Schlussbericht des Fördervorhabens BEST: Blockchainbasiertes dezentrales Energiemarktdesign und Managementstrukturen

der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.
für Ihr Institut für offene Kommunikationssysteme FOKUS
Kaiserin-Augusta-Allee 31, 10589 Berlin

Förderkennzeichen: 03EI4017B
Bewilligungszeitraum: 01.01.2021 bis 30.09.2024

Autoren: Dr. Armin Wolf, Karsten Isakovic, Christian Fuhrhop

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Stand: 03.12.2024

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung ... 3
1 Aufgabenstellung ... 3
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde ... 4
3. Planung und Ablauf des Vorhabens ... 4
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde ... 5
4.1 … hinsichtlich des Koordinators ... 5
4.2 ... hinsichtlich der graphischen Benutzerschnittstelle ... 5
4.3 … hinsichtlich der optimierten Betriebsstrategie ... 6
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen ... 6
II. Eingehende Darstellung ... 6
1. Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse ... 6
1.1 Projektmanagement (AP0) ... 7
1.2 Zentrales Managementsystem (AP 3) ... 7
Sicherheitsarchitektur ... 8
Unterstützende Arbeiten ... 9
Migration des Marktkomponenten auf eine Cloud Infrastruktur ... 10
1.2.1 Koordinator (AP 3.1) ... 10
Integration des Koordinators in die Simulationsumgebung ... 11
Übergang zum Feldtest ... 13
1.2.2 Grafische Benutzerschnittstelle (AP 3.2) ... 13
1.2.3 Optimierung Betriebsstrategie (AP 3.3) ... 17
1.2.4 Anschluss der Teilnehmer an das zentrale Managementsystem (AP 6.2) ... 19
1.2.5 Begleitung von Tests in der Praxisphase (AP 6.5) ... 19
2. Wichtigste Positionen im zahlenmäßigen Nachweis ... 19
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit ... 20
4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse ... 20
5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen ... 21
6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen ... 21

I. Kurze Darstellung

1 Aufgabenstellung

Die zunehmende volatile Einspeisung ins Stromnetz und wachsende Dezentralität erneuerbarer Energieanlagen führt zu neuen Herausforderungen bei der Nutzung und effizienten Verteilung des elektrischen Stroms. Daher wurde die Entwicklung einer Strommarkthandelsplattform auf Basis eines Strommarktbietersystems (SMBS) angestrebt, mit dem die Verteilung und der Handel von Strom effizienter und netzdienlich erfolgen sollte. Ziel dabei war die Etablierung eines Echtzeitmarktes, der dem Wandel der Stromerzeugung mit stark schwankender Einspeisung durch erneuerbare Energie aber auch volatilem Verbrauch, z.B. durch Elektromobilität, gerecht wird. Durch Verwendung der Blockchain-Technologie sollte die Zusammenführung von Angebot und Nachfrage im Stromhandel abgesichert und gleichzeitig eine transparente Darstellung von Informationen ermöglicht werden. In einer Praxisphase sollten Energieanlagen über ein zu entwickelndes zentral koordinierendes Managementsystem an das SMBS angeschlossen werden.

Die Komponenten des BEST-Systems sollten im Projekt entwickelt oder bereits verfügbare Software weiterentwickelt und für die Integration in das System angepasst werden. Die Koordinator-Komponente sollte die einzelnen Softwarepakete miteinander verbinden. Weiterhin sollte eine Komponente zur Optimierung der Betriebsstrategie der Anlagen entwickelt werden, damit ein netz- bzw. marktdienlicher Betrieb der Anlagen erfolgen kann und mögliche Preisvorteile generiert werden können. Als ein weiteres Softwarepaket sollte eine Pooling-Plattform entwickelt werden, über die sich Anlagen unterschiedlicher Nutzer zusammenschließen lassen. Das frei verfügbare Energiemanagementsystem OpenEMS sollte zur Steuerung der technischen Anlagen genutzt werden. Ferner sollte durch eine grafische Benutzerschnittstelle den Marktteilnehmenden einen Überblick über Transaktionen und gehandelte Energiemengen sowie über Entscheidungs- und Gebotsparameter gegeben werden. Im Verlauf des Projektes sollten die aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen erfasst und die Ausgestaltungsmöglichkeiten und Grenzen für das konzeptionierte Marktsystem festgelegt werden. Darüber hinaus sollten Änderungsvorschläge zu den Rahmenbedingungen erarbeitet werden, unter denen das Potential des SMBS durch eine sinnvolle Nutzung der Flexibilität des Strommarkts gesteigert werden kann.

Um die Praxistauglichkeit der Software zu erreichen, sollten das SMBS und die anderen Komponenten einem Testverfahren unterzogen und verbessert werden. Danach sollten in einem mindestens sechsmonatigen Praxiseinsatz das BEST-System unter realen Bedingungen erprobt werden. Die Verbreitung von Projektergebnissen in die Energiebranche sollte durch Publikationen in Fachzeitschriften und Präsentationen vor Fachpublikum erfolgen.

Zentrales Teilziel von Fraunhofer FOKUS im BEST-Projekt war die Entwicklung eines zentralen Managementsystems für dezentrale (lokale) Energiemärkte, um Interaktionen zwischen Stakeholdern der Energiewirtschaft, Erbringung dezentraler Erzeugungs- und Verbrauchsangebote sowie Steuerung und Überwachung dezentraler Energieanlagen IuK-technisch zu unterstützen. Dazu sollte Fraunhofer FOKUS anhand von Use-Cases die Anforderungen an ein solches System und dessen Einzelkomponenten erfassen und die zu unterstützenden Interaktionen zwischen Stakeholdern, Systemkomponenten und Anlagen spezifizieren. Basierend darauf sollte Fraunhofer FOKUS gemeinsam mit den involvierten Partnern die komponentenbasierte Gesamtarchitektur des zentralen Managementsystems ausarbeiten und die jeweils zu leistenden Arbeiten mit den Partnern abstimmen und als Leiter des entsprechenden Arbeitspakets koordinieren. Darüber hinaus sollte Fraunhofer FOKUS eine graphische Bedienoberfläche schaffen, um energiewirtschaftliche Prozesse zu visualisieren und um interaktiv darauf einwirken zu können. Weiterhin sollte Fraunhofer

FOKUS mit Know-how und Algorithmen zum optimalen Betrieb dezentraler Energieanlagen beitragen.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Voraussetzungen waren gerade zu Beginn des Vorhabens alles andere als ideal, da der Projektstart in die Corona-Pandemie fiel. Das Konsortium musste daher lange Zeit auf Präsenztreffen verzichten. Die Umstellung auf virtuelles Arbeiten und in virtuellen Teams erforderte die Erprobung neuer Vorgehensweisen. Auch die technische Ausstattung dazu musste noch ergänzt werden.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Entsprechend der erstellten Projektplanung verlief das Projekt in mehreren Phasen, deren Ende jeweils durch einen Meilenstein markiert war. In der ersten Phase zur Konzeption des Strommarktbietersystem und zu dessen gutachterlichen Prüfung war Fraunhofer FOKUS nicht involviert, jedoch in den nachfolgenden Phasen des Projekts, als es um die technische Umsetzung dieses Systems ging. Unser Schwerpunkt lag dabei auf der Entwicklung eines zentralen digitalen Managementsystems, um den Teilnehmenden einen dezentralen Stromhandel dezentralen Stromhandel zu ermöglichen. Dazu sollten die erforderlichen Interaktionen zwischen Stakeholdern der Energiewirtschaft, die Erbringung dezentraler Erzeugungs- und Verbrauchsangebote sowie die Steuerung und Überwachung dezentraler Energieanlagen informationstechnisch und kommunikationstechnisch unterstützt werden. Dazu wurden anhand von Use-Cases die Anforderungen an ein solches System und dessen Einzelkomponenten erfasst und die zu unterstützenden Interaktionen spezifiziert. Darauf aufbauend wurde mit den Partnern (fortiss, RLI, EFL und e-regio) ein komponentenbasiertes, serviceorientiertes Gesamtsystem entworfen, abstimmt und realisiert. Fraunhofer FOKUS koordinierte als leitender Partner des entsprechenden Arbeitspakets 3 die Entwurfs-, Abstimmungs- und Entwicklungsarbeiten und unterstützte die Partner durch Komponententests, Dokumentation von Fehlern und bei der Behebung von Fehlern und der Auflösung von Inkompatibilitäten. Die Arbeitsschwerpunkte von Fraunhofer FOKUS innerhalb des Arbeitspakets 3 lagen auf dem Design und Entwicklung der Koordinator-Komponenten (AP 3.1), einer graphischen Benutzerschnittstelle (AP 3.2) und der Ausarbeitung eines Optimierungsmodells im Rahmen einer optimierenden Betriebsstrategie (AP 3.3).

Die Inbetriebnahme des verteilten, asynchron arbeitenden Softwaresystems erforderte das Deployment zentraler Komponenten auf einer Cloud-Infrastruktur sowie das Deployment dezentraler Komponenten auf lokalen Rechnern der (virtuellen / realen) Teilnehmenden (sowohl elektrische Energie Anbietende als auch Nachfragende) am Strommarktbietersystem. Das galt sowohl für das Basissystem zur Integration in die Laborumgebung bei fortiss zur Durchführung von Simulationen als auch für das lauffähige Gesamtsystem zur Durchführung von Praxistests im Feld. Sowohl beim Deployment als auch beim Betrieb des Strommarktbietersystems im Labor und im Feld haben wir die Projektpartner unterstützt, insbesondere während der abschließenden Testphase des Strommarktbietersystems in der Praxis beim technischen Anschluss der Teilnehmer an das zentrale Managementsystem (AP 6.2). Weiterhin hat Fraunhofer FOKUS in der Testphase die Arbeiten der Partner begleitet und bei der Feststellung und Behebung von Ausfällen und Fehlern, die sich im Labor- und Praxisbetrieb ergeben haben, aktiv unterstützt (u. a. im AP 6.5).

In allen Projektphasen fand eine enge Zusammenarbeit mit den Projektpartnern statt. Durch die Corona-Pandemie konnten viele Meetings nur online durchgeführt werden. Dabei bestanden vor allem zu Beginn des Projektes erhebliche Probleme aufgrund fehlender technischer und softwaretechnischer Ausstattungen und Erfahrungen der Projektpartner. Fachliche Einarbeitung, Anforderungsanalyse und die gemeinsame Arbeit zur Erstellung eines Systementwurfs stellten sich als Herausforderungen dar. Daher und aufgrund weiterer

Ereignisse (u.a. Hochwasserkatastrophe 2021) kam es zu Verzögerungen im Projektverlauf, die mehrfache kostenneutrale Verlängerungen des Projekts um insgesamt 9 Monate erforderte, so dass das Projekt Ende September 2024 erfolgreich beendet werden konnte (ursprüngliche Projektplanung, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden w erden.**).

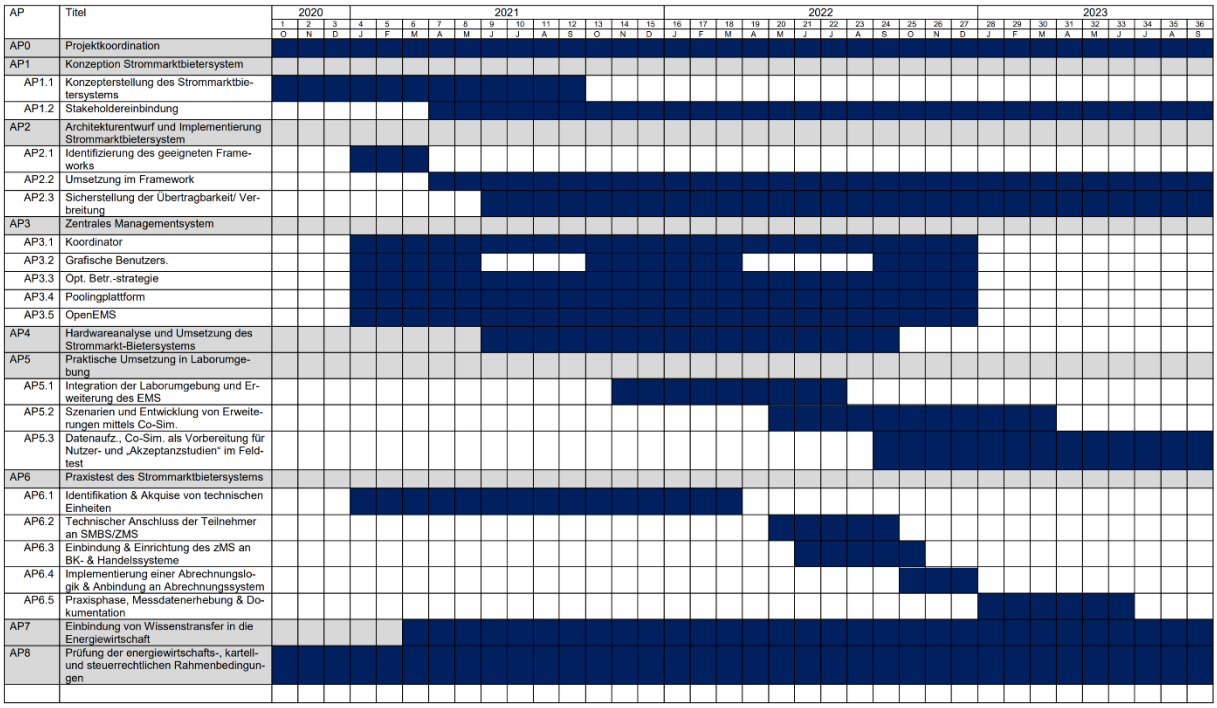

Abbildung 1: Ursprünglicher Zeitplan

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1 … hinsichtlich des Koordinators

Die für das BEST-Projekt entwickelte Sicherheitsarchitektur basiert auf Erfahrungen aus dem FlexCoop H2020-Projekt, für das Fraunhofer FOKUS die Sicherheitsarchitektur entwarf und Funktionalitäten zur oAuth-2.0-basierten Nutzer- und Komponenten-Authentifizierung bereitstellte. Des Weiteren entwickelte Fraunhofer FOKUS im FlexCoop-Projekt eine Device-Registry zur zentralen Verwaltung der vom System gesteuerten Geräte. Die im BEST-Projekt entwickelte Registry verwaltet hingegen die statischen Basisdaten und Pools der Prosumenten und ist Teil der Sicherheitsarchitektur. Die Erfahrungen aus dem FlexCoop-Projekt flossen dabei in die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Registry ein.

Die zusammen mit dem FlexCoop-Partner CIMNE entwickelte benachrichtigungs-orientierte Middleware lieferte die Erkenntnis, dass für das BEST-Projekt eine frühzeitig eingeführte, automatische Schnittstellen-Validierung auf Basis von Schema-Definitionen ein gutes Werkzeug zur Vermeidung von späteren Integrationsproblemen bei getrennt entwickelten Komponenten ist.

4.2 ... hinsichtlich der graphischen Benutzerschnittstelle

Basis für die Entwicklung der GUI war OpenEMS (https://openems.io/), ein Open Source Energy Management System. OpenEMS zielt primär auf die Steuerung und Integration von Energiequellen und Energieverbrauchern. Zusätzlich stellt OpenEMS umfangreiche Funktionen zur Anzeige des aktuellen Energieflusses und von täglichen, monatlichen und jährlichen Übersichtsgrafiken vergangener Energieflüsse bereit.

OpenEMS stellt eine sinnvolle Basis für Entwicklungen im Bereich des Energiemanagements dar, da Anbindungen und Treiber für eine große Anzahl von Geräten bereitstehen, welche im Rahmen von AP 3.5 teilweise für BEST erweitert und ergänzt wurden.

Es gibt in OpenEMS jedoch keine Funktionalität, welche sich auf den Strommarkt bezieht, so dass, basierend auf OpenEMS Edge und OpenEMS UI, alle entsprechenden Anzeige- und Kontrollfunktionen zu Handelsgruppen, Marktpreisen und Handelsvolumen im Rahmen von BEST durch Fraunhofer FOKUS hinzugefügt wurden.

4.3 … hinsichtlich der optimierten Betriebsstrategie

Im bereits genannten H2020-Projekt FlexCoop wurde zusammen mit weiteren europäischen Projektpartnern eine optimierte Betriebs- und Handelsstrategie für Wärmepumpen am niederländischen Flexibilitätenmarkt entwickelt und die Auswirkungen dieser Strategie exemplarisch untersucht.[1] Im ehemals vom BMWi geförderten Projekt WaveSave (Förderkennzeichen 03ET1312A) wurde für Energiesysteme in Gebäuden eine sektorenübergreifende optimierende Betriebsstrategie zur Kostenreduktion sowie zur Erhöhung des Eigenverbrauchs und der Eigenständigkeit entwickelt. Dabei wurde (erneut) die hohe Relevanz einer guten Datenlage, nämlich von guten Prognosen zu den Energiebedarfen und -dargeboten, festgestellt, ohne die eine Umsetzung der erarbeiteten Betriebsstrategie und damit die Optimierung von Energiesystemen kaum möglich ist.[2] Die in beiden Projekten gesammelten Erfahrungen bei der Modellierung von Betriebsstrategien als Optimierungsprobleme unter Nebenbedingungen flossen in den Lösungsansatz für die BEST-Betriebsstrategie ein. Auch hier wurde ein auf gemischt-ganzzahliger linearer Programmierung basierendes Problemmodell entwickelt und untersucht sowie mit der Sprache CMPL[3] beschrieben und auf dessen Basis gelöst.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit konzentrierte sich vor allem auf Diskussionen und Einholung von Ratschlägen oder Empfehlungen aus dem BEST-Beirat. Auf verschiedenen Beiratssitzungen wurde von Fraunhofer FOKUS teils als Schwerpunktthema der Sitzung Arbeitsstände und Ergebnisse zum zentralen Managementsystem, zur graphischen Benutzerschnittstelle und zur optimierenden Betriebsstrategie vorgestellt und zur Diskussion gestellt. Eine weitere Zusammenarbeit erübrigte sich, da die für die Bearbeitung des Projekts erforderlichen energiewirtschaftlichen und energierechtlichen Kompetenzen durch die Partner im interdisziplinären Projektkonsortium abgedeckt wurden. Dies gilt auch für den assoziierten Partner Fenecon hinsichtlich der eingesetzten Open-Source-Software OpenEMS.

Literaturrecherchen sowie weitere Recherchen, u.a. zu genutzten Softwarepaketen und Systemen, als Basis für unsere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in BEST wurden im Wesentlichen online mit Hilfe gängiger Suchmaschinen (Google, Google Scholar, etc.) durchgeführt.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse

Die eigentlichen inhaltlichen Arbeiten von Fraunhofer FOKUS wurden planmäßig im April 2021 begonnen. Dazu gehörten neben der Koordination der Arbeiten in AP 3 zum zentralen Managementsystem, die Erfassung der Anforderungen an zwei wesentliche Komponenten dieses Managementsystems: den Koordinator (AP 3.1) und die graphische Benutzerschnitt-

[1] https://ieeexplore.ieee.org/document/9364456
[2] https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-46714-2_3
[3] http://www.coliop.org/

stelle (AP 3.2) in Abstimmung mit den Projektpartnern. Des Weiteren unterstützte Fraunhofer FOKUS den Projektpartner fortiss bei der Erfassung von Randbedingungen und bei der Quantifizierung von Zielgrößen, um letztlich die Zielfunktion für eine Optimierung der Betriebsstrategie in AP 3.3 festzulegen und umzusetzen

1.1 Projektmanagement (AP0)

Fraunhofer FOKUS hat sich zu Projektbeginn mit den Projektpartnern zur Durchführung der Projektarbeiten organisatorisch und hinsichtlich der einzusetzenden Werkzeuge abgestimmt. Des Weiteren unterstützt Fraunhofer FOKUS den Projektpartner fortiss bei der Erfassung von Randbedingungen und bei der Quantifizierung von Zielgrößen, um letztlich Zielfunktionen für eine Optimierung von Betriebsstrategien in AP 3.3 festzulegen und im weiteren Projektverlauf eine Optimierung durchzuführen. Fraunhofer FOKUS nahm ebenfalls aktiv am Projekt-Kick-Off-Treffen teil und hat die von uns geplanten Arbeiten vorgestellt. Wir haben auch an den regelmäßigen Konsortial- und Beiratstreffen teilgenommen und die zentralen Arbeiten im AP 3 koordiniert. Dazu gehören die Abstimmung der Arbeitsinhalte, die Durchführung von und Teilnahme an regelmäßigen Videokonferenzen (Jour Fixe) zum Arbeitsstand und Arbeitsfortschritt sowie die Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung von Arbeitstreffen insbesondere im AP 3. Des Weiteren wurden Werkzeuge zur Dokumentenablage und zum kollaborativen Arbeiten an gemeinsamen Arbeitsdokumenten (Microsoft Teams bei Fraunhofer und Fraunhofer-OwnCloud) bereitgestellt und gemeinsam genutzt. An diversen Arbeitstreffen von Projektpartnern, die pandemiebedingt virtuell stattfanden und die die aktuellen Arbeiten von Fraunhofer FOKUS betrafen, haben wir uns eingebracht und mit den Partnern abgestimmt. Auch an späteren physischen Arbeitstreffen haben wir aktiv teilgenommen. Dazu gehörte u.a. die Teilnahme am BEST-„Codefest“ im September 2023. Zur Koordination der Arbeiten in AP 3 und zur Erarbeitung von User-Stories und Use-Cases (Anwendungs-szenarien) haben wir spezifische Arbeitstreffen mit den Partnern organisiert und durchgeführt und Materialien sowie Vorlagen zur Erfassung der Stories und Cases bereitgestellt. Ziel dieser Arbeiten war es, die Anforderungen an die Koordinator-Komponente als auch an die graphische Benutzerschnittstelle festzulegen. Fraunhofer FOKUS hat auch bei der Verfeinerung der Gesamtarchitektur des Strommarkt-Bieter-Systems mit Schwerpunkt auf die Verortung dieser Komponenten im Gesamtsystem mitgewirkt sowie bei der Definition von Begrifflichkeiten in Form eines Glossars mitgearbeitet. Ferner hat Fraunhofer FOKUS regelmäßig an projektweiten Jour-Fixes teilgenommen und sich mit den Partnern ausgetauscht sowie auch regelmäßige interne Jour-Fixes durchgeführt. Auch an den beiden ersten Beiratssitzungen hat sich Fraunhofer FOKUS aktiv beteiligt und mit sich mit den Beiräten zum Projektstand und den aktuellen Arbeiten ausgetauscht

Im Rahmen der 7. Beiratssitzung hat Fraunhofer FOKUS den BEST-Beiräten sowohl den Stand der Arbeiten zur grafischen Benutzerschnittstelle (AP 3.2) als auch die aktuellen Ergebnisse zur Modellierung und Optimierung der Betriebsstrategie (AP 3.3) vorgestellt, erläutert und zur Diskussion gestellt. Die Rückmeldungen der Beiräte zu beiden Schwerpunkten waren durchweg positiv, so dass wir die vorgestellten Lösungsansätze im weiteren Projektverlauf beibehielten und vertieften.

1.2 Zentrales Managementsystem (AP 3)

Fraunhofer FOKUS hat die notwendigen Abstimmungsarbeiten im AP 3 koordiniert. Zur Koordination der Arbeiten in AP 3 und zur Erarbeitung von User-Stories und Use-Cases (Anwendungsszenarien) haben wir spezifische Arbeitstreffen mit den Partnern organisiert und durchgeführt und Materialien sowie Vorlagen zur Erfassung der User-Stories und Use-Cases bereitgestellt. Ziel dieser Arbeiten war es letztlich, die Anforderungen an die Koordinator-Komponente als auch an die graphische Benutzerschnittstelle festzulegen. Fraunhofer FOKUS hat auch bei der Verfeinerung der Gesamtarchitektur des Strommarkt-Bieter-Systems mit Schwerpunkt auf die Verortung dieser Komponenten im Gesamtsystem mitgewirkt sowie

bei der Definition von Begrifflichkeiten in Form eines Glossars mitgearbeitet. Ferner hat Fraunhofer FOKUS regelmäßig an projektweiten Jour-Fixes teilgenommen und sich mit den Partnern ausgetauscht sowie auch regelmäßige interne Jour-Fixes durchgeführt. Auch an den regelmäßigen Beiratssitzungen hat sich Fraunhofer FOKUS aktiv beteiligt und mit sich mit den Beiräten zum Projektstand und den aktuellen Arbeiten ausgetauscht.

Zu Projektbeginn im Jahre 2021 wurde ein gemeinsames Dokument als Grundlage für die nachfolgenden Entwurfs- und Entwicklungsarbeiten erarbeitet und abgestimmt, welches die Funktionalitäten und Interaktionen zwischen den Komponenten des BEST-Systems und die erforderlichen und bereitgestellten Daten beschreibt.

Neben der Entwicklung der eigenen Komponenten, sowie Tools und Bibliotheken, die von allen Projektpartnern eingesetzt werden konnten, entwickelte Fraunhofer FOKUS das Sicherheitskonzept des BEST-Systems und leistete unterstützende Arbeiten an den Komponenten der Projektpartner, trieb die Migration in die Cloud-Umgebung voran und wirkte während der gesamten Projektlaufzeit bei der Fehlersuche und Behebung von Fehlern mit.

Sicherheitsarchitektur

In der zweiten Hälfte des Jahres 2021 wurde ein Sicherheitskonzept für das BEST-System erarbeitet, mit den Partnern abgestimmt und in einem Dokument verschriftlicht. Die Kommunikation zwischen den Komponenten wird dabei über gesicherte Kanäle abgewickelt und zusätzlich eine Authentisierung vorgenommen.

Die Sicherheitsarchitektur nutzt den bewährten Sicherheitsstandard oAuth 2.0, um die über HTTPS verschlüsselte Kommunikation zwischen Komponenten zu authentifizieren. Es werden zwei Sicherheitszonen definiert, eine für die zentralen Marktkomponenten und eine für die dynamische Anzahl der Prosumenten-Systeme, die in einer Registry verwaltet werden.

Ein weiterer Baustein im Sicherheitskonzept ist die Nachrichten-Validierung. Dazu wurde in Abstimmung mit den Partnern entschieden, alle übertragenen Datenstrukturen in JSON-Schema zu formulieren. D.h. in einem etablierten Standard, der neben der Beschreibung der Datenfelder auch deren Validierung erlaubt.

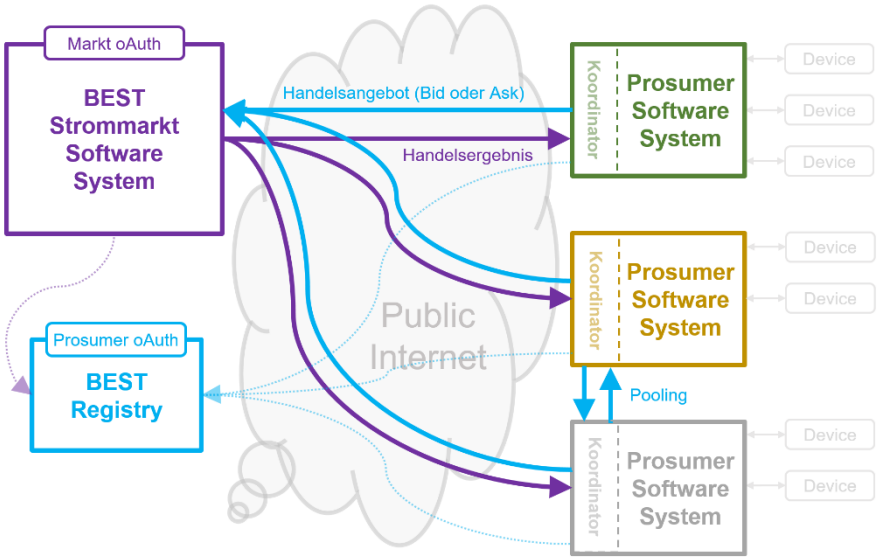

Abbildung 2: BEST-Sicherheitsarchitektur mit Markt- und Prosumenten-Authentifizierung

In der ersten Entwicklungsphase wurde von Fraunhofer FOKUS entwickelter Beispielcode für eine authentisierte Kommunikation mit signierten oAuth-Token den Partnern zur Verfügung gestellt und das Konzept und die Nutzung der von uns entwickelten Software in einem Projekt-Arbeitstreffen erläutert.

Bis April 2022 wurde ein Tool zur Validierung der für die Schnittstellendefinitionen verwendeten JSON-Schemata und ein Python-Code-Generator-Tool zur Erzeugung automatisch validierender Pydantic-Datenklassen für die Nutzung in den BEST-Komponenten entwickelt.

Die Schnittstellendefinitionen wurden im Projektverlauf mehrfach angepasst und daraus automatisch aktuelle Datenklassen für die Kommunikation zwischen den BEST-Komponenten erzeugt. Danach wurde mit der Entwicklung der Registry für Prosumenten in Python begonnen. Die Registry ist im Prosumenten-oAuth mit erweiterten Rechten ausgestattet, damit neue Prosumenten-Klienten anlegt oder bestehende gelöscht werden können.

Zur Initialisierung des oAuth-Servers mit Konfiguration der Sicherheitszonen und zur Initialisierung der Registry wurden von Fraunhofer FOKUS zwei Python-Skripte entwickelt.

Die Registry und Initialisierungsskripte wurden im Juni 2022 zusammen mit dem *keycloak*-oAuth2-Authentifizierungsserver auf dem Zielsystem bereitgestellt und dort getestet.

Im Herbst 2023 stellte fortiss die Kommunikationsendpunkte ihrer Komponenten auf die Nutzung der generierten Pydantic-Datenklassen um, so dass die Validität der gesendeten und empfangenen Daten automatisch überprüft wurde.

Um den Projektpartnern die Integration der BEST-Sicherheitsarchitektur zu erleichtern, wurden im Januar 2023 eine lokal ausführbare Registry-/oAuth-Server-Komposition von Docker-Containern und zugehörigen Startskripte erstellt, welche von RLI zum lokalen Testen der SMBS-Komponente und von e-regio zum erfolgreichen Testen der BKV- und VNB-Komponenten verwendet wurden.

Fraunhofer Fokus entwickelte im Februar 2023 eine verallgemeinerte oAuth2-Bibliothek für die im BEST-Projekt eingesetzten Web-Frameworks FastAPI und Django, die von den Projektpartnern RLI und fortiss zur Schnittstellensicherung genutzt wurde. Die Bibliothek wurde Juli 2023 überarbeitet, um sie gegen die Ausnutzung bekannter Sicherheitslücken (Exploits) zu härten und der im BEST-Gesamtsystem verwendete *keycloak*-oAuth2-Server wurde schrittweise auf neuere Versionen migriert.

Ab Herbst 2023 wurden die BEST-Marktkomponenten auf der Cloud-Infrastruktur betrieben und der oAuth2-Server wurde von Fraunhofer FOKUS restriktiver konfiguriert, um die Sicherheit insbesondere im anstehenden Feldtest weiter zu erhöhen.

Unterstützende Arbeiten

Neben den Arbeiten an der Sicherheitsarchitektur leistete Fraunhofer FOKUS ergänzende Zuarbeiten an BEST-Komponenten der Projektpartner:

- Um die Resilienz des Systems zu erhöhen, wurde Anfang 2023 die Kommunikation zwischen BEST-Komponenten, gemeinsam mit fortiss, um Funktionen zur Fehlerbehandlung und erneuten Versenden übermittelter Informationen bei fehlgeschlagenen Übertragungen erweitert.
- Die Initialisierung der OBS-D-, Poolung- und Community-Komponenten wurden Juli 2023 von Fraunhofer FOKUS überarbeitet, um eine separate Konfiguration der Prosumenten zu ermöglichen.
- In Absprache mit den Projektpartnern wurden Oktober 2023 die Logging-Ausgaben der Markt-Komponenten vereinheitlicht, um damit die Fehlersuche bei der Cloud-Installation zu vereinfachen.

- In der von fortiss entwickelten Pooling-Plattform wurde im November 2023 die im Feldtest benötigte Unterstützung textueller Bezeichner zur Definition der Stromnetzstandorte hinzugefügt.

Migration des Marktkomponenten auf eine Cloud Infrastruktur

Die Grundarchitektur des BEST-Systems, bestehend aus vereinfachten Markt- und Prosumenten-Komponenten, wurde initial vom Projektpartner fortiss in einer docker-basierten Simulationsumgebung entwickelt und getestet. In der Projektlaufzeit wurde dieses System um das von RLI entwickelte Marktsystem und den von Fraunhofer FOKUS entwickelten Komponenten der Sicherheitsarchitektur, dem Koordinator und dem Modul zur optimierten Betriebsstrategie erweitert. Die e-regio-Komponenten waren vom fortiss zuerst als vereinfachte Test-Komponenten realisiert.

Im späteren Verlauf wurden die zentralen Marktkomponenten für den Feldtest in eine Cloud-Infrastruktur überführt, die über Kubernetes konfiguriert und administriert wird. Die Entwicklung der dazu notwendigen Helm-Charts wurde Anfang 2023 gemeinsam mit fortiss durchgeführt und auf einer lokalen Kubernetes-Installation (Minikube) getestet. Die von Fraunhofer FOKUS entwickelten Python-Skripte zur Initialisierung der Registry, des oAuth-Servers und der einzelnen Prosumenten wurde um die Initialisierung der Cloud-Variante erweitert.

In einem BEST-Projekttreffen in München 2023 wurde in Workshops Teilziele für den Übergang in die Cloud-Infrastruktur festgelegt und die Gesamtarchitektur finalisiert. Der Partner e-regio hat die von ihm entwickelten Komponenten BWS, BKV und VNB in der eigenen IT-Infrastruktur installiert und betrieben.

Im September 2023 wurde die Open-Telekom-Cloud-(OTC)-Infrastruktur für die Bereitstellung von BEST-Softwarekomponenten/-Diensten von OLI-Systems zur Verfügung gestellt und auf einem mehrtägigen “Codefest”-Treffen der BEST-Entwickler in Berlin die ersten Komponenten- und Integrationstests in diesem Cloud-System vorgenommen. Die Helm-Charts wurden von Fraunhofer FOKUS überarbeitet und die Handhabung des OTC-Kubernetes-Clusters dokumentiert, so das die von Fraunhofer FOKUS durchgeführten Arbeiten von den Projektpartnern nachvollzogen werden konnten und um ein eigenständiges Aktualisieren (Updaten) und eine Fehlersuche (Debuggen) bei den von ihnen entwickelten Markt-Container zu ermöglichen. Nach dem “Codefest” wurden die Komponenten BKV, VNB und BWS von e-regio auf externen Servern zur Verfügung gestellt und nach einer Anpassung der Helm-Charts durch Fraunhofer FOKUS erfolgreich in den Marktablauf integriert. Damit wurde Meilenstein 7: „Lauffähige Version des Gesamtsystems ist fertiggestellt“ erreicht.

Als nächster Zwischenschritt zum Feldtest wurde von Fraunhofer FOKUS eine Kombination aus simulierten, im Echtzeit-Betrieb laufenden Prosumenten-Systemen und in der OTC laufenden zentralen Marktsystem erprobt und nach Aufdeckung und Behebung mehrerer kleiner Fehler in den Prosumenten- und Marktkomponenten in einem mehrtägigen Dauertest erfolgreich getestet. Im Dezember 2023 wurden die Helm-Charts von Fraunhofer FOKUS um persistente Datenspeicherung erweitert und die Änderung der Komponenten-Konfiguration durch Nutzung von Kubernetes-Config-Maps vereinfacht. Damit wurde auch Meilenstein 8: „Gesamtsystem ist finalisiert und steht zur Verfügung“ erreicht.

1.2.1 Koordinator (AP 3.1)

Die Aufgabe der Koordinator-Komponente im BEST-System ist die Koordination des bei jedem der Prosumenten (Marktteilnehmer) betriebenen zentralen Managementsystems. Der Koordinator bildet dabei ein Gateway zwischen dem globalen Strommarktbietersystem SMBS und den Unterkomponenten des lokal bei jedem Prosumenten (Marktteilnehmer) betriebenen Managementsystems.

Der Koordinator wurde im ersten Halbjahr 2022 mit dem FastAPI-Python-Framework entwickelt, das auf Pydantic -Datenklassen mit integrierter Validation aufbaut. Das im Abschnitt 1.2 erwähnte Python-Code-Generator-Tool erzeugt die in den Koordinator-Schnittstellen verwendeten Datenstrukturen aus den BEST-JSON-Schemata. Die von Fraunhofer FOKUS entwickelte oAuth-Bibliothek wurde zur Abfrage von und zur Prüfung der Kommunikations-tokens integriert.

Durch eine umfangreiche Testsuite mit 100% Testabdeckung und Verwendung von Code-Analyse-Tools zur Überprüfung des Quellcodes auf programmtechnische und stilistische Fehler sowie zur objektiven Messung der Komplexität, die während der Entwicklung fortlaufend in einer CI/CD Pipeline durchgeführt wurde, konnte eine hohe Softwarequalität des Koordinators gewährleistet werden. In den Tests wurden zusätzlich die beteiligten Fremdkomponenten simuliert, so dass nicht nur die generelle Funktionalität aller durch den Koordinator laufenden Datenströme überprüft werden konnte, sondern auch dessen Verhalten in Fehlerfällen.

Integration des Koordinators in die Simulationsumgebung

Zur Vorbereitung der Koordinator-Integration wurde eine Analyse und ein Review der initialen Simulationsumgebung durchgeführt und die Ergebnisse in einem Projekttreffen Ende Februar 2022 den Projektpartnern vorgestellt.

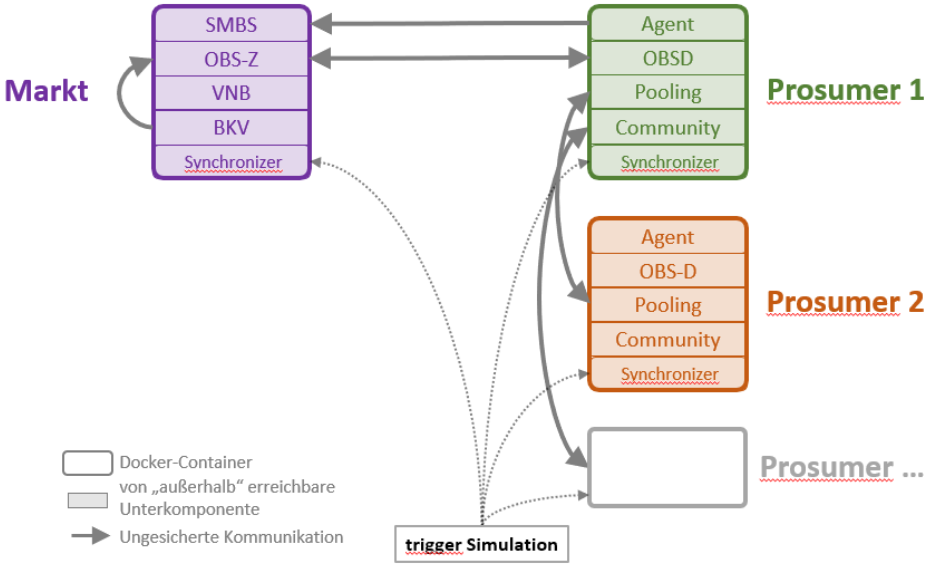

Abbildung 3: Aufbau der initialen Simulationsumgebung

In der Simulationsumgebung werden die Unterkomponenten des BEST-Systems in Docker-Containern zusammengefasst. In der initialen Version (siehe Abb. 3) kommunizierten die Markt- und Prosumenten-Komponenten direkt und ohne Authentifizierung miteinander. Alle Unterkomponenten sind von außerhalb ihres Docker-Containers erreichbar. Die in allen Komponenten verwendete globale Konfigurationsdatei enthält Informationen über alle Prosumenten-Systeme, deren Verbindungsdaten, Geräte und Pools.

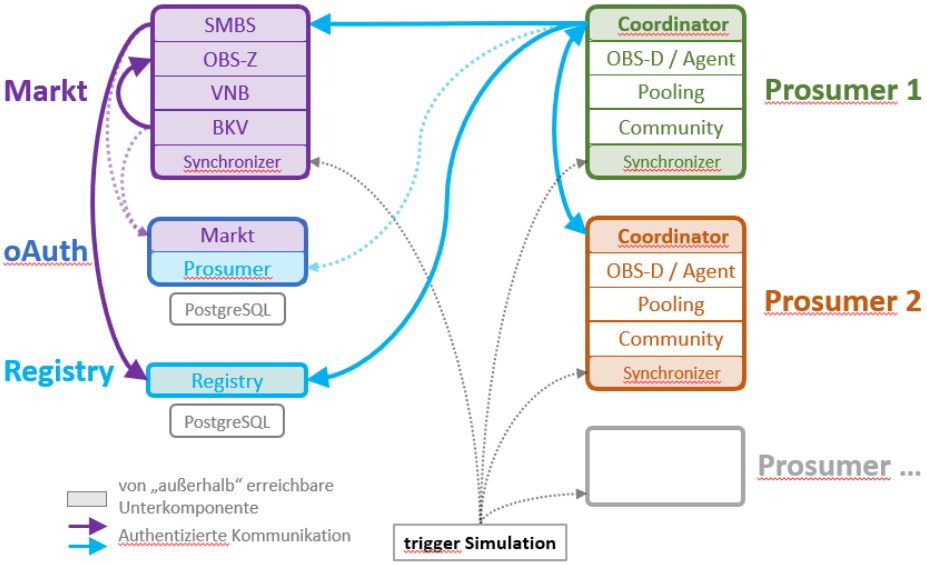

Abbildung 4: Simulationsumgebung mit integriertem Koordinator, oAuth-Server und Registry

Im finalen BEST-System (siehe Abb. 4) werden aus Datenschutzgründen die Daten jedes Prosumentens gegenüber Dritten abgeschirmt und damit geschützt. Die Außenkommunikation verläuft über die Koordinator-Komponente, die Schutz vor Fremdzugang sicherstellt. Eingehende Daten werden validiert und ausgehende Daten werden authentifiziert. Kontaktinformationen zu anderen Prosumenten-Systemen können über die Registry abgefragt werden, sofern sich die realen Prosumenten untereinander bekannt gemacht haben, d.h. ein Zugriff auf persönliche Daten durch sie gestattet wird.

Die Koordinator-Integration in die Simulationsumgebung wurde in mehreren Schritten im zweiten Halbjahr 2022 durchgeführt:

- Um die Prosumenten-zu-Prosumenten-Kommunikation zwischen den Pooling- und Community-Plattformen der BEST-Peer-To-Peer-(P2P)-Pools frühzeitig umstellen zu können, wurde zunächst eine reduzierte Koordinator-Komponente erstellt und in die Simulationsumgebung eingebunden, die nur die ungesicherte P2P-Kommunikation unterstützte.
- Die Initialisierung der Prosumenten wurde auf ein von Fraunhofer FOKUS entwickeltes Prosumenten-Init-Python-Skript umgestellt, das als BKV agiert und die in der Simulation zu startenden Prosumenten-Systeme in der Registry erstellt und die Konfigurationsdateien für den jeweiligen Prosumenten-Docker-Container erzeugt.
- Im nächsten Schritt wurde auf die vollständige Koordinator-Komponente umgestellt und nach und nach die einzelnen Datenflüsse zwischen Markt- und Prosumenten-Komponenten umgestellt.
- Die automatische Validierung aller durch den Koordinator verlaufenden Datenflüsse zeigte einige Schwachstellen auf, die zu kleineren Änderungen der Schnittstellen-Schema-Definitionen oder zu Anpassungen in den anderen BEST-Komponenten führten.

Ende 2022 war die Koordinator-Komponente, die Registry und der oAuth-Server vollständig in die Simulationsumgebung integriert und damit der Meilenstein 5: „Basisversion des Gesamtsystems ist fertiggestellt" erreicht Die Überprüfung der vom Koordinator übermittelten Authentifizierungstoken wurde von den Partnern mit der von Fraunhofer FOKUS entwickelten oAuth2-Bibliothek bis Mitte 2023 implementiert.

Übergang zum Feldtest

August 2023 wurde ein Endpunkt zur Anbindung der neuen Komponente für Wetterprognosen (BWS) implementiert. Die initiale Anmeldung der Prosumenten an die Registry wurde im September 2023 aus dem Prosumenten-Init-Skript in die Start-Routine des Koordinators verlagert und um die Auslösung der Aktualisierung der SMBS-Marktteilnehmer ergänzt. Zusammen mit den von Fraunhofer FOKUS durchgeführten Arbeiten zur separaten Konfiguration der Prosumenten-Komponenten wurde damit ein getrenntes Starten von Prosumenten-Instanzen ermöglicht.

Das Prosumenten-Init-Skript wurde für den Feldtest angepasst, so dass Änderungen der Gerätekonfiguration einzelner Feldtestnutzer ohne Neu-Initialisierung des Prosumenten-Systems unterstützt wurden. Außerdem wurde eine prototypische Lösung entwickelt, um Prosumenten-Systeme nach einem Datenverlust der Registry sukzessive erneut registrieren zu können.

1.2.2 Grafische Benutzerschnittstelle (AP 3.2)

In der ersten Phase von AP 3.2, welche die Monate April bis August 2021 umfasste, wurden die Use Cases und Anforderungen an die graphische Benutzerschnittstelle (GUI) des BEST-Systems ermittelt. Hierzu wurden individuelle Interviews von jeweils 30-60 Minuten Dauer mit verschiedenen Stakeholdern (Endnutzern, Bilanzkreisverantwortliche, Stromanbietern) durchgeführt, welche als Basis für User Stories, Use Cases und Anforderungen dienten. Basierend auf diesen Interviews wurde Ende August 2021 das Dokument “BEST Use Cases und Anforderungen” erstellt, welches in strukturierter Form die User Stories, Use Cases und Anforderungen aus Sicht der Stakeholder darstellt.

Von September bis Dezember 2021 waren im Zeitplan des Projektes (Gantt Chart) für AP 3.2 keine Aktivitäten vorgesehen. Es wurden in diesem Zeitraum jedoch erste GUI-Elemente von Fraunhofer FOKUS entwickelt und in OpenEMS integriert, um als Basis für die Abstimmung über “Look & Feel” der BEST-spezifischen Anzeigeelemente zu dienen.

Die konkrete Entwicklung der GUI begann im Januar 2022. Die Arbeiten an der GUI sind dann kontinuierlich bis ins erste Quartal 2024 fortgeführt worden. In Aussehen, Handhabung und zugrundeliegender Architektur basiert die GUI auf OpenEMS. Beim OpenEMS (Open Source Energy Management System) handelt es sich um eine modulare Plattform für Energiemanagement-Anwendungen. OpenEMS ist primär auf die Anzeige von aktuellen und historischen Energieflussdaten ausgelegt und umfasst eine umfangreiche Sammlung von Software-Adaptern (in der OpenEMS Terminologie “Controller” genannt) für verschiedene Geräte, inklusive PV-Inverter, Ladestationen und Energiemessgeräte unterschiedlicher Hersteller.

Da es sich bei BEST im Wesentlichen um ein Projekt im Bereich des Strommarkts handelt, wurden die Funktionen zur Energieflussanzeige direkt aus OpenEMS übernommen, um Ressourcen auf BEST-spezifische Aktivitäten konzentrieren zu können. OpenEMS wurde dann im Rahmen von BEST um Funktionen zur Anzeige des Strommarkts und Stromhandels, sowie zum Management von Handelsgruppen erweitert. Auf der Einstiegsseite der OpenEMS-GUI (bei OpenEMS “Dashboard”) genannt, wurde die Energiemonitoranzeige um den BEST-Markt erweitert. Dazu wurden weitere Anzeigen zu Autarkie, Eigenverbrauch, Energiemengen der letzten vier Wochen hinzugefügt.

Um die kommerziellen Aspekte und Vorteile des BEST-Handels hervorzuheben, wurde das Dashboard auch um die Anzeige der Handelsergebnisse in Euro (Gewinn/Verlust/Saldo) ergänzt.

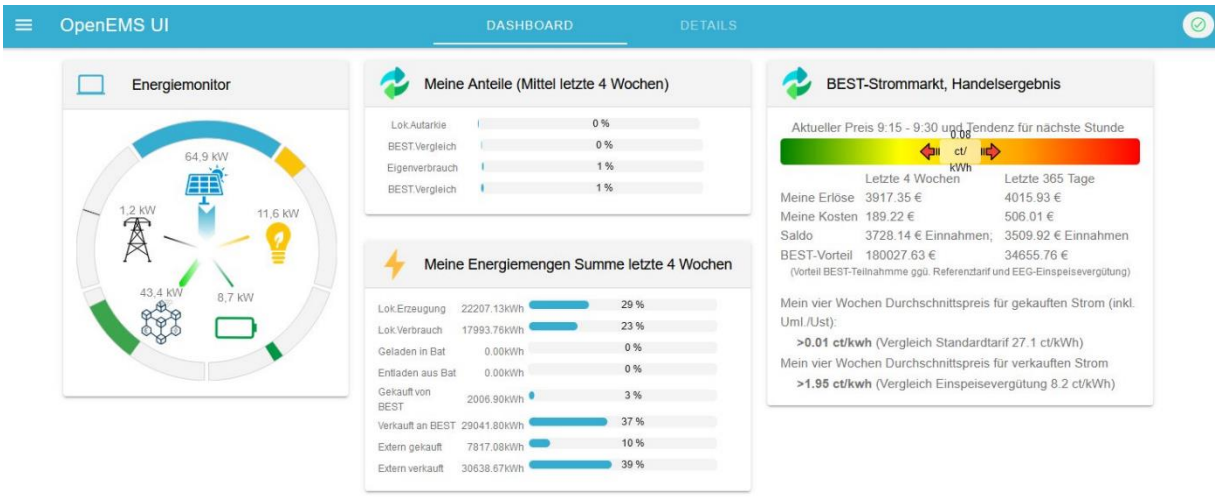

Abbildung 5: BEST Dashboard

Zum Erstellen und Verwalten eigener Handelsgruppen wurde die GUI um entsprechende Funktionen erweitert. Diese Funktionen erlauben neben der Erstellung und dem Beitritt zu Handelsgruppen insbesondere auch die Handhabung der Verteilung von Stromüberschüssen auf mehrere Handelsgruppen.

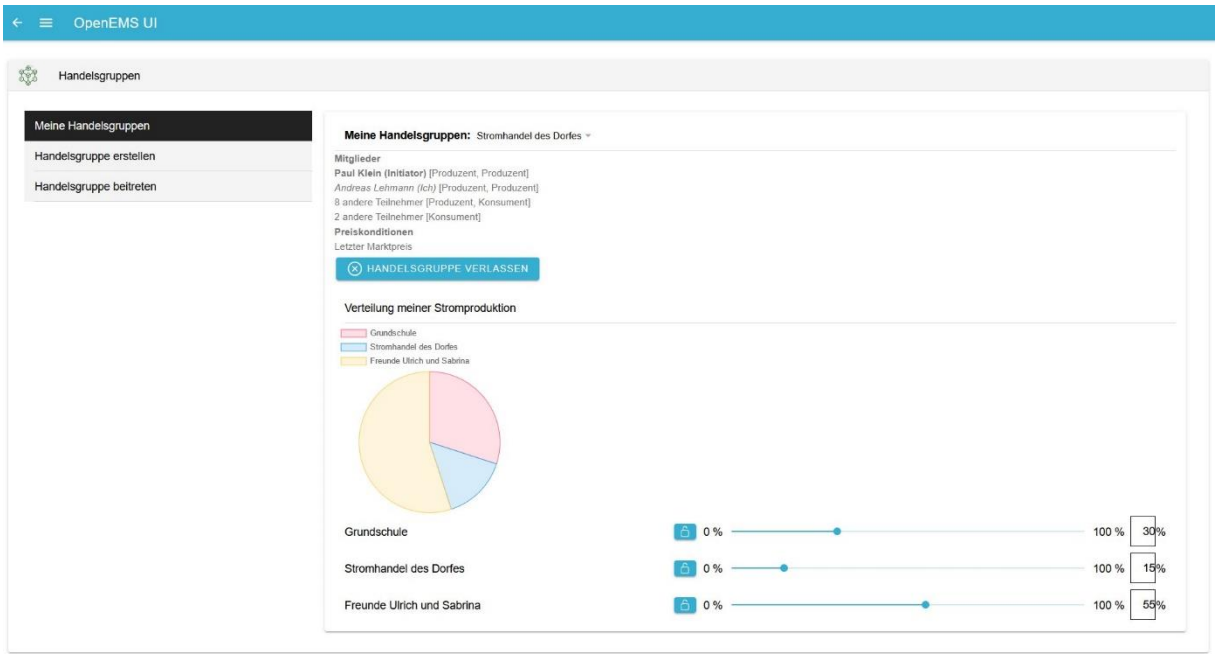

Abbildung 6: BEST Handelsgruppen Management

Bei der Anzeige von historischen Daten wurden alle bereits von OpenEMS bereitgestellten Graphiken beibehalten. Diese wurden dann durch eine Reihe von BEST-spezifischen Graphiken, welches sich insbesondere auf den Strom-Markt beziehen, ergänzt. Zu diesen Graphiken gehört die Anzeige des aktuellen und projizierten Strompreises am Markt, sowie die eigenen finanzielle Bilanzentwicklung.

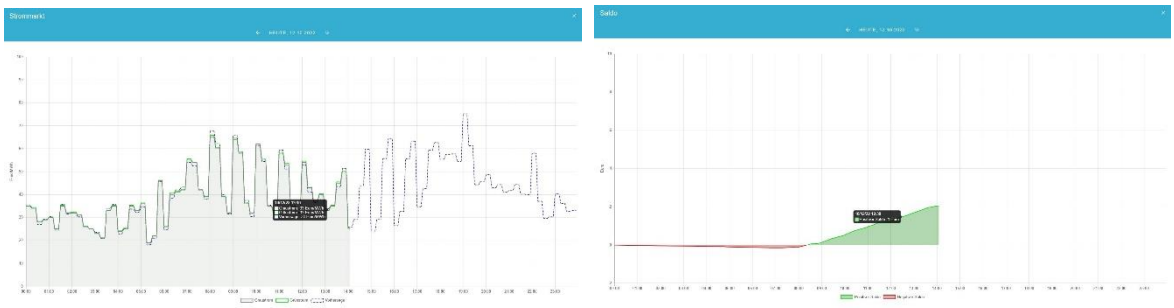

Abbildung 7: Strommarkt und individuellerTagessaldo

Um die Energieflussdaten für Nutzer besser zu veranschaulichen, wurden sowohl ein Ringdiagramm zur Visualisierung der genutzten Stromquellen als auch ein Sankey zur Anzeige der Energiemengen, welche zwischen den unterschiedlichen Stromquellen und Stromverbrauchern geflossen sind, implementiert.

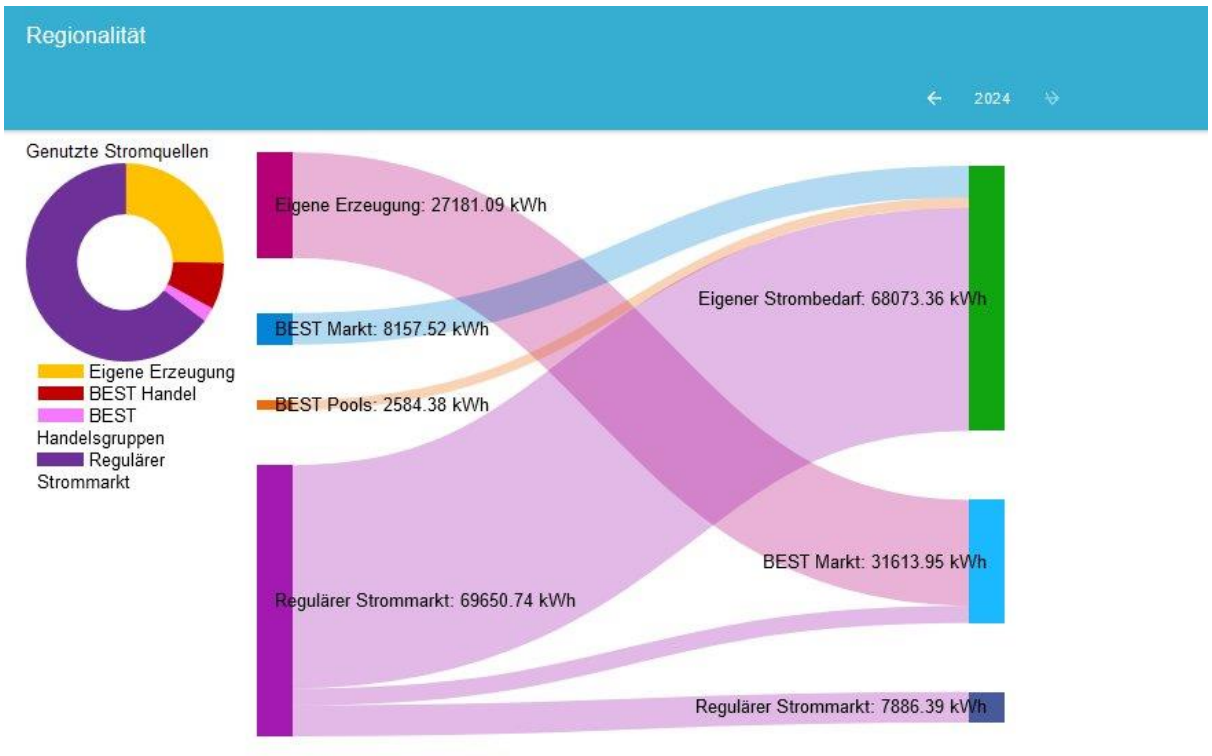

Abbildung 8: Sankey-Darstellung

Aufgrund der anfänglich geführten Interviews und Anforderungserhebung nahmen wir an, dass für den überwiegenden Teil der BEST-Nutzer die durch diese Übersichtsgrafiken bereitgestellten Information ausreichend sind. Um Anwendern zusätzlich die Möglichkeit zu geben, die am Markt erfolgten Aktivitäten auch im Detail nachvollziehen zu können oder unerwartetes Verhalten zu überprüfen, wurden weitere Anzeigen bereitgestellt. Diese erlauben es, die Vorgänge am Markt, die jeweils gültigen Marktpreise, sowie die am Markt aktiven Parteien in verschiedenen, frei wählbaren Zeiträumen zu begutachten.

So zeigt beispielsweise die folgende Graphik (Abbildung 9: Monatsübersicht Energiefluss und Handel) die eigene Stromnutzung (Verbrauch, Erzeugung, Bezug, Einspeisung) und

darunter die Handelsvorgänge am Markt zwischen den einzelnen Marktteilnehmern als Energieanzeigen (Kilowatt für die Stromnutzungsanzeige, Kilowattstunden für die Marktaktivitäten). Die darauffolgende Graphik (Abbildung 10: Preisentwicklung Monatsansicht) zeigt für denselben Zeitraum die Energiepreise. Da in diesem Fall der Handel ausschließlich mit „MM“ geführt worden ist, sind sowohl die individuellen Ankaufs- als auch Verkaufspreise konstant. Der untere Teil gibt hingegen die am BEST-Marktplatz erzielten Strompreise an, bei denen im Verlauf erhebliche Schwankungen erkennbar sind. (Eine Anmerkung zu den dargestellten Werten: In der Graphik scheint der Strompreis an einigen Stellen negativ zu sein. Das liegt in diesem Fall daran, dass die Darstellung der Graphik hier ohne Berücksichtigung der Netzentgelte („Grid Fee“) erfolgte. Wird diese mit einbezogen, so sind alle effektiven Stromkosten positiv. Die Anzeige der Netzentgelte („Grid Fee“) ist eine optionale Funktion der GUI.)

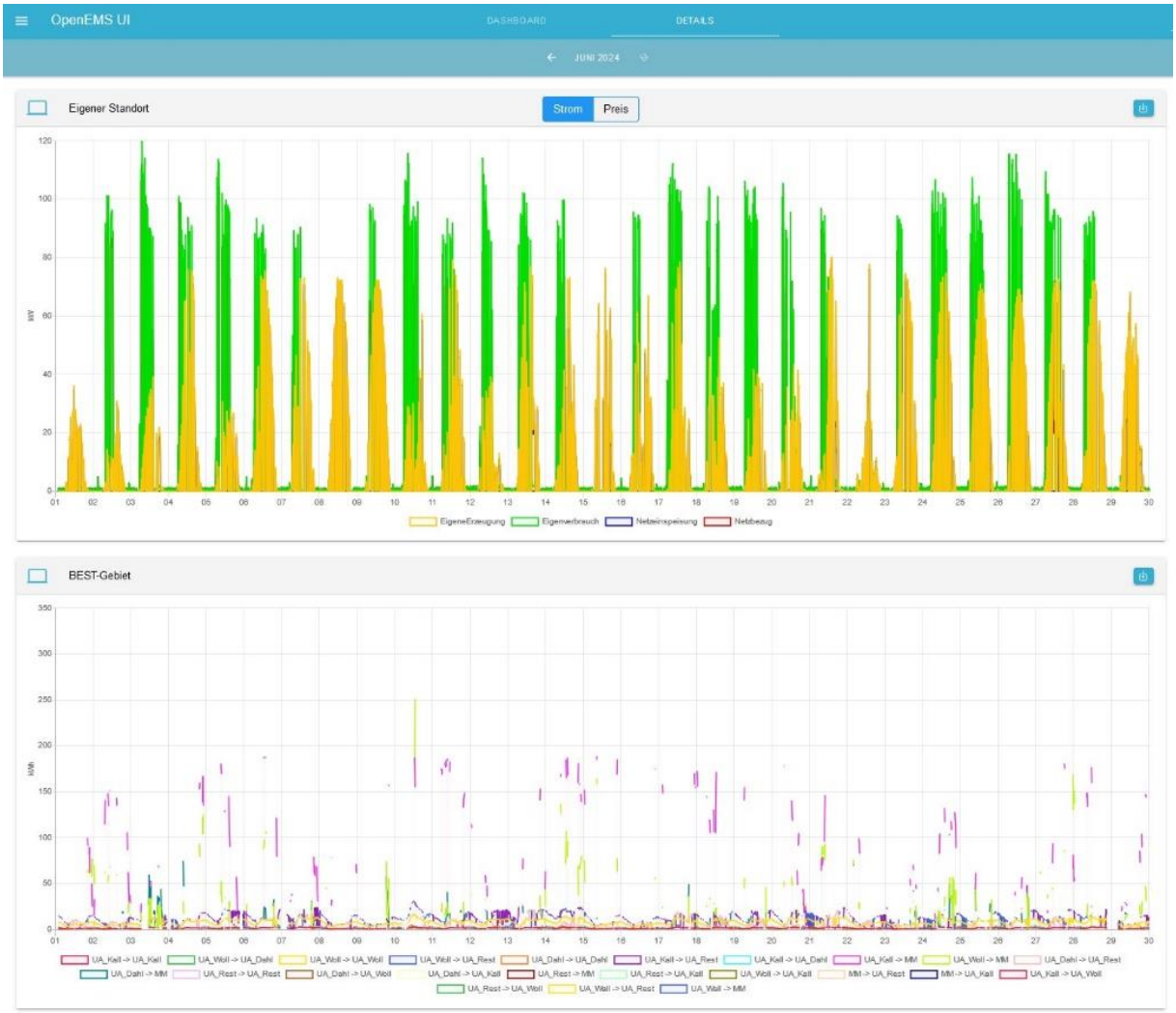

Abbildung 9: Monatsübersicht Energiefluss und Handel

Abbildung *10*: Preisentwicklung Monatsansicht

Inhaltlich wurden die Arbeiten an der GUI im März 2024 abgeschlossen. Im letzten halben Jahr der Projektlaufzeit wurden keine neuen Erweiterungen (Feature-Implementierungen) an der GUI vorgenommen. Es fanden jedoch kleinere Anpassungen im Aussehen und Verhalten der GUI, basierend auf Nutzerwünschen, sowie Fehlerbehebungen statt.

Die Arbeiten an der GUI haben zum erfolgreichen Erreichen von Meilenstein 5: “Basisversion des Gesamtsystems ist fertiggestellt” und von Meilenstein 7: “Lauffähige Version des Gesamtsystems ist fertiggestellt” beigetragen. In beiden Fällen hat sich das Erreichen des jeweiligen Meilensteins im Vergleich zur Planung aufgrund der veränderten Projektbedingungen etwas verzögert. Die GUI-Entwicklung lief jedoch durchgehend parallel mit der Entwicklung der anderen Elemente des Gesamtsystems.

1.2.3 Optimierung Betriebsstrategie (AP 3.3)

Ziel der optimierenden Betriebsstrategie in BEST war es für steuerbare Energieanlagen Fahrpläne zu berechnen, so dass der Betrieb dieser Anlagen beim jeweiligen Prosumenten bestimmte zu definierende Zielgrößen optimiert. Dazu wurden von Fraunhofer FOKUS in Abstimmung mit den Projektpartnern die zu steuernden Energieanlagen identifiziert und die Anforderungen an die Fahrplanung dieser elektrischen Anlagen bei den Prosumenten erfasst. Aufgrund der Situation im Feld und da im Mittelpunkt des Projekts ein lokales Energiemarktsystem stand, haben wir uns bei den steuerbaren Energieanlagen auf Batterien

fokussiert, da sie als Energiespeicher sowohl als Energielieferant (beim Entladen) als auch als Energieabnehmer (beim Laden) fungieren können und damit die notwendige Flexibilität für eine Optimierung der Betriebsstrategie bieten. Direkt angestrebte Zielgrößen der Optimierung waren Kostensenkung und Ertragssteigerung beim BEST-Stromhandel, womit indirekt auch die Erhöhung von Eigenverbrauch und Selbständigkeit (self-sufficiency) einhergeht, da insbesondere ein intensiver Einkauf von Stromkontingenten am BEST-Strommarkt aufgrund der angestrebten Kostensenkung vermieden wird. Die Funktionalitäten der Fahrplanung im Rahmen einer optimierenden Betriebsstrategie wurden in einem AP 3-Dokument beschrieben, insbesondere die erforderlichen Interaktionen und Datenaustausche mit anderen BEST-Komponenten. In einem weiteren Arbeitsdokument wurden zudem die zu berücksichtigenden Energieanlagen und Entitäten erfasst, charakterisiert und kategorisiert, um daraus bei den nachfolgenden Entwurfs- und Entwicklungsarbeiten ein mathematisches Modell zur Planung des optimalen Betriebs von Energieanlagen herzuleiten. Das entwickelte Modell wurde anschließend zur Berechnung optimaler Fahrpläne genutzt, welche die Grundlage der Anlagensteuerung mit Hilfe von OpenEMS durch den Partner RLI im weiteren Projektverlauf sein sollte. Die Erfassung der Energieanlagen bildeten die Vorarbeiten zum AP 6.1 (Identifikation und Akquise von Technischen Einheiten). Diese Arbeiten leisteten einen wesentlichen Beitrag zum Meilenstein 3: „Finales Konzept für zentrales Managementsystem“.

Auf Basis der ausgearbeiteten Anforderungen an eine optimale Fahrplanung für elektrische Anlagen, d.h. von Soll-Plänen für den Anlagenbetrieb wurde eine erste Version einer automatischen Fahrplanung (Basisversion) realisiert. Dazu wurde mit dem Partner fortiss, der die Fahrplanung innerhalb des Gesamtsystems in den dezentralen Komponenten der optimierenden Betriebsstrategie (OBS-d) nutzt, die Interaktionen und auszutauschenden Datenformate abgestimmt. Konkret wurden von Fraunhofer FOKUS JSON-Schemata der Dateneingabe- und -ausgabeformate in Abstimmung mit dem Partner fortiss ausgearbeitet.

Auf Basis der Eingabedaten der optimierenden Betriebsstrategie wurde ein erstes mathematisches Modell zur Berechnung von Anlagen-Fahrplänen erstellt. Konkret wird mit den Anlagendaten ein MILP-Modell (mixed integer linear programming model) in der Sprache CMPL (siehe oben) generiert. Auf Basis des konkreten Modells wird dann mit Hilfe des frei-verfügbaren MIP-Solvers CBC[4] ein Lade-/Entladefahrplan für die Batterie des jeweiligen Prosumenten auf Basis der eingegebenen Daten und für den betrachteten Planungszeitraum berechnet. Diese Arbeiten zur Fahrplanung stellten einen wesentlichen Beitrag zum Meilenstein 5: “Basisversion des Gesamtsystems ist fertiggestellt.” dar.

Zur tatsächlichen Optimierung der Betriebsstrategie wurde die realisierte automatische Fahrplanung für den Anlagenbetrieb konzeptionell mit der Berechnung optimaler Angebote und Anfragen (sogenannter Bids and Asks) für/an den BEST-Strommarkt integriert. Dazu wurde das gemischt ganzzahliges, lineares Problemmodell erweitert. Dieser Problemmodellierungsansatz basiert nun auch auf aktuellen Handelsergebnissen, aktuellen Preis- und Energieverbrauchs- und Energiegestehungsprognosen (Wind, Solar). Ziel dieses Modellierungsansatzes war und ist es, Batterie-Fahrpläne für den aktuellen Lieferzeitraum von Strom von/in dem Markt sowie ertragsoptimale Bids and Asks für das nächste Handelsintervall zu ermitteln. Dabei wurde der Lösungsansatz so gestaltet, dass Pufferkapazitäten von Batterien vorgehalten werden, um trotz unsicherer Prognosen mit hoher Wahrscheinlichkeit Lade-/Entlade-Fahrpläne zu bestimmen, so das am BEST-Strommarkt vereinbarte Verbindlichkeiten über Stromlieferung oder -abnahme erbracht und Strafzahlungen für Nichterbringung von Leistungen vermieden werden. Die Berechnungen auf Basis dieses Problemmodells wurden in die überlagerten periodischen Abläufe der aktuell 15-minütigen Handels- und Lieferintervalle am BEST-Strommarkt eingeordnet.

[4] https://www.coin-or.org/Cbc/

Dieser erweiterter Problemmodellierungsansatz und dessen zeitliche Einordung in die Handels- und Erbringungsabläufe wurde den BEST-Beiräten in der 7. Beiratssitzung vorgestellt und detailliert erläutert und fand allgemeine Zustimmung. Das ausgearbeitete Problemmodell wurde im weiteren Verlauf durch den Projektpartner fortiss implementiert und in deren OBS-d-Softwarekomponente integriert, so dass es sowohl zur Erstellung von Anlagen-Fahrplänen bei den Prosumenten als auch zur aktiven und ertragsoptimierenden Teilnahme am BEST-Strommarkt genutzt werden kann.

Eine zwischendurch angedachte Erweiterung des Problemmodellierungsansatzes zur "optimierenden" Einbindung weiterer Anlagentypen wie Elektrofahrzeuge oder Biogasanlagen wurde im Projekt nicht weiter verfolgt, da die erforderlichen Daten, wie z.B. zu den Verfügbarkeiten von Elektrofahrzeugen und zu deren Ladezuständen oder zu den Spezifika und Betriebszuständen von Biogasanlagen und gekoppelten BHKWs nicht zur Verfügung standen.

Das ausgearbeitete, vom Projektpartner fortiss implementierte und in deren OBS-D-Softwarekomponente integrierte mathematische Problemmodell wurde aufgrund der Generierung unlösbarer Probleme bei Simulationen durch den Projektpartner fortiss von Fraunhofer FOKUS mehrfach überarbeitet, um robuster gegen „grenzwertige" Dateneingaben zu sein, so dass auch in solchen Fällen sinnvolle Lösungen berechnet werden. Tests des angepassten Problemmodells auf Basis simulierter Handelsszenarien (durch fortiss) haben gezeigt, dass dieses Ziel erreicht wurde. Mit der Erweiterung und Härtung des mathematischen Modells wurde von Fraunhofer FOKUS signifikant zum Meilenstein 8: „Gesamtsystem ist finalisiert und steht zur Verfügung" beigetragen.

1.2.4 Anschluss der Teilnehmer an das zentrale Managementsystem (AP 6.2)

Fraunhofer FOKUS hat die Entwicklungspartner (RLI, e-regio, fortiss und Oli Systems) der anderen Komponenten des BEST-Systems bei der kommunikationstechnischen Anbindung an das zentrale Managementsystem fachlich unterstützt. Bei den im Rahmen der Tests aufgetretenen Probleme in der Praxisphase hat Fraunhofer FOKUS geholfen, diese zu beheben.

1.2.5 Begleitung von Tests in der Praxisphase (AP 6.5)

Fraunhofer FOKUS unterstützte die Partner, vor allem e-regio, fortiss und Oli Systems bei der Durchführung von Feldtests in der Praxisphase und half bei technischen Problemen diese zu beheben, damit der Probebetrieb und die Messdatenerhebung möglichst störungsfrei erfolgen konnten.

2. Wichtigste Positionen im zahlenmäßigen Nachweis

Im Wesentlichen sind die Aufwände im Projekt wie geplant angefallen. Dabei gab es u.a. pandemie- und hochwasserbedingte zeitliche Verschiebungen der Arbeitsinhalte und der damit verbundenen Arbeitsaufwände. Insbesondere war die notwendige Kommunikation der Projektpartner gerade zu Projektbeginn aufgrund der Corona-Pandemie sehr viel schwieriger und aufwändiger aus ursprünglich geplant, da physische Treffen nicht stattfinden konnten und notgedrungen durch virtuelle Treffen ersetzt werden mussten. Ehemals veranschlagte und bewilligte Reisekosten und sonstige Sachmittel (zur Ausrichtung eines öffentlichen Workshops) konnten pandemiebedingt nicht verausgabt werden. Nicht alle bewilligten Investitionsmittel (zur Lizenzierung von Software-Werkzeugen) waren zur Projektdurchführung erforderlich. Die nicht verausgabten Mittel haben wir zur Kompensation von Mehrkosten beim Personal verwendet.

Der detaillierte zahlenmäßige Nachweis erfolgt bei Fraunhofer in einem gesonderten Dokument.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Vorhaben zeichnete sich durch eine hohe systemische Komplexität der einzubeziehenden Komponenten aber auch der energierechtlichen und energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen aus. Daher war das Vorhaben nur im Verbund aus Forschung, Energiewirtschaft und energierechtlicher Unterstützung möglich. Für das gesetzte anspruchsvolle Ziel, ein verteilt-digitales, sicher über das Internet kommunizierendes lokales Strommarktsystem prototypisch zu realisieren und zu erproben, erforderte das Vorhaben eine hohe Akkumulation an unterschiedlicher Expertise und darauf aufbauend ein hohes Maß an interdisziplinärer Zusammenarbeit, was ohne Unterstützung durch öffentliche Mittel nicht möglich gewesen wäre. Weiterhin besteht ein hohes wirtschaftliches Risiko, da eine Verwertung durch „klassische“ Energieversorgungsunternehmen einen Paradigmenwechsel in der Energiewirtschaft darstellt, vom „klassischen Stromlieferant“ hin zum digitalen Dienstleister, der eine Stromhandelsplattform und den Zugang zu dieser anbietet. Die beteiligten Unternehmen konnten daher aufgrund der schwierigen Marktsituation die F&E-Aufwendungen, die zur Durchführung des Projektes und damit zur Erschließung eines neuartigen Geschäftsfeldes notwendig sind, nicht allein tragen. Durch den Einsatz wissenschaftlicher Methoden und den forcierten Wissenstransfer wissenschaftlicher Ergebnisse in die beteiligten Unternehmen wurde die Gefahr des Scheiterns verringert und die Erfolgschancen durch spezielle zielgerichtete Forschungsansätze erhöht. Die Mittelbereitstellung für die essenziell notwendigen akademischen Forschungsarbeiten, z.B. für die optimierende Betriebsführung, konnte durch die Unternehmen nicht allein geleistet werden.

Das Projekt fördert die weitere Digitalisierung in der Energiewirtschaft und ermöglicht neue Geschäftsmodelle im Zuge der Energiewende mit zunehmend lokal erzeugtem elektrischem Strom aus volatilen erneuerbaren Energien und stärkt die Kompetenz der Partner auf hohem technisch-wissenschaftlichem Niveau. Ohne die angemessene Unterstützung mit Fördermitteln hätte die beschriebene Forschungs- und Entwicklungsthematik nicht mit Eigenmitteln und auf eigenes Risiko in dem erforderlichen Umfang betrieben werden können. Durch die Förderung konnten signifikante Forschungs- und Entwicklungsergebnisse erzielt werden.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Fraunhofer FOKUS ist bestrebt, den Anteil von Industrieprojekten und -kooperationen mit Hilfe der Entwicklungen und Ergebnisse in diesem Vorhaben zu erhöhen. Eine weitere wissenschaftliche und technische Zusammenarbeit mit den BEST-Projektpartnern insbesondere auch im Rahmen des 8. Energieforschungsprogramms wird angestrebt, um die Energiewende voranzubringen und diese mit digitalen Anwendungen, Diensten auch die Umsetzung neuer Geschäftsmodelle in der Energiewirtschaft zu unterstützen. Fraunhofer FOKUS konnte durch den Kompetenzausbau und Erkenntnisgewinn in diesem Vorhaben seine wissenschaftliche Exzellenz weiter ausbauen, insbesondere da Fraunhofer FOKUS bereits bei der Entwicklung von Lösungen auf die Übertragbarkeit der Lösungsansätze achtet. Dadurch erhöht Fraunhofer FOKUS seine Attraktivität für Software-Unternehmen in der Energiewirtschaft als Forschungs- und Entwicklungspartner. Eine Verwertung der Ergebnisse erfolgt somit wissenschaftlich-technisch durch Kompetenzausbau, Ergebnisverbreitung, Knowhow-Transfer oder durch Verwendung der F&E-Ergebnisse als Ausgangsbasis für weitere Projekte. Konkret waren folgende Maßnahmen geplant:

- Kurzfristig (1-3 Jahre)
    - Wissenschaftliche Veröffentlichungen bei diversen Fachtagungen und Veranstaltungen: Ein wissenschaftliches wurde zusammen mit Projektpartnern erarbeitet und zur Veröffentlichung bei einer Fachkonferenz eingereicht (siehe unten).

    - Vergabe und Betreuung von Bachelor- und Masterarbeiten: Leider konnten wir weder eine Studentin noch einen Studenten für eine Bachelor- oder Masterarbeit gewinnen, allerdings wurden die F&E von Fraunhofer FOKUS im Projekt durch eine studentische Hilfskraft unterstützt, die dabei von uns zum wissenschaftlichen Arbeiten angeleitet wurde.
- Mittelfristig (3-7 Jahre)
    - Transfer der entwickelten Managementtechnologien, graphikbasierte Nutzer-interaktionstechniken und der Optimierungsverfahren in andere Bereiche der Energiewirtschaft, z.B. zur Minderung von Emissionen (u.a. Treibhausgase), Erhöhung des Eigenverbrauchs von erneuerbaren Energien: Ein Nachfolgeprojekt mit Partnern aus diesem Projekt und mit weiteren Vertretern aus der Energiewirtschaft im Rahmen des 8. Energieforschungsprogramms ist geplant; erste Schritte wurde bereits unternommen (u.a. Kontaktaufnahme mit weiteren Partnern).
- Langfristig (>7 Jahre)
    - Wissens- und Technologietransfer in KMU, Kommunen, Genossenschaften oder Interessensgruppen und auch in andere Wirtschaftszeige.
    - Langfristiger Ausbau und Transfer von FOKUS-Expertise im Bereich Energie-, Anlagen- und Stakeholdermanagement.

Beide Ziele verfolgen wir bereits seit längerem und werden dies weiterhin tun.

5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens haben wir von keinen neuen Erkenntnissen anderer auf dem Gebiet lokaler Strommärkte erfahren, die ein Umplanen oder Neuausrichten der Arbeitsschwerpunkte oder der angestrebten Ziele von Fraunhofer FOKUS im Projekt erfordert hätten.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Mit den Projektpartnern Oli Systems und fortiss wurde zur „4th International Conference on Smart Grid and Energy Internet (SGEI 2024)“ im Dezember 2024 in Shenyang, China ein wissenschaftliches Papier mit dem Thema „Decentralized Optimal Scheduler for Prosumers in a Local Electric Energy Market“ zur Veröffentlichung eingereicht. In der Abhandlung beschreiben wir die im BEST-Projekt umgesetzte optimierende Betriebsstrategie und weisen anhand von Simulationen deren Nutzen nach. Inzwischen wurden wir vom Programmkomitee der Konferenz informiert, dass die Einreichung zur Veröffentlichung angenommen wurde.