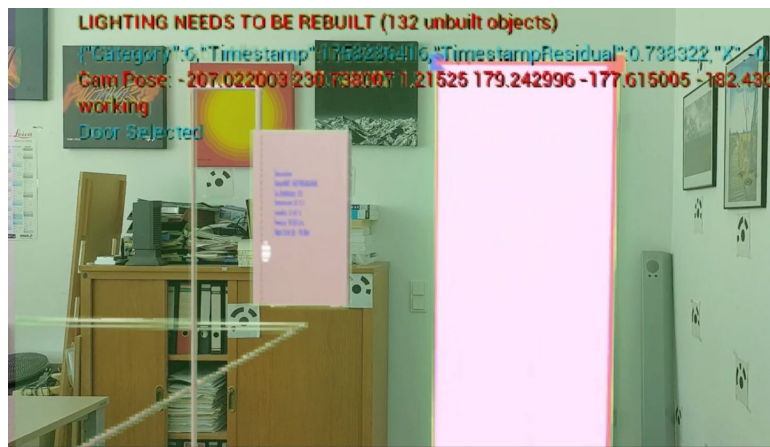


Abb. 2.16: Entwickleransicht des AR-Assistenzsystems mit überlagerter Tür und verdeckten Leitungen.

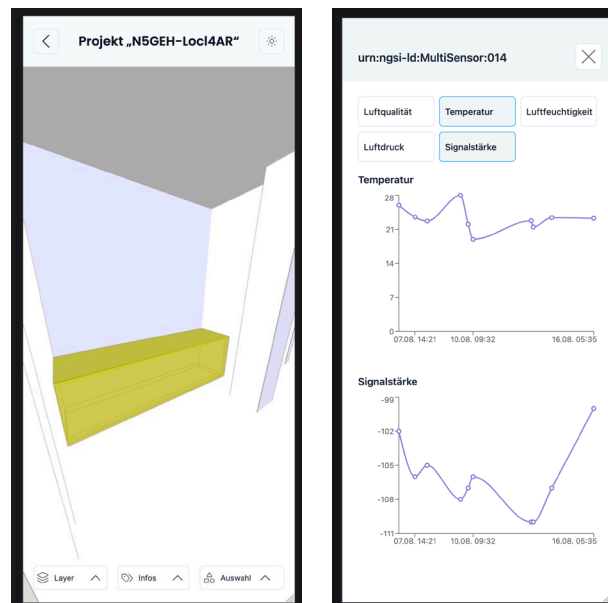


Abb. 2.17: BIM-Modell-Viewer (links), Sensordaten-Dashboard (rechts)

Building Information Modeling (BIM)

Für die Bereitstellung der detaillierten 3D-Gebäude- (Abb. 2.18) und TGA-Modelle (Abb. 2.19) sowie

umfangreicher semantischer Informationen integriert das Assistenzsystem Bauwerks- und TGA-Modelle nach der Methode BIM. Die Grundlage bildet der Austauschstandard „Industry Foundation Classes“ (IFC) gemäß ISO 16739. IFC-Modelle umfassen nicht nur die Geometrie der einzelnen Bauwerkskomponenten und deren Position im Raum, sondern auch semantische Daten zu bspw. Materialien, spezifischen Anlagenteilen und den Verknüpfungen dieser Komponenten. Die Modelldaten werden serverseitig importiert und vorgehalten, wodurch Hardwarelimitierungen auf der Seite der mobilen Endgeräte effektiv verhindert werden. Dies gewährleistet, dass die Anwender jederzeit auf die volle Informationsbreite zugreifen können.



Abb. 2.18: Außenansicht des BIM-Modells des Technologie- und Innovationspark Nordheide (TIP).

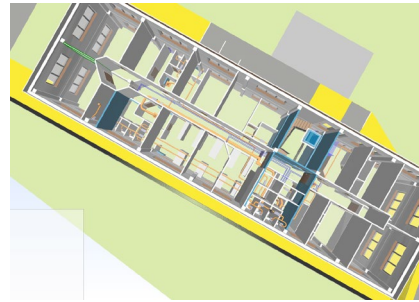


Abb. 2.19: Innenansicht des BIM-Modells des Technologie- und Innovationspark Nordheide (TIP).

Sensordaten

Für die Echtzeitbereitstellung von Sensordaten (z.B. Anlagenzustände) über das Internet of Things (IoT) wurde eine eigene Sensorhardware entwickelt (Abb. 2.20) und mit Sensoren unter anderem für die Temperatur, Luftfeuchtigkeit und den Luftdruck bestückt. Die Verwaltung der Sensoren erfolgt über die „smart.click“-Lösung. Die Sensordaten werden mit Hilfe des Open Source Frameworks „FIWARE“ verarbeitet, um eine standardisierte Bereitstellung zu gewährleisten. Im Fokus der Konzeption des Sensors standen technische und wirtschaftliche Anforderungen wie Kosteneffizienz durch eine geringe Infrastruktur und lange Batterielaufzeit, Zuverlässigkeit durch die Verwendung robuster Technik zur Reduzierung von Eingriffen und Zukunftssicherheit durch standardisierte Schnittstellen, um eine nahtlose Integration zukünftiger Technologien und Sensorerweiterungen zu ermöglichen und die Skalierbarkeit in den Vordergrund zu stellen.

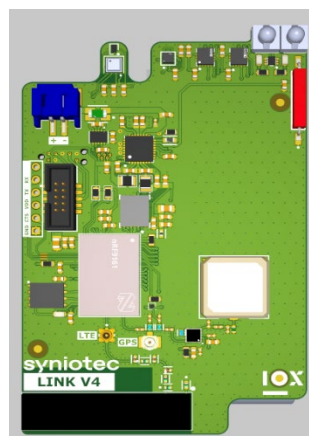


Abb. 2.20: Entwickelter Sensor.

5G-AR-Streaming

Um eine realistische Darstellung der komplexen 3D-Gebäude- und TGA-Modelle auf mobilen Endgeräten zu ermöglichen, wurde eine performante 5G-basierte AR-Streaming-Lösung entwickelt. Die grundlegende Idee hierbei ist die Auslagerung der rechenintensiven Visualisierungsprozesse auf einen dedizierten Server. Das Smartphone stellt kontinuierlich aktuelle Daten wie Kamerabilder, grobe Positionen und Nutzerinteraktionen per 5G bereit, die vom Server empfangen und verarbeitet werden. Als Ergebnis entsteht ein Videostream, der per 5G zur Visualisierung an das Smartphone zurückgesendet wird. Zur Erzeugung der Visualisierung auf dem Server wird, anders als bei der Smartphone-App, die Spiel-Engine „Unreal Engine“ verwendet, da sie umfangreiche Methoden für eine performante Visualisierung und das Videostreaming bereits nativ bereitstellt. Als Grundlage für das AR-Streaming wurde die WebRTC-basierte PixelStreaming-Technologie erweitert. Dabei schafft 5G die notwendige Basis für eine geringe Latenz und hohe Datenrate, welche die unabdingbare Voraussetzung für den Echtzeitbetrieb des AR-Streamings sind und eine verzögerungsfreie Darstellung auf dem Smartphone ermöglicht.

Präzise Lokalisierung im Gebäude

Zur präzisen Lokalisierung des Anwenders bzw. des mobilen Endgerätes im Gebäude wurde ein robustes Hybridverfahren ohne künstliche Marker (z.B. QR-Code) entwickelt, um die Navigation durch das Gebäude und eine lagerichtige Überlagerung der digitalen TGA-Modelle in der AR-Ansicht zu ermöglichen. Das Verfahren besteht aus einem zweistufigen Prozess:

Im ersten Schritt wird der grobe Standort (Grob-Position) innerhalb des Gebäudes bestimmt. Dabei werden verschiedene Datenquellen wie im Smartphone bereits eingebaute Sensoren (z.B. Beschleunigungsmesser), die existierende Infrastruktur (WLAN, BLE, 5G-Signale) und das BIM-Modell durch Sensorfusion miteinander kombiniert. Mit einem Partikelfilter wird die Berechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der aktuellen Position durchgeführt.

Für eine AR-Darstellung reicht die Grob-Position nicht aus. Daher wurde ein weiteres Verfahren zur Fein-Lokalisierung entwickelt, mit dem aus der Grob-Position eine Fein-Pose (Position und Orientierung) im Zentimeterbereich mit den notwendigen sechs Freiheitsgraden berechnet wird. Mit der Grob-Position als Eingangsinformation lässt grobe Position (z.B. der Raum des Gebäudes, in dem man sich befindet) bestimmen. Anschließend werden Kamerabilder in Kombination mit dem BIM-Modell mit dem Ziel verarbeitet, reale und virtuelle Objekte (in diesem Fall Türen) als visuelle Referenzobjekte anzugleichen. Im ersten Schritt wird dazu eine künstliche Intelligenz (KI)-gestützte Türerkennung mittels des KI-Objekt Detektors „You Look Only Once“ (YOLO) im Kamerabild durchgeführt. Spezielle visuelle Merkmale (Türkanten) werden im folgenden Schritt mit dem virtuellen BIM-Objekt abgeglichen, um die genaue Fein-Pose zu schätzen.

2.8.4 Ausblick

Die Hauptzielstellung, ein funktionsfähiges, mobiles AR-Assistenzsystem zur Effizienzsteigerung bei der Instandhaltung zu entwickeln, konnte erfolgreich erreicht werden und bildet eine solide Grundlage für Weiterentwicklungen hin zu einem marktfähigen Produkt. Der Prototyp hat gezeigt, dass die Kombination von 5G, BIM, IoT und KI-basierter Lokalisierung eine praktikable und wirkungsvolle Lösung darstellt. Insbesondere die nahtlose Überlagerung digitaler Informationen in der realen Umgebung und die deutliche Reduktion der manuellen Arbeitsschritte bestätigen den Erfolg. Durch die Nutzung von standardisierten Protokollen wie Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) und Open Source Schnittstellen wie „FIWARE“ kann die Lösung mit Plattformen wie der National 5G Energy Hub (N5GEH)-Plattform verknüpft werden. Dies ermöglicht den Datenaustausch mit anderen Projekten und die

zentrale Bereitstellung der Daten. Auch die Nutzung des BIM-Standard IFC trägt zur Standardisierung der Lösung bei, indem existierende 3D-Gebäude- und TGA-Modelle über IFC-Schnittstelle importiert werden können oder Modelle problemlos in anderer Software mit IFC-Unterstützung betrachtet, angepasst oder weiterentwickelt werden können. Leider fehlte während der Projektlaufzeit wider Erwarten der Zugang zu 5G-Hardware wie Beamforming-geeigneten Sendern oder Smartphones mit Zugang zu notwendigen 5G-Rohdaten, um die Grobpositionierungslösung im Rahmen der Sensorfusion weiter zu verbessern. Die Projektergebnisse werden in mehreren Schritten weiterverwendet und ausgebaut. Der Prototyp dient als Demonstrator für die technologischen Möglichkeiten der Digitalisierung im Energiesektor. Darüber hinaus sollen die gewonnenen Erkenntnisse in kommerzielle Produkte überführt werden, indem das Gesamtsystem oder einzelne Komponenten für den breiten Einsatz optimiert werden. Dies umfasst die Weiterentwicklung der Benutzeroberfläche, die Verbesserung der Lokalisierungsgenauigkeit und die Integration weiterer Funktionalitäten wie z. B. einen schrittweisen AR-Assistenten zur Durchführung einer Wartung oder die automatisierte Erstellung von Zustandsberichten. Langfristig soll die Lösung in eine umfassende Plattform für das digitale Gebäudemanagement eingebettet werden.

2.9 Satellitenprojekt Strom

2.9.1 Projektsteckbrief

Name des Teilprojektes:	STROM - 5G basierte Steuerungen für intelligente Batteriesysteme in modernen Stromnetzen
Laufzeit:	01.08.2022 bis 30.07.2025
Förderkennzeichen:	03EI6084A-C
Beteiligte Organisationen:	• Axtrion GmbH & Co.KG • BCM - Universität Bremen • FREQCON GmbH • IALB - Universität Bremen
Kontaktperson	Arne Schulz (E-Mail: arne.schulz@axtrion.com)
Branche:	Batteriespeicher/ Elektrische Netze
Anforderungen an die Datenübertragung:	• Datenübertragung: Unterstützung von Latenzen im Bereich weniger Millisekunden bis Sekunden
Schwerpunkte / Schlagworte:	Betriebsoptimierung vernetzter digital gesteuerter Batteriespeichersysteme

2.9.2 Use Case

Branche / Anforderungen

Der vorliegende Use Case ist in der Energiewirtschaft verortet, genauer im Bereich der vernetzten und digital gesteuerten Batteriespeichersysteme. Batteriespeicher werden zunehmend zu einem zentralen Bestandteil moderner Stromnetze, da sie Schwankungen aus regenerativen Energiequellen ausgleichen, Lastspitzen glätten und eine hohe Versorgungssicherheit gewährleisten können. Mit der wachsenden Zahl solcher Speicher entsteht jedoch die Herausforderung, ihre Betriebsführung nicht mehr lokal am Gerät, sondern koordiniert und über Standorte hinweg zu steuern. Dafür muss eine leistungsfähige digitale Infrastruktur geschaffen werden, die Daten zuverlässig transportiert, verarbeitet und zur Betriebsoptimierung nutzt.

Ausgangssituation

Vor Projektbeginn war eine solche integrierte Architektur in der Branche nur ansatzweise vorhanden. Batteriesteuerungen verfügten zwar über industrielle Kommunikationsschnittstellen, jedoch nicht über moderne IoT-Funktionen, die eine Einbindung in Cloud-basierte Energiemanagementsysteme erlauben. Die Kommunikation über das öffentliche Stromnetz, insbesondere bei Netzausfällen oder instabilen Betriebsbedingungen, war kaum abgesichert. Ebenso fehlte eine quantitative Bewertung der notwendigen Datenmengen und Übertragungszeiten: Wie viel Messinformation muss in welcher Geschwindigkeit transportiert werden, um verteilte Speicher synchronisieren zu können? Und wie bleibt der Speicher betriebsfähig, wenn die Netzwerkverbindung nicht durchgehend verfügbar ist?

Zielstellung

Axtrion adressiert genau diese Fragestellungen. Das Ziel des Use Cases besteht darin, eine vollständige, echtzeitfähige und skalierbare Daten- und Kommunikationsarchitektur für Batteriespeicher zu entwickeln und zu demonstrieren. Dazu wird der gesamte Informationsweg vom Feldgerät über eine IoT-Edge-Ebene bis in die Cloud technisch abgebildet, überwacht und bewertet. Im Mittelpunkt steht die Frage, wie schnell und wie zuverlässig Zustandsdaten übertragen werden können, um daraus Steuerungsentscheidungen abzuleiten, und zwar sowohl im Normalbetrieb als auch unter

Stressbedingungen. Resilienz ist dabei kein Zusatzmerkmal, sondern essenzieller Bestandteil.

Die Anforderungen des Use Cases lassen sich daher in drei technische Dimensionen einordnen: zeitkritische Datenübertragung, sichere Verarbeitung wachsender Datenvolumina und ein hochrobustes Design gegen Ausfälle. Erstens muss die Kommunikation Latenzen im Bereich weniger Millisekunden bis Sekunden unterstützen, da Frequenz- und Spannungsregelung nur in eng definierten Reaktionszeiten stabil möglich ist. Zweitens müssen kontinuierlich große Datenmengen aus Sensorik und Steuerung verarbeitet, gespeichert und visualisiert werden, sowohl zur Echtzeitbeobachtung als auch für historische Analysen. Drittens muss die Betriebsführung so gestaltet sein, dass sie auch bei Kommunikationsstörungen, IT-Angriffen oder Komponentenfehlern nicht zusammenbricht, sondern kontrolliert weiterläuft. Axtrion verfolgt hierfür einen hybriden Systemansatz: Die energietechnischen Funktionen bleiben lokal auf IoT-Edge- und SPS-Etage verankert, während übergeordnete digitale Dienste in einer sicheren Cloud bereitgestellt werden. Diese Kombination erlaubt eine zentrale Auswertung und übergreifende Steuerung, ohne die Resilienz vor Ort zu gefährden. Ergänzend entwickelt Axtrion digitale Zwillinge der Speicheranlagen, um Betriebsstrategien in realitätsnahen Simulationen vorab zu validieren und potenzielle Risiken frühzeitig zu erkennen. Mit der Umsetzung dieses Use Cases leistet Axtrion einen wesentlichen Beitrag zur Digitalisierung kritischer Energiesysteme. Die entwickelte Architektur zeigt, dass Batteriespeicher nicht nur physisch installiert, sondern auch virtuell abgebildet, analysiert und gesteuert werden können und dass eine netzweite Synchronisation grundsätzlich möglich ist. Die technische Zielstellung wurde so definiert, dass die im Projekt erzeugten Ergebnisse direkt in zukünftige Industrieimplementierungen überführt werden können: skalierbar, interoperabel, sicher und praxistauglich. Damit schafft Axtrion die Grundlage dafür, dass verteilte Speicherflotten zu einem aktiven, intelligenten Baustein in der Energieversorgung von morgen werden.

2.9.3 Ergebnisse

IT-Infrastruktur

Im Projekt wurde durch Axtrion eine vollständige, echtzeitfähige IT-Infrastruktur zur Vernetzung und Digitalisierung von Batteriespeichersystemen aufgebaut und erfolgreich validiert. Dabei stand die belastbare Datenübertragung zwischen Edge-Geräten und Cloud-Systemen im Zentrum, ergänzt um resiliente Mechanismen zur Sicherstellung des Anlagenbetriebs auch bei Kommunikationsstörungen.

Die entwickelte Architektur vereint eine Industrial Private Cloud, eine IoT-Edge-Ebene und eine skalierbare Serviceplattform in der Cloud. In der Cloud wurden digitale Zwillinge realer Batteriesteuerungen betrieben, sodass reale und simulierte Systemzustände kontinuierlich verglichen und getestet werden konnten. Die Edge-Systeme übernehmen die Kommunikation mit den Speicherkomponenten, bereiten die Mess- und Statusdaten auf, stempeln sie zeitlich sauber ab und stellen sie verschlüsselt für die Weiterleitung bereit. Ein wesentliches Merkmal ist die Fähigkeit zur asynchronen Übertragung und lokalen Pufferung, was sicherstellt, dass Daten nicht verloren gehen und der Speicherbetrieb stabil bleibt. Die Datentransport- und Persistenzschicht wurde als Microservice-Architektur aufgebaut. Dadurch konnte eine klare Entkopplung der Energiesystemdaten von Visualisierung, Analyse und etwaigen Cloud-Steuerungsdiensten erreicht werden. Dieser modulare Aufbau ermöglicht es, die Infrastruktur später um weitere Speicherstandorte, neue Gerätetypen oder zusätzliche Datenflüsse zu erweitern, ohne bestehende Komponenten zu beeinträchtigen. Ein besonderer Fokus lag dabei auf Performance-Messungen: Wie viele Daten lassen sich in definierter Qualität und Zeit übertragen? Welche Latenzen treten im Normalbetrieb und bei Netzdegradation auf? Diese Fragestellungen wurden mithilfe gezielter Testframeworks technisch beantwortet. Zur Sicherstellung der Integrationsfähigkeit hat Axtrion wesentliche Dienste eingebunden. Persistenz- und Monitoring-Dienste lieferten die Grundlage

für zuverlässige Historisierung und Echtzeit-Visualisierung von Systemparametern. Auch das Onboarding neuer Geräte über definierte Mechanismen wurde erfolgreich umgesetzt, womit die Architektur der Vision eines skalierbaren Energiesystems entspricht.

Eigenentwicklungen

Zentrale Projektergebnisse liegen in mehreren Eigenentwicklungen. Der digitale Zwilling ermöglicht eine realitätsnahe Simulation des Batterieverhaltens, ohne auf reale Hardware angewiesen zu sein. Die IoT-Edge-Software von Axtrion gewährleistet Sicherheit, Konsistenz und Resilienz in der Kommunikationskette. Cloudseitige Datenservices implementieren Transformationslogik, strukturierte Speicherung und standardisierte Schnittstellen zur Weiterverarbeitung. Zudem wurden Ansätze zur Synchronisation von Zustandsdaten über mehrere Standorte hinweg geschaffen; sie sind eine Voraussetzung für eine spätere netzdienliche Koordination verteilter Speichersysteme.

Problemlösungen

In der technischen Bewertung konnte Axtrion wesentliche Problemstellungen lösen, die heute den breiten Einsatz vernetzter Energiespeicher hemmen. Die bisher fehlende Echtzeit-Datenintegration wurde durch eine stabile Cloud-Ankopplung mit abgesicherten Datenkanälen erreicht. Die Untersuchung von Grenzparametern lieferte erstmals belastbare Werte für Datenraten, Latenzen und Ausfallverhalten. Durch die Nutzung von Standard-APIs wurde darüber hinaus ein hohes Maß an Interoperabilität erzielt, sowohl gegenüber zukünftigen N5GEH-Projekten als auch gegenüber weiterer Energietechnik. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Axtrion erfolgreich nachgewiesen hat, dass Batteriespeicher in die Cloud integriert werden können. Die Ergebnisse liefern eine belastbare technische Grundlage für die zukünftige Skalierung vernetzter Speicherflotten und bilden den Ausgangspunkt für automatisierte Betriebsstrategien sowie fortgeschrittene Services wie Predictive Maintenance oder netzdienliche Regelung. Die erarbeitete Infrastruktur ist damit nicht nur ein Demonstrator, sondern ein übertragbares Referenzmodell für künftige Digitalisierungsprojekte im Energiesektor.

2.9.4 Ausblick

Haupt Herausforderungen

Im Projekt wurden wesentliche Fortschritte in der cloudgestützten Vernetzung von Batteriespeichersystemen erzielt. Gleichzeitig haben sich zentrale Herausforderungen gezeigt, die bei einer Überführung in den industriellen Dauerbetrieb berücksichtigt werden müssen. Diese betreffen sowohl technische Grenzen der Echtzeitkommunikation als auch die regulatorischen Rahmenbedingungen der Energiewirtschaft. Aus technischer Perspektive stellte insbesondere die deterministische Übertragung von Energie- und Zustandsdaten eine Herausforderung dar. Obwohl Latenzen und Datenraten im Projekt analysiert und für die betrachteten Szenarien als ausreichend eingestuft wurden, existieren weiterhin Variabilitäten im Verhalten der Funkstrecke, die sich auf zeitkritische Netzsynchronszenarien auswirken können. Dies erfordert auch zukünftig Mechanismen zur lokalen, autonomen Regelung und eine robuste Priorisierung kritischer Daten. Darüber hinaus muss die Skalierbarkeit der Architektur im Kontext wachsender Speicherflotten weiter betrachtet werden, da mit steigender Gerätezahl sowohl die Komplexität des Datenmanagements als auch Anforderungen an Security- und Lifecycle-Management steigen. Aus regulatorischer Sicht besteht weiterhin ein Mangel an klaren Vorgaben für IT-Sicherheits- und Kommunikationsstandards im Energiesektor, insbesondere im Kontext von Cloud-Diensten außerhalb des klassischen Fernwirkbereichs. zukünftige Energiemarktdesigns, Datenschutzanforderungen sowie Anforderungen an die Nachweisführung müssen im Zusammenspiel von Cloud-Technologie und

kritischer Infrastruktur noch weiter harmonisiert werden. Der in diesem Projekt realisierte Ansatz bietet hier jedoch eine belastbare Diskussionsgrundlage, um technische Möglichkeiten und regulatorische Anforderungen zusammenzuführen.

Zielstellung

Die Zielstellung des Projekts konnte aus Sicht von Axtrion erreicht werden. Es wurde nachgewiesen, dass Batteriespeicher zuverlässig in Echtzeit in einer hybriden Architektur betrieben werden können, die sowohl 5G-Konnektivität als auch zentrale Cloud-Services einschließt. Alle definierten Kernfunktionen wie die sichere Datenerfassung, eine resiliente Übertragung, die Integration in IoT- und Monitoring-Plattformen sowie die digitale Abbildung der Speicheranlage, wurden validiert und dokumentiert. Die technische Wirksamkeit wurde durch Performance- und Ausfallszenarien anhand realer Testaufbauten belegt. Der Betrieb eines digitalen Zwillings im Zusammenspiel mit realer Hardware hat sich als technisch belastbar erwiesen und unterstützt die Vorbereitung zukünftiger Betriebsstrategien wie vorausschauende Wartung oder verteilte Optimierung.

Weiterverwendung/-entwicklung

Die Projektergebnisse werden gezielt weiterentwickelt. Einerseits dient die geschaffene Infrastruktur als Basis für Folgeprojekte mit Fokus auf industrielle Skalierung, beispielsweise zur Anbindung weiterer Speichertechnologien oder zur Einbindung in virtuelle Kraftwerke. Andererseits werden die Software-Komponenten modular erweitert, etwa in Richtung cyberphysischer Sicherheitsmechanismen, dynamischer Lastmanagement-Algorithmen oder Verbundregelung mehrerer Energiestandorte. Zudem wird die Interoperabilität mit Systemen der Netzbetreiber weiter ausgebaut, um eine perspektivische netzdienliche Einbindung zu ermöglichen. Eine wesentliche Erkenntnis des Projekts ist, dass die Verbindung zwischen Edge-Intelligenz und Cloud-Services einen idealen Ansatzpunkt darstellt, um die Betriebsführung zu automatisieren und marktliche wie regulatorische Anforderungen abzubilden. Die enge Verzahnung mit Elementen der N5GEH-Plattform hat sich bewährt: IoT-Integration, Datenmodellierung und Monitoring wurden erfolgreich implementiert und bilden die Grundlage für die zukünftige Nutzung der Plattform als Systemhub für Energiedaten. Dadurch entstehen klare Mehrwerte für die Weiterverwendung der Projektergebnisse innerhalb des Ökosystems des National 5G Energy Hub. Insgesamt zeigt der Ausblick, dass die verfolgte Systemarchitektur nicht nur ein funktionsfähiger Demonstrator bleibt, sondern den Einstieg in eine übergreifende digitale Infrastruktur zur sicheren und skalierbaren Integration von Energiespeichern bildet. Die Ergebnisse sind direkt verwertbar und eröffnen neue Einsatzmöglichkeiten sowohl im Industrieumfeld als auch in der kritischen Energieversorgung. Damit leistet das Projekt einen substanziellen Beitrag zur Weiterentwicklung moderner Smart-Grid-Ansätze und zur Beschleunigung der Energiewende.

3 Zusammenfassung und Entwicklungspfade

Die Projektbeschreibungen zeigen, dass eine große Breite an technischen Anwendungen mit der N5GEH-Plattform adressiert werden konnte. Obwohl sowohl branchen- als auch projektspezifisch sehr individuelle Anforderungen und Use Cases bestehen, sind die grundsätzlichen Prozesse der Datenverarbeitung vergleichbar und in mehreren Projekten können die FIWARE Kernkomponenten zur Umsetzung der Use Cases genutzt werden. Eine hohe Schnittmenge zwischen den Projekten ergibt sich bezüglich der Datenmodelle. Hier fand ein besonders intensiver Austausch zwischen den Projekten statt und es konnten branchenspezifische Referenzimplementierungen erarbeitet werden. Zusammenfassend lassen sich aus den Ergebnissen der Satellitenprojekte folgende Hauptherausforderungen bzw. Entwicklungspfade ableiten.

Technische Herausforderungen

- **Integration in kritische Infrastrukturen**
Einbindung von IT- und IoT-Plattformen in sicherheitskritische Umgebungen (z. B. Flughafen, Energieversorgung) mit hohen Anforderungen an Verfügbarkeit, Zugriffskontrolle und IT-Sicherheit.
- **Heterogene Kommunikationsstandards und Übertragungsprotokolle**
Integration und Harmonisierung unterschiedlicher Kommunikationstechnologien und Protokolle (5G, Mesh, IoT, mioty, LoRaWAN, Modbus/TCP, BACnet, MQTT) einschließlich klar definierter Schnittstellen zur Sicherstellung von Interoperabilität und Wartbarkeit.
- **Datenmodelle und Wissensrepräsentation**
Entwicklung nachvollziehbarer, erweiterbarer und reproduzierbarer Datenmodelle sowie Ontologien und Wissensgraphen, die Metadaten, Messdaten und Anlagenbeschreibungen konsistent abbilden.
- **Automatisierung und Skalierbarkeit**
Automatische Integration neuer Messpunkte, Sensoren und Anlagen in Kommunikationsinfrastrukturen, Datenmodelle und Wissensgraphen zur Sicherstellung der Skalierbarkeit bei wachsender Geräte- und Anlagenzahl notwendig.
- **Algorithmen und Betriebsoptimierung**
Entwicklung robuster Algorithmen für Datenaggregation, Analyse, Fahrplanerstellung, Betriebsführung und modellprädiktive Regelung unter Berücksichtigung variabler Systemzustände und eingeschränkter Kommunikationsintervalle.
- **Echtzeit- und Zuverlässigkeitsanforderungen**
Umgang mit begrenzter Verfügbarkeit und Latenzvariabilitäten drahtloser Kommunikation; Notwendigkeit lokaler Edge-Intelligenz, autonomer Regelungen und Priorisierung kritischer Daten.
- **Software- und Servicearchitekturen**
Aufbau stabiler, containerisierter Service-Strukturen für den Dauerbetrieb; Weiterentwicklung früher Softwarestände hinsichtlich Robustheit, Nutzerfreundlichkeit und Lifecycle-Management.
- **Feldtests und praktische Validierung**
Überführung von Labor- und Simulationsansätzen in reale Feldtests und Demonstratoren, inklusive Integration in bestehende Systeme und Betriebsprozesse.

- **Hardwareverfügbarkeit und -reife**
Einschränkungen durch begrenzte Verfügbarkeit marktreifer Hardware (z. B. V2G-Ladestationen, 5G-Hardware mit erweiterten Funktionen).

Regulatorische Herausforderungen

- **Datenschutz (DSGVO):**
Umsetzung strenger Datenschutzanforderungen, insbesondere bei Cloud-Nutzung, durch EU-konforme Datenhaltung, Zugriffskonzepte und sichere Datenübertragung.
- **IT- und Cybersicherheit:**
Erfüllung hoher Sicherheitsanforderungen mittels VPN, TLS, Rollen- und Berechtigungskonzepten; fehlende einheitliche Vorgaben für Cloud-basierte Systeme im Energiesektor.
- **Fehlende Standards und Marktregeln:**
Unzureichend definierte regulatorische Rahmenbedingungen für Energiehandel, bidirektionales Laden (V2G), Rückspeisung, Abrechnung, Zertifizierung und Netzkompatibilität.
- **Nachweis- und Compliance-Anforderungen:**
Offene Fragen zur Nachweisführung, Auditierbarkeit und regulatorischen Anerkennung cloudbasierter Steuerungs- und Optimierungslösungen in kritischen Infrastrukturen.

Insgesamt zeigten die Ergebnisse des thematischen Verbunds, dass die Kombination aus standardisierten Plattformen (FIWARE/N5GEH), offenen Datenmodellen, Edge-Cloud-Architekturen und enger Abstimmung zwischen Technik, Betrieb und Regulierung entscheidend ist, um digitale Energiesysteme skalierbar, sicher und marktfähig umzusetzen.