Schlussbericht im Rahmen des BMWi-Technologieprogramms

Anwendungsorientierte nichtnukleare FuE im

7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung

Energieoptimierte Gebäude und Quartiere

Monitoring / Optimierung von Heizungsanlagen über Web-Schnittstellen

(Kurztitel: SHANGO)

Förderkennzeichen: 03EN1044A-C

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2021 - 31.03.2025

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zuwendungsempfänger

GreenPocket

Fraunhofer IIS

BOSCH Invented for life

Teilvorhaben

GreenPocket: Cloud basierte Plattform für KI-Algorithmen

Fraunhofer IIS/EAS: Fehlersimulation und KI

Bosch TT: KI-Plattform zur Fehlerbildanalyse von connectivity-basierten HVAC Systemen

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

I KURZDARSTELLUNG

1 Aufgabenstellung

Das übergeordnete Projektziel des Vorhabens SHANGO (Smarte Heizungs-Anlagen-Optimierung) liegt in der Effizienzsteigerung von Heizungsanlagen in Ein- und Mehrfamilienhäusern. Bei vielen kleinen und mittleren Anlagen führen fehlerhafte Parametrierung oder Bedienung, Montagefehler oder unentdeckter Verschleiß zu ineffizientem Betrieb. Diese Fehler sollen identifiziert und ausgewertet werden und so hilfreiche Optimierungshinweise liefern. Durch die automatisierte Problemerkennung sollen Arbeitsintensität und Kosten der Fehlerdiagnose und Problemlösung reduziert werden. Das technische Gebäudemanagement soll effizienter und nachhaltiger gestaltet werden.

2 Voraussetzungen

An der Durchführung des Vorhabens waren die drei Projektpartner GreenPocket GmbH, Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) und Bosch Thermotechnik (TT) GmbH beteiligt. Die durch diese Partner eingebrachten Kompetenzen, Erfahrungen und Kenntnisse sowie die Zurverfügungstellung der benötigten Software, Heizungsanlagen und Prüfständen bildeten die Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens. Das Konsortium vereint Spezialisten aus den Bereichen Heizung, Kühlung und Warmwasser, aus dem dezentralen, digitalen Energiemanagement, der Energiedatenvisualisierung und -analyse, sowie aus der Gebäudeautomation und Predictive Maintenance. Bosch TT stellte die zu analysierende Systemtechnik bereit, unterstützte das Fraunhofer IIS beim Laboraufbau und stellte Anlagendaten aus dem Feld sowie gesammelte Erkenntnisse zu typischen Fehler- und Ausfallmechanismen bereit. Darüber hinaus entwickelte Bosch eine standardisierte Datenaustauschschnittstelle zur Übertragung der gesammelten Anlagendaten. Die Forschungseinrichtung Fraunhofer IIS brachte Wissen in den Bereichen Modellierung und Simulation in das Projekt ein. Das Fraunhofer IIS baute im Rahmen des Projektes den Hardware-in-the-Loop (HiL)-Prüfstand sowie das Testlabor auf und stellte diese zur Verfügung. GreenPocket brachte Expertise in den Feldern Energiedatenvisualisierung und -analyse, der Entwicklung von Datenmodellen und der Schnittstellenintegration sowie User Experience Design in das Vorhaben ein. Die unternehmenseigene Softwareplattform wurde im Rahmen des Projektes bereitgestellt und weiterentwickelt. Zusätzlich unterstützte GreenPocket bei der Zusammenführung von Labor- und Felddaten sowie bei der Analyse der gesammelten Daten.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Fokus des Vorhabens lag auf der Erstellung einer Bibliothek von häufigen Anlagenfehlern und Effizienzpotenzialen aus Datenmustern in Sensordaten von Heizungsanlagen, der Entwicklung und Integration der Bosch TT-Webschnittstelle zur Übertragung von Sensordaten sowie der anwenderfreundlichen Visualisierung und Analyse der Anlagendaten in der GreenPocket-Softwareplattform. Darüber hinaus sollten Konzepte entwickelt werden, um die gewonnenen Erkenntnisse für Anwendergruppen wie z. B. Installateure oder Betreiber von Heizungsanlagen nutzbar zu machen.

Im Projektverlauf wurden von den drei Projektpartnern unterschiedliche Arbeitspakete schwerpunktmäßig bearbeitet. Bosch TT befasste sich insbesondere mit der Anforderungsanalyse

(AP 1) sowie der Schnittstellenentwicklung (AP 2). Das Fraunhofer IIS legte den Fokus auf die Einrichtung des Prüfstands und die Durchführung der Laboruntersuchungen sowie die Entwicklung von Simulationsmodellen zum Lastverschiebungspotenzial. Dies entspricht den Arbeitspaketen vier und sechs. GreenPocket fokussierte sich auf den Aufbau der notwendigen IT-Infrastruktur (AP 3) zur Visualisierung der Anlagendaten sowie die Integration der von Bosch entwickelten Schnittstelle (AP 2). Darüber hinaus beschäftigte sich GreenPocket mit den Möglichkeiten der Produktifizierung der Forschungsergebnisse. (AP 8).

Die ursprüngliche Planung ließ sich im Projektverlauf aus unterschiedlichen Gründen nicht halten. Zunächst beeinträchtigte die Corona-Pandemie den Projektverlauf. Zudem kam es beim Neubau des Gebäudes der Fraunhofer IIS, in dem u. a. der HiL-Prüfstand aufgebaut werden sollte, zu unvorhersehbaren baulichen Verzögerungen. Zusätzlich entstanden Verzögerungen durch Lieferengpässe bei Lieferungen benötigter Hardware. Darüber hinaus wurden einige für das Projekt relevante Betriebsdaten, wie bspw. der Energieverbrauch zu einem späteren Zeitpunkt als ursprünglich anvisiert in die Bosch Partner API integriert. Daher wurde eine kostenneutrale Verlängerung um einen Zeitraum von sechs Monaten beim Projektträger beantragt und bewilligt. Diese Verlängerung der Laufzeit stellte sicher, dass die ursprünglichen Ziele mit der notwendigen Intensität weiterverfolgt werden konnten.

Der Fokus des Aufbaus einer herstellerübergreifenden Plattform für die Optimierung von Heizungsanlagen verschob sich im Projektverlauf hin zu einer umfassenden Integration von Bosch-Anlagen, da im Markt wenig Bereitschaft zur Entwicklung herstellerübergreifender Standards zu erkennen war. Dennoch lässt sich als Ergebnis der erfolgreiche Aufbau einer durchgängigen, modularen IT-Architektur mit API-Integration, Digitalem Zwilling und nutzerfreundlichem Dashboard festhalten. Das System ermöglicht eine datenbasierte Optimierung und Fehlererkennung in Heizsystemen. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass Lastverschiebungsstrategien bei Wärmepumpen ohne Komfortverlust realisierbar sind. Es wurden viele Grundsteine für eine weiterführende Anbindung anderer Heizungsanlagenhersteller gelegt, sollten sich die Marktbedingungen in Zukunft verändern.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wird

Die Bearbeitung des Vorhabens orientierte sich kontinuierlich am aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik. Neben der engen Anbindung an laufenden Promotionsvorhaben am Fraunhofer IIS, flossen auch wissenschaftliche Erkenntnisse aus relevanten Veröffentlichungen ein, wie beispielsweise der simulationsfokussierte Beitrag „FMI4BIM – Standardisierte Schnittstelle für Analysemodelle von Anlagen- und Gebäudekomponenten für BIM-basierte Planung und Betrieb“.

Anknüpfungspunkte an den wissenschaftlichen und technischen Stand ergaben sich insbesondere aus der bisherigen Nutzung von Sensordaten. Im Projekt SHANGO wurden vorhandene Sensorik und Kommunikationsmöglichkeiten genutzt, um eine kontinuierliche Überwachung und damit einhergehende Nutzung von Effizienzpotenzialen zu ermöglichen. Im Rahmen der Durchführung von Laborstudien wurde eine Fehlerdatenbank generiert, die Betriebsmuster häufiger Fehlerfälle oder Ineffizienzen darstellt und die Grundlage für weitere Datenanalysen beschreibt. Dieser Ansatz bildet die Basis für Optimierungen sowie die Erkennung und kostengünstige Behebung von Effizienzproblemen im Feldbetrieb von kleinen und mittleren Heizungsanlagen. So werden vorhandene Monitoring- und Kommunikationsmöglichkeiten genutzt, um die Regelungs- und Automatisierungstechnik zu verbessern und effizienter und effektiver zu nutzen.

Im Rahmen der Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete wurde nicht auf bekannte Schutzrechte oder Verfahren zurückgegriffen. Der Arbeitsfortschritt basierte auf den durch die jeweiligen Projektpartner eingebrachten Systemen, Weiterentwicklungen und Kompetenzen. Aufbauend auf den im Fraunhofer-Vorgängerprojekt ARCHE gewonnenen Erkenntnissen wurde im Arbeitspaket 6 Lastverschiebungsanalysen unter verschiedenen Randbedingungen für Wärmepumpen

durchgeführt. In ARCHE wurden dazu bereits verschiedene Ansätze entwickelt, wie mit KI und RL-Lernverfahren eine vorausschauende Energiesteuerung implementiert werden kann. Dazu wurden auch verschiedene Simulationsmodelle entwickelt, welche in SHANGO weitergenutzt wurden. Zusätzlich zum ARCHE-Projekt wurde auch auf Bibliotheken, Modelle und Schnittstellen, aus anderen zurückliegenden Projekten und Entwicklungen zurückgegriffen. Weiterhin wurde das Wissen von Fachexperten der Projektpartner herangezogen, um die einzelnen Arbeitspakete zu bearbeiten.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während der gesamten Projektlaufzeit tauschten sich die Projektpartner regelmäßig intensiv aus, um gemeinsam bereits erfolgte Arbeitsschritte zu bewerten und anstehende Arbeiten zu planen. Zusätzlich brachten die Partner Wissen aus ihrem geschäftlichen bzw. wissenschaftlichen Umfeld in die Projektarbeit ein. Darüber hinaus wurden aktuelle Arbeitsstände und Analyseergebnisse auf wissenschaftlichen Konferenzen wie der ARCI’2025 in Granada, Spanien, oder Fachmessen wie der E-World bzw. der Internationalen Sanitär- und Heizungsmesse (ISH) präsentiert und diskutiert. Außerdem fand während der Projektlaufzeit regelmäßig ein Austausch mit einem Expertengremium statt.

Inhalt

1. Einleitung 8
1.1. Aufgabenstellung laut Projektantrag 8
1.2. Zur Gliederung dieses Berichts 9
1.3. Verzögerung des Projektzeitplans 9
2. Anforderungsanalyse (AP 1) 12
2.1. Festlegung Energiesysteme und Hydraulik-Schemata 12
2.2. Zusatz-Information Hybrid-Anlagen 13
2.3. Fehlerbilder und Priorisierung 14
2.4. Bestandsaufnahme Datenbestände und Verfügbarkeit 15
2.5. Anforderungsanalyse für Datenanalysestrategie 16
3. Schnittstellenentwicklung (AP 2) 16
3.1. Konzeptentwicklung und Definition für generische Datenaustauschschnittstelle 16
3.2. Implementierung der Schnittstelle für Bosch-Systeme 19
4. IT-Infrastruktur (AP 3) 23
4.1. Flexibilisierung der Messdaten 23
4.2. Stammdaten-Flexibilisierung 24
4.3. Etablierung eines Energiemanagement Microservice 25
4.4. Abstrahierung für den Nutzenden 25
5. Laboruntersuchungen Fehlerinjektion (AP4) 27
5.1. Einbindung Bosch TT Simulationslabor / Simulationsdaten 27
5.2. Aufbau Labormessstand 28
5.3. Konfiguration und Parametrierung 30
5.4. Experimentelle Fehlerinjektion 30
6. Analysestrategien und Algorithmen zur Betriebsfehlererkennung (AP 5) 34
6.1. Auswertung der Experimente 34
6.2. Vorverarbeitung und Datenmigration 34
6.3. Analyseverfahren 35
7. Lastverschiebungspotenzial / Smart Grid-Strategien (AP 6) 39
7.1. Ziel der Simulation: 39
7.2. Simulationsergebnisse und deren Auswertung 41
7.3. Schlussfolgerungen und Ausblick 42
8. Feldtest (AP 7) 43

9. Validierung (AP 8) 44
9.1. Wesentliche Anwendungsfälle 44
9.2. Nutzerinterviews 44
9.3. Analyse und Evaluation der Modellergebnisse 45
9.4. Einordnung der Analyseergebnisse in den Gesamtkontext des Projektes 45
9.5. Zusammenstellung der Ergebnisse und Erfassung von Verbesserungsvorschlägen 46
10. Zusammenfassung der Ergebnisse 48
Anhang 51
10.1. A1 Literatur 51
10.2. A2 Liste der im Projekt hervorgegangenen Publikationen 52
10.3. A3 Anschriften der Projektpartner 52
Abbildungen 53
Tabellen 54
Abkürzungsverzeichnis 54

1. Einleitung

1.1. Aufgabenstellung laut Projektantrag

Im Antrag für das Forschungsprojekt „SHANGO“ wird das Projektziel wie im Nachfolgenden zitiert, umrissen:

„Ziel des Projekts SHANGO ist die Effizienzsteigerung von Heizungsanlagen in Ein- und Kleinfamilienhäusern. Durch die smarte Identifizierung von Fehlerquellen, die eine Energieverschwendung zur Folge haben, soll langfristig die Effizienz der Heizungsanlagen im Gebäudebestand gesteigert werden. Durch KI-basiertes Monitoring und Optimierung des Betriebes soll der unerwünschte Energieverbrauch und der damit verbundene CO2-Ausstoß reduziert werden. Hierfür stehen vor allem Systeme mit Wärmepumpen und deren Potenzial zur Lastverschiebung im Fokus. In vielen kleinen und mittleren Anlagen, wie sie typischerweise in Ein- und kleinen Mehrfamilienhäusern zu finden sind, führen fehlerhafte Bedienung und Parametrierung, Montagefehler und unentdeckter Verschleiß zu ineffizientem Betrieb, d. h. zur Verschwendung von Energie, respektive Erhöhung des CO2-Ausstoßes. Dies gilt insbesondere für hybride Anlagen (unterschiedliche Wärmeerzeuger, z. B. für Grund- und Spitzenlastfälle), die aufgrund der Umschaltung der Betriebsmodi zusätzliche Anforderungen im Betrieb stellen.

Viele dieser Betriebsfehler bleiben unentdeckt oder lassen sich nicht wirtschaftlich in einem Vor-Ort-Termin durch eine Fachkraft beheben, obwohl bereits heute vielfach Sensoren und Kommunikationsschnittstellen (kleine Web-Server) in den Anlagen existieren. Die aktuell verbaute Sensorik dient derzeit jedoch vorrangig der Betriebssicherheit. Sensordaten werden daher nur selten und unregelmäßig abgefragt, obwohl diese prinzipiell auch für das Monitoring und die Optimierung genutzt werden könnten. Daher ist einerseits eine Ausweitung der Abfrageintervalle der bestehenden Sensorik sowie die Erweiterung der Anlagen um zusätzliche Sensorik notwendig, um die gängigen Ansätze der modellbasierten Betriebsoptimierung direkt zu unterstützen.

Im Projekt SHANGO werden die vorhandenen Sensoren und Kommunikationsmöglichkeiten für ein ständiges Monitoring und Optimieren von Heizungsanlagen genutzt. Die fehlenden Informationen werden mit Hilfe von künstlicher Intelligenz (KI) bzw. Machine Learning-Verfahren, verknüpft mit zusätzlichen Daten (Wetter, weitere Gebäudedaten wie Baujahr, Grundfläche etc.) sowie den beobachteten Betriebsmustern generiert. In Laborstudien wird, unter Einsatz von Demonstratoren, eine SHANGO Monitoring/Optimierung von Heizungsanlagen über Webschnittstellen Fehlerdatenbanken, die typische Anlagen-Betriebsmuster der häufigsten Effizienzprobleme nachstellt, generiert und analysiert. Diese dient dem späteren Training der KI-basierten Algorithmen und bildet somit das Fundament zur Erkennung von Effizienzproblemen im Feldbetrieb. Durch dieses Vorgehen kann ein erheblicher Teil der Bestandsanlagen mit minimalem Installations- und Betriebsaufwand regelmäßig überwacht und der Betrieb in einem Folgeschritt optimiert werden. Dabei wird, soweit möglich, auf zusätzliche Instrumentierung mit Sensoren, Steuerungs- und Kommunikationshardware verzichtet. Auf diese Weise können großskalig niederschwellige Effizienzpotenziale gehoben werden, die bislang unerreichbar waren.“

Aus den Projektzielen lassen sich acht Arbeitspakete ableiten. Für die einzelnen Arbeitspakete sind verschiedene Projektpartner verantwortlich, welche in Abbildung 1 dargestellt sind.

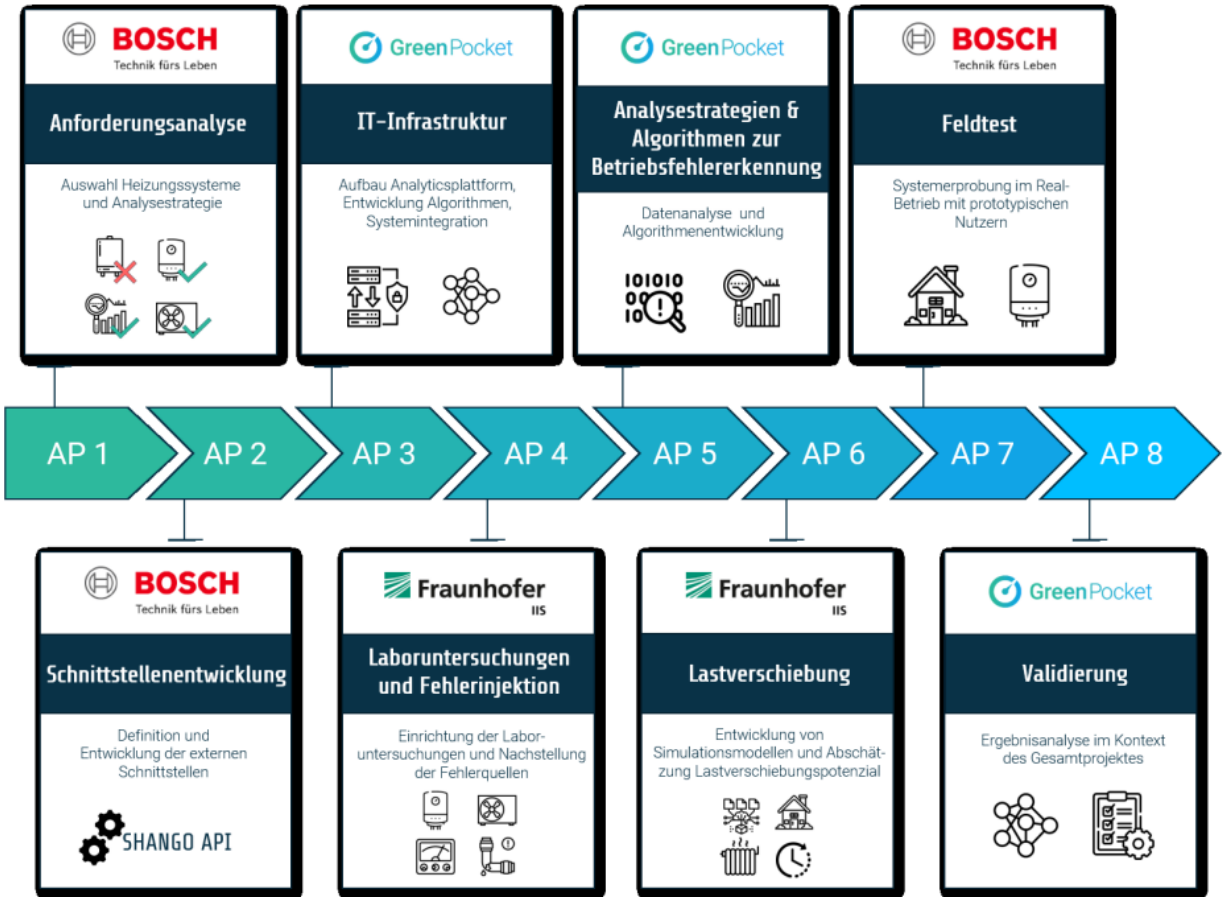


Abbildung 1: Arbeitspakete des Projektes "SHANGO"

1.2. Zur Gliederung dieses Berichts

Für den Abschlussbericht wurde eine Gliederung gewählt, die sich an den wesentlichen Arbeitsinhalten orientiert. Der Bericht beginnt mit der Anforderungsanalyse, in der die Grundlagen und Anforderungen für die datenbasierte Fehlererkennung sowie die Systemintegration festgelegt werden. Im Anschluss werden die Schnittstellenentwicklung und die IT-Infrastruktur vorgestellt, die eine zentrale Rolle bei der Datenerfassung, -übertragung und -analyse spielen. Danach werden die Laboruntersuchungen zur Fehlerinjektion sowie die Entwicklung von Analyseverfahren und Algorithmen zur Fehlererkennung beschrieben. Es folgen die Abschnitte zum Lastverschiebungspotenzial, dem Feldtest sowie zur abschließenden Validierung der entwickelten Ansätze.

Der Bericht wurde gemeinsam von allen Partnern erstellt. Am Beginn jedes Abschnitts ist angegeben, welcher Partner die beschriebenen Leistungen erbracht hat.

1.3. Verzögerung des Projektzeitplans

Während der Projektlaufzeit kam es in mehreren Bereichen zu Verzögerungen, die sich gegenseitig beeinflussten und zu einer notwendigen Verlängerung des Gesamtzeitplans führten. Eine zentrale Ursache lag in unvorhergesehenen baulichen Verzögerungen beim Neubau des Gebäudes am Standort des Fraunhofer IIS, in dem der HiL-Prüfstand aufgebaut werden sollte. Diese Bauverzögerungen verzögerten den Start der Laboruntersuchungen erheblich und führten zu einer

Verschiebung nach hinten. Parallel dazu traten Lieferengpässe bei benötigten Hardware-Komponenten auf, was den Aufbau des Testlabors zusätzlich verzögerte.

Darüber hinaus wurden einige für das Projekt essenzielle Betriebsdaten, wie beispielsweise Energieverbrauchsdaten, erst später als ursprünglich vorgesehen in die Bosch-Partner-API integriert. Diese Verzögerung wirkte sich direkt auf die Schnittstellenentwicklung sowie auf die nachgelagerten Arbeitspakete zur Datenanalyse und zur Entwicklung von Fehlererkennungsalgorithmen aus.

Die Covid-19-Pandemie trug zusätzlich dazu bei, dass wichtige Abstimmungen verzögert oder nur eingeschränkt möglich waren und einige geplante Fachkonferenzen und Messen abgesagt wurden. Auch die Verfügbarkeit von Feldtestdaten war durch die verzögerte Entwicklung der Analyseverfahren eingeschränkt, sodass der geplante Feldtest nicht wie vorgesehen umgesetzt werden konnte.

Insgesamt führten diese miteinander verbundenen Verzögerungen dazu, dass eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts um sechs Monate notwendig wurde, um die wissenschaftlichen und technischen Ziele des Vorhabens mit der erforderlichen Tiefe und Qualität weiterverfolgen zu können. Die zeitlichen Verschiebungen des Projektplans sind in Abbildung 2 abgebildet.

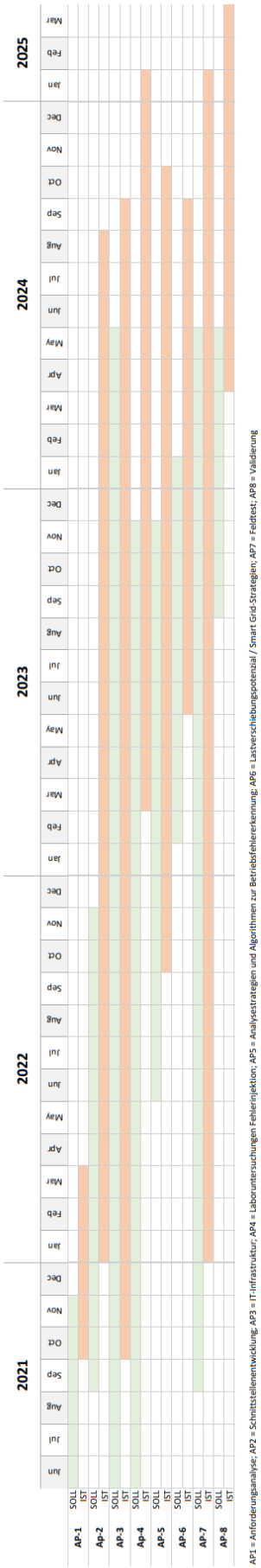


Abbildung 2: Gannt Chart zur Abweichung im Projektzeitplan

2. Anforderungsanalyse (AP 1)

Verantwortlicher Projektpartner: Bosch TT

2.1. Festlegung Energiesysteme und Hydraulik-Schemata

Nachfolgend wird der im Projekt erarbeitete und durchgeführte Ablauf zur Selektion relevanter Anlagen skizziert. Zunächst geht es um die Identifikation von Anlagen mit folgenden Merkmalen:

- Durchdringung im Markt in Zentral- und Nordeuropa: Ziel ist der Fokus der Analyse im Projekt auf Systeme mit verbreitetem Einsatz im Feld u. a. um einen skalierbaren Effekt im Kontext Effizienz und Energieoptimierung zu erzielen.
- Bündelung von Anlagen mit deckungsgleicher Hardware (bspw. CS7001i und CS7800i). Unter der Annahme, dass sich physikalisch baugleiche Systeme analog verhalten, lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse auf weitere Systeme im Feld übertragen. Bspw. wird im Kontext von Wärmepumpensystemen die gleiche Außeneinheit mit unterschiedlichen Inneneinheiten kombiniert. Ein Fehler in der Außeneinheit sollte somit unabhängig von der Inneneinheit potenziell korrekt übertragen werden können.
- Sicherstellen der Vernetzungsfähigkeit der Geräte sowie Überprüfung der Verfügbarkeit der Datengrundlage im Feld. Durch den zweiten Punkt soll die Vergleichbarkeit von Testergebnissen sichergestellt werden. Da die Analyse der Fehlerzustände datenbasiert stattfinden soll, ist die Vernetzungsfähigkeit der Systeme eine zwingende Voraussetzung und beeinflusst somit die Auswahl maßgeblich. Neben der grundsätzlichen technischen Voraussetzung wurde die aktuelle Anschlussrate im Feld mit betrachtet, um eine breite Datenbasis z. B. zur Validierung der Ergebnisse sicherstellen zu können.
- Sicherstellen, dass ein Hybrid-Aufbau möglich ist, um die Szenarien HP-only, GB-only und Hybrid Tests gewährleisten zu können. Es wurden Systeme/Komponenten ausgewählt, die neben dem stand-alone Betrieb auch die Kombination in einem Hybrid-Verbund ermöglichen (Gas-Therme kombiniert mit einer Luft-/Wasser Wärmepumpe). Damit könnte der Rüst- und Umbauaufwand am Prüfstand minimiert werden. Ebenso kann im Kontext Hybrid auf Ergebnisse aus einem vorausgegangenen Projekt zurückgegriffen werden, u. a. bzgl. energieeffizienz-relevanter Fehlerbilder (siehe Zusatz-Information Hybrid-Anlagen).
- Hydraulikschemata: Es wurde versucht, auf Standardhydrauliken zu fokussieren, u.a. da diese im Feld die größte Abdeckung zeigen. Die Hydraulik bestehend aus einem ungemischten, einem gemischten Heizkreis und einem Warmwasser-Kreis legt damit auch die hydraulischen Anforderungen an den Prüfstand fest. Die unter den genannten Rahmenbedingungen ausgewählten Systeme sind nachfolgend gelistet

Tabelle 1: Benutzte Produkte und Komponenten und Zuordnung zum System-Cluster

System-Cluster	Ausgewähltes Produkt / Komponenten
Gas-Condensing	Bosch GC9000iW 20kW
A/W Wärmepumpe	Bosch CS7000i AW 9 IRM-S
L/W Wärmepumpe	Bosch CS7800iLW 12 BHM
Hybrid-Systeme (Gas/HP)	Bosch GC9800iW mit HW-Set HYC25, bestehend aus: • Gas-Brennwert GC9800iW 30 H 23 • Compress 7000i AW • Hybrid-Manager MH200-1

2.2. Zusatz-Information Hybrid-Anlagen

Das Betriebsverhalten von Wärmepumpenanlagen wird aufgrund der Aktualität als Schlüsseltechnologie zur Erreichung der Klimaziele in der Literatur umfassend untersucht. Bei genauer Auseinandersetzung mit der Thematik wird ersichtlich, dass jedoch nicht mehr nur die allgemeine Beschreibung bzw. Funktionsweise solcher Anlagen im Vordergrund steht, sondern die möglichst effiziente Betriebsweise eine führende Rolle einnimmt. Seifert beschreibt beispielsweise im VDE-Fachbuch „*Effizienter Betrieb von Wärmepumpenanlagen*“ aus eigener langjähriger Erfahrung als Wärmepumpengutachter klassische Planungsfehler, die vermieden werden können (Seifert, 2024).

Ebenso wird in der Literatur der Gebäudebestand, der den Großteil der Wohngebäude in der Bundesrepublik ausmacht, adressiert. Eine Untersuchung des Umweltbundesamtes beschreibt die technischen und wirtschaftlichen Vorteile, Folgen und Grenzen des breiten Wärmepumpeneinsatzes aus einzelwirtschaftlicher wie energie-systemischer Perspektive in Bestandsgebäuden (Bettgenhäuser et al., 2024). Darauf aufsetzende Forschungsprojekte wie z. B. „LowEx Bestand“ erarbeiten zusammen mit Industriepartnern neue Erkenntnisse bzgl. des effizienten Einsatzes von Wärmepumpenanlagen (LowEx-Konzepte Für Die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden LowEx-Bestand Analyse, 2023). Interessanterweise werden dort auch Hybridwärmepumpenanlagen, also die Kombination von zwei verschiedenen Energiequellen, genauer betrachtet. Neubert et. al. (2022) untersuchen im Projektkontext u.a. die Betriebscharakteristika von Hybridwärmepumpenanlagen mit Hilfe von Simulationsergebnissen und Felddaten. Die Autoren beschreiben die Limitierung klassischer Wärmepumpensysteme bei hohen Vorlauftemperaturen und eine zu geringe Heizleistung bei niedrigen Außentemperaturen. Ein zusätzlicher Gas- bzw. Ölkessel kann Spitzenlasten abdecken und hohe Vorlauftemperaturen ermöglichen, sodass durch die Kombination beider Heizsysteme auch im Gebäudebestand nachhaltige Wärme erzeugt werden kann. Wie in der Veröffentlichung ebenfalls beschrieben gibt es Fehlerfälle, die die effiziente Betriebsweise der Anlage stören können. In dem gezeigten Fall ermöglicht eine defekte Rückschlagklappe im Heizkreis-Set das Entstehen von Fehlströmungen. Eine erhöhte Temperatur im Heizkreis und leicht geringere Effizienz der Wärmeerzeuger sind die Folgen (Neubert et al., 2022).

Aufgrund des aktuellen Einsatzes dieses Anlagentyps im Gebäudebestand und bereits vorangegangenen Forschungsprojekten mit identifizierten Fehlerfällen wird eine solche Hybridheizungsanlage für den SHANGO Versuchsstand ausgewählt. Hierfür liegen bereits

wissenschaftliche Veröffentlichungen und Untersuchungen zur Betriebsweise vor. Ebenfalls können Analysemodelle auf der vorhandenen Datenbasis und mit Simulationsmodellen entwickelt und getestet werden. Für das Projekt relevante Fehlerfälle liegen aus der Praxis vor und erzielte Erkenntnisse können in die Projektgruppen zurückgespielt werden und dort Mehrwert bieten. Ebenfalls bietet die Hybridwärmepumpenanlage die Möglichkeit durch synthetische Kraftstoffe bzw. Wasserstoff nach der Betriebsoptimierung weiter als Forschungsgrundlage für die 100% nachhaltige Heizungsanlage zur Verfügung zu stehen.

2.3. Fehlerbilder und Priorisierung

Neben der Festlegung der zu prüfenden Systeme (siehe 2.1) wurde zur weiteren Eingrenzung und Bewertung potenzieller Schwachstellen folgender Ablauf zur Selektion relevanter Fehlerbilder angewendet: Kritische Fehlerbilder in den Komponenten des Heizsystems werden dabei über einen indikatorenbasierten Ansatz identifiziert und priorisiert. Wie in Abbildung 3 dargestellt, stützt sich dieser Ansatz auf mehrere Indikatoren, die teils datenbasiert bestimmt und teils durch Experteneinschätzungen ergänzt werden. Während einige Indikatoren aus der Analyse von Betriebsdaten abgeleitet werden, beruhen andere auf dem Erfahrungswissen von Fachkräften mit tiefem Systemverständnis. Im Folgenden werden die eingesetzten Indikatoren sowie deren Ableitung und Bedeutung näher erläutert.

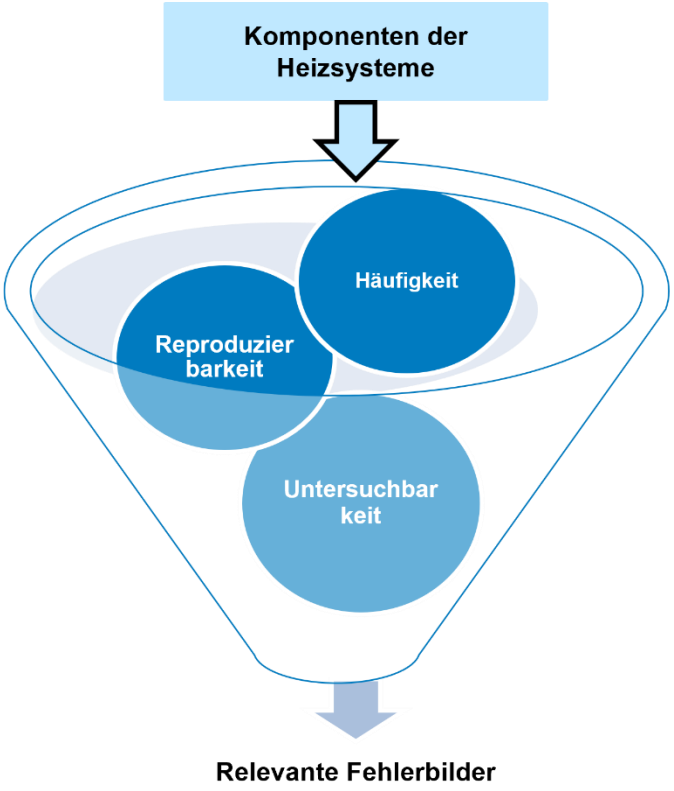


Abbildung 3: Indikatoren basierte Auswahl kritischer Fehlerbilder

Häufigkeit: Auf Basis der nachfolgenden Quellen wurden die im Feld auftretenden Fehlerbilder auf ihre Häufigkeit geprüft. Die Untersuchung wurde auf die festgelegten Systeme beschränkt: Garantiedaten, u. a. am Beispiel der ausgewählten Wärmepumpe:

- Garantiedaten der letzten 7 Jahre vom Vorgänger (CS7000 12LWM) sowie der aktuellen Serie (CS7800iLW 12)

In Relation zur Anzahl der verkauften Einheiten (Im Beispiel Wärmepumpe: 12.600 Systeme verkauft im betrachteten Zeitraum)

Early Warning List: Kontext Wärmepumpe: Da die aktuelle Serie erst kurz vor dem Projekt SHANGO eingeführt wurde, konnten Qualitäts- und Fehlerzahlen aus der frühen Feldbeobachtung (sog. “Early Warning List”) in das Projekt überführt werden, um die Auswahl der maßgeblich häufigsten Fehlerbilder zu beeinflussen

Expertenbewertung: Neben der Häufigkeit als Kriterium wurden Experteninterviews durchgeführt u.a. bzgl. nachfolgender Kriterien:

- Reproduzierbarkeit des Fehlerbildes: Einschätzung der Experten ob der Fehler im Labor realistisch nachgestellt werden kann.
- Untersuchbarkeit (in Daten): Einschätzung der Experten, ob der Fehler im Zusammenhang mit erfassten Anlagendaten (z. B. Sensorik, Aktorik, Fehlercodes usw.) steht.
- Systemoptimierung (Effizienz) ja/nein: Einschätzung der Experten, ob der Fehler einen Einfluss auf die Effizienz des Systems haben kann.

Die Ergebnisse aus Schritt 1 (Häufigkeitsanalyse) und Schritt 2 (Analyse von domänenspezifischem Expertenwissen) wurden durch eine Eisenhower Matrix erstellt, um die zu untersuchenden Fehlerbilder final festzulegen. Nachfolgend ist eine Darstellung der Matrix für die ausgewählte Sole-Wärmepumpe (analoges Vorgehen für alle weiteren Produktgruppen) aufgeführt. (Abbildung 4)

Fehlerfälle / kritische Komponenten	Häufigkeit	Reproduzier-barkeit	Untersuchbarkeit (in Daten)	Fokus auf System-optimierung
HMI flickern	3	0	0	nein
Wireless room sensor	2	1	3	nein
Inverter	3	2	2	ja
Leckage im Solekreislauf	3	2	2	nein
Elektrischer Zuheizer	2	2	2	ja
CUHP Installer Board	2	2	2	ja
Zirkulationspumpe	2	2	2	ja
Installationsfehler (e.g. sensors mixed up)	3	3	1	nein
Software Update	2	3	0	nein
Temperature Sensor (NTC Type)	1	1	2	nein
Expansionsventil Motor	1	1	1	nein
Valve automatic air vent	1	0	0	nein

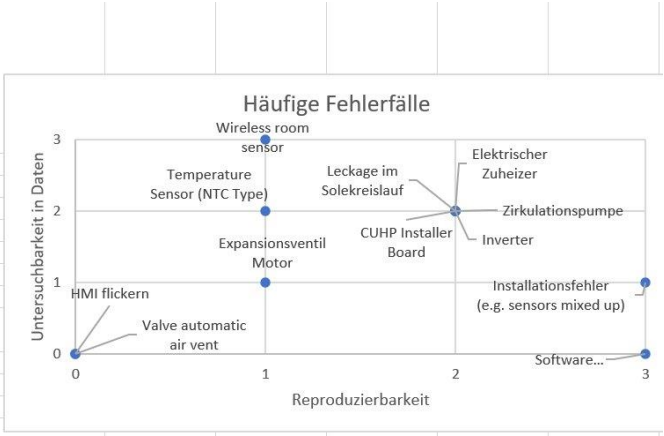


Abbildung 4: Eisenhower-Matrix zur Kategorisierung der Fehlerbilder für die ausgewählte Sole-Wärmepumpe

2.4. Bestandsaufnahme Datenbestände und Verfügbarkeit

In diesem Arbeitspaket wurde geprüft, welche Daten für die in der Anforderungsanalyse festgelegten Systeme bereits bei Bosch TT vorhanden sind. Ebenso wurde die Verfügbarkeit für das Projekt geprüft, u. a. bzgl. Datenschutz und DSGVO. Als Arbeitsergebnis wurden die vorhandenen Datensätze quantifiziert bzgl.

- Anzahl der Systeme nach Produktgruppe

- Anzahl der Tage der Datenaufzeichnung
- Anlagen-Konstellation (Prüfstand/Labor, Feldtest, Serienanlage bei Endkunden)

Den größten vorhandenen Datensatz stellt die Gruppe der Seriengeräte bei Endkunden dar. Aus Gründen des Datenschutzes ist eine Übertragung dieser Daten an das Projekt nicht möglich bzw. der Aufwand für eine rechtssichere Anonymisierung müsste bei Bedarf geprüft werden.

Rückwirkend zum Ende des Projektes wurde die Phase der Validierung der Fehlermuster auf Realanlagen (also nicht unter Laborbedingungen) nicht erreicht, so dass die Frage der Übertragbarkeit der Seriengeräte-Daten nicht weiter behandelt wurde.

2.5. Anforderungsanalyse für Datenanalysestrategie

Das Zusammenführen der Daten, die direkt von der Wärmepumpe an die Bosch-Cloud gesendet wurden und die Daten, die von Fraunhofer Prüfstand aufgezeichnet wurden, stellte einen entscheidenden Schritt zur Sicherstellung der Datenqualität dar. Die Synchronisierung erfolgte anhand der Zeitstempel, wobei Lücken oder Ausfälle, beispielsweise durch instabile Verbindungen zur Bosch-API, explizit identifiziert und berücksichtigt werden mussten. Diese Lücken konnten potenziell die Aussagekraft der Analyse beeinträchtigen und wurden daher im weiteren Verlauf besonders behandelt.

3. Schnittstellenentwicklung (AP 2)

Verantwortlicher Projektpartner: Bosch TT

3.1. Konzeptentwicklung und Definition für generische Datenaustauschschnittstelle

Die Grundlage für die Modell- und Algorithmenentwicklung in AP 5 sind Daten. Diese können über Simulationen, Laborversuche (AP 4) sowie Feldtests (AP 7) in Real-Anlagen auf unterschiedliche Weise erhoben werden. Ziel des Arbeitspaketes ist daher, über spezifische Schnittstellen die Daten aus den unterschiedlichen Quellen und Formaten in definierter Form auf der Zielplattform (Datenanalyse-Infrastruktur, siehe Kapitel 4) zur Verfügung zu stellen. Kriterien an die Datenübermittlung und die dafür eingesetzten Datenaustausch-Schnittstellen sind u. a. Stabilität der Kommunikation, Integrität der Daten, Frequenz der Übermittlung und Datensicherheit.

Besondere Herausforderungen entstehen durch die Heterogenität der Datenquellen sowie der Daten selbst, beispielsweise sollen neben den operativen Anlagendaten (wie Sensor-Zeitreihen) vom Heizungssystem oder zusätzlicher Messwerterfassung, auch eher statische Daten bzgl. der Anlagen-Spezifika und deren Umgebung (Gebäude, Nutzer, Hydraulik, usw.) verfügbar gemacht werden. Ebenso muss sichergestellt werden, dass die Daten dem jeweils zugehörigen System auf der Zielplattform klar zugeordnet werden können (enge Abstimmung mit AP5 bzgl. Daten-Semantik ist erforderlich). Des Weiteren entsteht zusätzliche Komplexität durch die mögliche Varianz der Heizungssysteme im Feld (z. B. enthalten Gas-Thermen andere Sensoren / Datenpunkte als eine Wärmepumpe). Daher zielt das Arbeitspaket auf eine möglichst generische und damit vielseitig einsetzbare Datenaustauschschnittstelle ab.

Gemäß den zuvor genannten Anforderungen wurde folgendes Konzept und Funktionsumfang für die Datenschnittstelle entworfen: Die Bosch TT bietet eine RESTful Web-API zur Steuerung und Überwachung von verbundenen HVAC-Systemen (Heizung, Lüftung und Klimaanlage). Die folgenden Abschnitte enthalten Voraussetzungen und Details zur Nutzung dieser API.

Gateways: Ein Internet-Gateway ist immer erforderlich, um über die Partner-API eine Verbindung zu einem HVAC-System der Bosch Home Comfort Group herzustellen. Das Internet-Gateway muss die neueste Firmware verwenden, um den ordnungsgemäßen Betrieb der Partner-API sicherzustellen.

Registrierung für Bosch HomeCom Pro / Buderus ConnectPro / IVT ConnectPro: Um die Partner-API nutzen zu können, muss das Unternehmen Kunde von Bosch HomeCom Pro, Buderus ConnectPro oder IVT ConnectPro sein.

Onboarding der Partner-API: Um ein neues Partnerunternehmen für die Nutzung der Datenschnittstelle frei zu schalten, muss der Partner die folgenden Informationen bereitstellen:

- IP-Adresse, die zum Zugriff auf die Partner-API verwendet wird
- Bevorzugte Sprachen für Textübersetzungen (z. B. für Fehlermeldungen von Geräten)
- Webhook-Konfiguration (Details hierzu sind auf Seite 18 vermerkt)

Nach einem erfolgreichen Onboarding erhält der Partner den notwendigen API-Schlüssel, um auf die Partner-API zuzugreifen.

REST API: Die Partner-API basiert auf einem RESTful-Ansatz (siehe REST). Sie bietet vorhersehbare und ressourcenorientierte URLs und verwendet HTTP-Antwortcodes, um API-Fehler anzuzeigen. Die API ist so konzipiert, dass sie einfach zu verwenden ist und die Entwicklung von Anwendungen unterstützt, die mit Bosch HVAC-Systemen interagieren können. Ziele der REST-API sind:

- Integration von HVAC-Systemen in eine Drittanbieteranwendung
- Überwachen und Steuern von HVAC-Systemen nach Bedarf aus der Ferne

Die API ist nicht dafür gedacht, kontinuierlich Daten abzufragen. Stattdessen ist sie so konzipiert, dass sie in Kombination mit Webhooks verwendet wird, um Ereignisse über Änderungen zu erhalten, die bei den angeschlossenen HVAC-Systemen aufgetreten sind.

Webhooks: Die Partner-API verwendet Webhooks, um die Partner-Anwendungen über Änderungen zu benachrichtigen, die bei einem verbundenen HVAC-System auftreten. Webhooks werden als Mechanismus verwendet, um Daten proaktiv von einer API zu liefern, ohne dass eine weitere Interaktion erforderlich ist. In diesem Fall sendet die Partner-API relevante Daten asynchron an registrierte Partner-Backends. Ein solch ereignisgesteuerter Ansatz stellt sicher, dass die richtige Benachrichtigung zur richtigen Anwendung zum Zeitpunkt des Auftretens gesendet wird.

Wie werden die Ereignisse verarbeitet? Sobald ein Ereignis im HVAC-System auftritt, beispielsweise ein Fehler, sendet das Gateway diese Informationen an das Bosch-Backend. Das Backend analysiert und kategorisiert das eingehende Ereignis dann gemäß einer Reihe von Regeln. Wenn das Ereignis als relevant erachtet wird, wird es an die Partner-API gesendet, die dann die abonnierten Clients benachrichtigt.

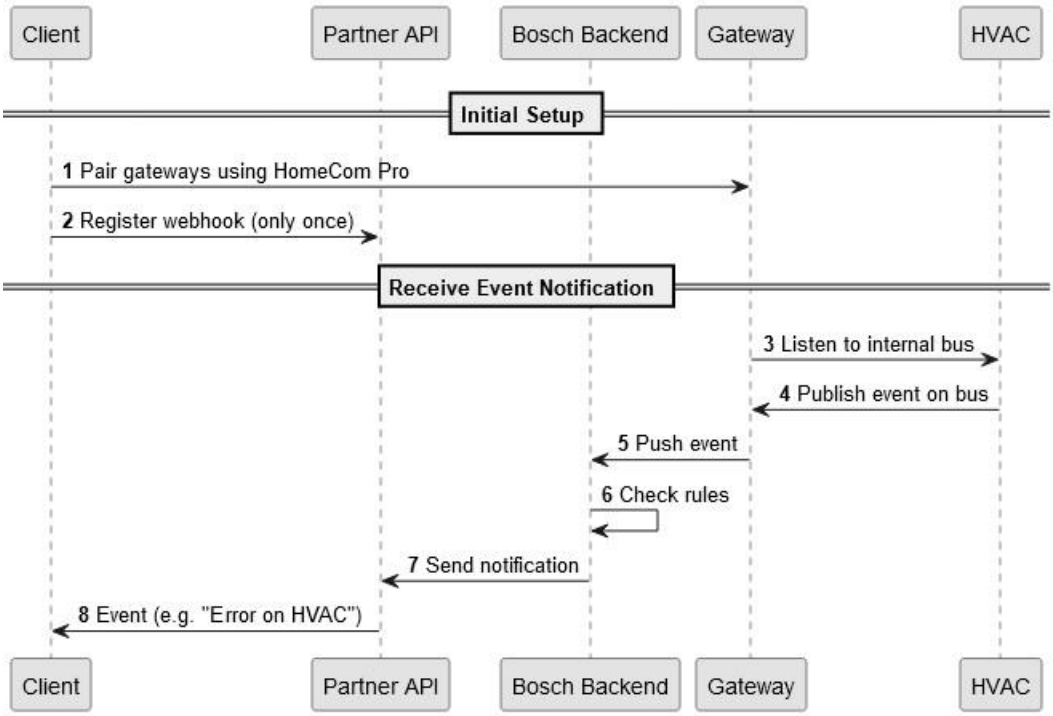


Abbildung 5: Ablauf der Ereignisse im Kontext der Bosch Partner-API

Benutzereinwilligung zum Zugriff auf das Gateway (Privacy/GDPR)**:** Der Zugriff muss vom Gerätebesitzer über das Gateway-Management-Portal an das Partnerunternehmen gewährt werden, bevor ein Gateway-spezifischer Partner-API-Endpunkt (z. B. GET /hvacs/{gatewayId}/components) für dieses Gerät verwendet werden kann. Wenn der Zugriff nicht gewährt wurde, antwortet die API immer mit dem Statuscode 403 (Verboten).

Sicherheit: Die Partner-API verwendet API-Keys zur Authentifizierung von Anfragen. Alle API-Anfragen müssen über HTTPS erfolgen. Aufrufe, die über ungesichertes HTTP erfolgen, schlagen fehl. API-Anfragen ohne Authentifizierung schlagen ebenfalls fehl. Alle Schlüssel beginnen mit dem Präfix xHCSAPI. Das Ablaufdatum ist ebenfalls Teil des Schlüssels (im UTC-Format). Jeder API-Key läuft nach 6 Monaten ab. Partner erhalten einen neuen Schlüssel eine Woche, bevor der aktuelle abläuft. Jede Anfrage an die API muss den API-Key im HTTP-Header x-api-key senden.

`curl` **Fehler! Linkreferenz ungültig.**`> -H "x-api-key: <PROVIDED_API_KEY>"`

IP-Whitelist: Um die Sicherheit der Partner-API zu gewährleisten, muss die IP-Adresse, die zum Zugriff auf die API verwendet wird, während des Onboarding-Prozesses mit Bosch TT geteilt werden. Diese IP-Adresse wird auf die Whitelist gesetzt, um den Zugriff auf die API zu ermöglichen.

Benutzer-ID: Die Endpunkte der Partner-API, die mit Fernsteuerungsaktionen verbunden sind, erfordern, dass eine Benutzer-ID in der Anfrage gesendet wird. Die Benutzer-ID wird verwendet, um die Anfrage für das gegebene Gateway basierend auf den vorhandenen Vertragsdaten zu validieren sowie um zu prüfen, in wessen Namen die Anfrage ausgeführt wird.

3.2. Implementierung der Schnittstelle für Bosch-Systeme

3.2.1. Implementierte Funktionen der Partner-Schnittstelle

Benutzer- und Systemidentifikation: Liefert die Komponenten und zugehörigen Metadaten eines registrierten HVAC-Systems sowie vertragliche Benutzerinformationen. Diese Informationen können beispielsweise für die initiale Integration eines bestehenden HVAC-Systems verwendet werden.

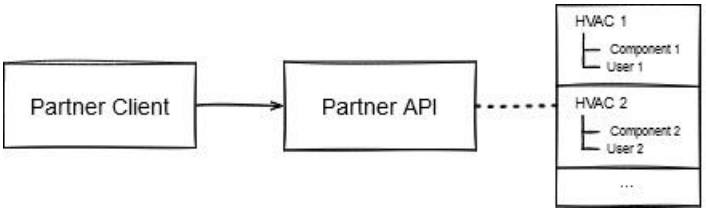


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Benutzer- und Systemidentifikation

Fernüberwachung (Remote Monitoring): Dient zur Überwachung des Status eines HVAC-Systems aus der Ferne. Es gibt zwei verschiedene Mechanismen dafür. Entweder, fordern Sie Daten auf Anfrage über den Status eines registrierten HVAC-Systems an, beispielsweise den aktuellen Gerätestatus. (Abbildung 7) Oder Sie erhalten asynchrone Ereignisbenachrichtigungen, die an einen dafür registrierten Webhook gesendet werden. Solche Ereignisse können beispielsweise aufgetretene Fehler, Informationen über ein System, das online/offline geht, oder Datenpunkte wie den aktuellen Energieverbrauch sein. Die Liste der gesendeten Ereignisse ist vorgefiltert, um sicherzustellen, dass nur relevante Informationen bereitgestellt werden. (Abbildung 8)

Abbildung 7: Schematische Darstellung der Anforderung von Daten

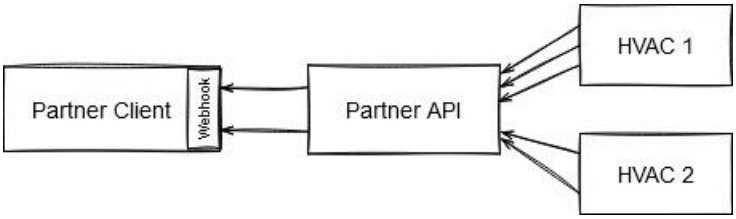


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Ereignisbenachrichtigungen via Webhook

Fernsteuerung (Remote Control): Dient der Änderung von Einstellungen aus der Ferne sowie dem Auslösen von Funktionen des HVAC-Systems. Dies kann beispielsweise das Aktivieren/Deaktivieren des Ladevorgangs für zusätzliches Warmwasser oder die Konfiguration von Zeitprogrammen umfassen. (Abbildung 9)

Abbildung 9: Schematische Darstellung des ferngesteuerten Auslösens von Funktionen des HVAC-Systems

Zeitprogramme: Die API ermöglicht die Konfiguration von Zeitprogrammen für die Heiz- und Warmwasserzirkulation eines HVAC-Systems. Alle Wärmepumpen haben ein Standard-Zeitprogramm für Heizung und Warmwasser. Dieses Standard-Zeitprogramm kann vom Benutzer überschrieben werden.

Fernwartung (Remote Maintenance): Die Funktion Fernwartung ermöglicht es Partnern, erweiterte Konfigurationen und Anpassungen an ihrem HVAC-System aus der Ferne vorzunehmen. Dazu gehören Funktionen wie die Konfiguration des Geräuschmodus oder die Anpassung des Heizkurvenoffsets zur Optimierung der Heizleistung.
Es ist wichtig zu beachten, dass Änderungen an diesen Konfigurationen nur von Fachleuten vorgenommen werden sollten (spezifische Parameter sollten nicht für Endbenutzer zugänglich sein), da dies den Komfort der Endbenutzer beeinträchtigen könnte, indem die Energieeffizienz verringert oder die Belastung des Systems erhöht wird, was zu Fehlfunktionen führen kann.

Programmierung und Releases: Die oben genannten Funktionen wurden über den zeitlichen Verlauf des Projektes SHANGO implementiert und über Release Notes dokumentiert. Nachfolgend exemplarische Auszüge aus den Release Notes (in Englisch):

2023-09-01

- Added `GET /hvacs` endpoint to retrieve all HVACs a partner has access to.
- Added `GET /health` endpoint to fetch the operating status of the Partner API.
- Added webhooks to deliver events asynchronously.
- Added error event as type.
- Added unique `requestId` to track specific requests in support cases.
- Added initial documentation to Developer Portal.

2024-01-04

- Webhook event names renamed respectively from `ErrorEvent` to `ApplianceStatusEvent` and `ConnectivityEvent` to `ConnectivityStatusEvent`
- Updated the `ApplianceStatusEvent`
  - `timestamp` field has been renamed to `createdAt`.
  - `category` field has been removed, since it is not providing useful information.
  - `severity` field has been removed. Use `applianceStatus` instead.
- Updated the documentation about webhooks, giving additional detail to the rules behind the Bosch filtering and classification process of appliance status events.

2025-01-09 - v1.5

- Added new datapoints for CU-HP control unit to the webhook notifications:
  - `hvac.emon.energyConsumptionTotal.lowRes`
  - `hvac.emon.compressor.energyConsumptionTotal.centralHeating.lowRes`

- `hvac.emon.compressor.energyConsumptionTotal.domesticHotWater.lowRes`
- `hvac.emon.compressor.energyConsumptionTotal.cooling.lowRes`
- `hvac.emon.eheater.energyConsumptionTotal.centralHeating.lowRes`
- `hvac.emon.eheater.energyConsumptionTotal.domesticHotWater.lowRes`

- Added new data-point for xCU-HP control unit to the webhook notifications:
  - `hvac.emon.energySupplyTotal`
- Adapt data-points control unit type documentation:
  - `hvac.emon.energySupplyTotal.lowRes`
  - `hvac.emon.compressor.operationStatus`
  - `hvac.emon.eheater.operationStatus`

Weitere Details können über die Bosch TT Partner API Dokumentation abgerufen werden, siehe https://developer.apps-tt.com/getting-started/introduction/. Bitte beachten: Die Seite befindet sich in einem geschützten Bereich und setzt eine spezifische Freischaltung durch Bosch TT voraus.

3.2.2. Verwendung der Bosch API im GreenPocket Portal

Bosch Partner-API: Die Kommunikation der Energiemanagementsoftware mit externen Systemen, wie der Bosch Partner-API, wird in der GreenPocket-Software durch die sog. Base API Middleware (BAM) durchgeführt. Für jeden Kunden wird ein eigenes GreenPocket-Softwaresystem, in diesem Fall das SHANGO-System, aufgesetzt. Jedes System bekommt eine eigene BAM Instanz, die nicht mit anderen Systemen geteilt wird. Die Bosch-Partner-API ist eine REST-API, die das GreenPocket System über Webhooks einbindet. BAM greift auf die API zu, bereitet die Daten auf, um sie dann an den Importmechanismus zur übergeben. Die importierten Daten werden an den Measurement Microservice übergeben, der die Daten letztlich als Messreihen in eine für die Speicherung von Messeihen optimierten Datenbank ablegt.

Authentifizierungs- und Autorisierungslogik: Im Kontext der Bosch Partner API kommt ein Token-basiertes Authentifizierungs- und Autorisierungsverfahren zum Einsatz. Dies ist eine gängige Methode zur Authentifizierung und Autorisierung in modernen Anwendungen, insbesondere in Web- und Cloud-Umgebungen. Bei Token-basierter Authentifizierung wird anstelle von klassischen Sitzungen oder Passwörtern ein kryptografisch signiertes Token verwendet, das als digitaler Schlüssel dient. Im Fall der Bosch Partner-API wird OpenID Connect als Protokoll genutzt. Dieses Verfahren wurde gewählt, da es besonders effektiv für verteilte Systeme, APIs und Microservices ist und eine hohe Skalierbarkeit und Sicherheit bietet.

Ausprägung der Schnittstelle: Die genutzten Schnittstellen und Parameter der Bosch-Partner-API werden im Folgenden beschrieben.

- APPLIANCE_STATUS_EVENTS: Import von Fehlermeldungen. Hierfür wurde der neue Messreihentyp ERRORs eingeführt. Der Messreihentyp speichert das Datum und die Uhrzeit der Meldung, sowie den Display- und den Fehlercode. Die nachfolgende Abbildung 10 zeigt die Darstellung von Fehlermeldungen in der Benutzeroberfläche der GreenPocket-Software.

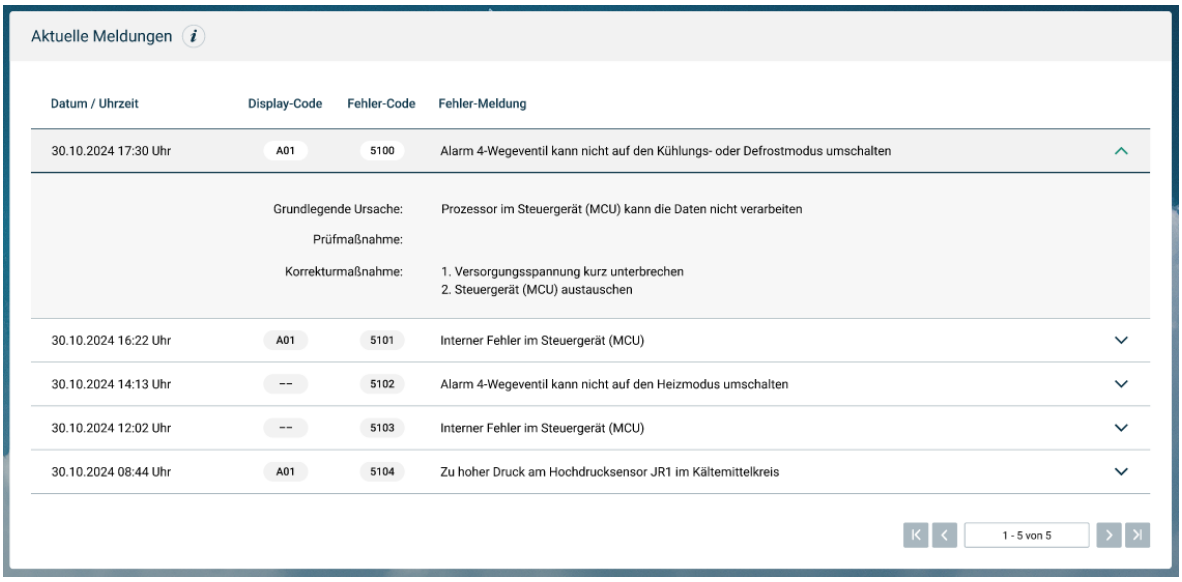


Abbildung 10: Darstellung von Fehlermeldungen in der Benutzeroberfläche der GreenPocket-Software

Neue Meldungen werden fett dargestellt, sodass ersichtlich wird, dass sie neu sind und noch nicht gelesen wurden. Sobald die Nachricht gelesen wurde, wird die Meldung im normalen Schriftschnitt dargestellt. Zu jeder Meldung können weitere Details wie die Ursache, die erforderliche Prüfmaßnahme sowie die möglichen Korrekturmaßnahmen aufgeführt werden, sofern diese Informationen vorhanden sind.

- CONSUMPTION: Übergeben die Verbräuche in kWh für einen definierten Zeitraum. Auch diese Daten werden als Messreihe im Measurement Mircoservice der GreenPocket-Software behandelt und persistiert. Über die Benutzeroberfläche können beliebige Zeiträume gewählt werden, so dass in die Daten „reingezoomt“ werden kann. Die Daten lassen sich sowohl als Liniendiagramm als Balkendiagramm darstellen. Das Speichern der Verbrauchsdaten als Bild in verschiedenen Dateiformaten ist dabei ebenso möglich wie der Export der Daten als Excel-Datei. Letzteres kann zur Weiterverarbeitung außerhalb der Plattform genutzt werden.

Perspektivisch ist die Erweiterung um viele weitere Parameter denkbar, die zusätzlich zum gesamten Energieverbrauch für Anwender in der Benutzeroberfläche dargestellt werden könnten. Einige Beispiele hierzu sind im Folgenden aufgeführt:

- Zusätzlich erzeugte Energie: Berechnung des Coefficient of Performance (COP) /Leistungszahl aus verbrauchter und erzeugter Energie
- Leistung des Kompressors
- Warmwasser- oder Raum-Soll-Temperatur
- Warmwasser-Verbrauch zusätzlich zum Gesamtverbrauch

Im Fraunhofer IIS Labor wurde eine interne Datenaufzeichnungsstrategie umgesetzt, bei der Sensordaten des HiL-Systems mit einer Auflösung von einer Sekunde kontinuierlich aufgezeichnet wurden. Die Sensoren kommunizierten dabei über ein Modbus TCP Gateway per Ethernet Protocol mit einem Labor-PC. Dieser empfing die Daten über eine intern zugängliche API, welche die Messwerte zentral speicherte.

Die resultierenden feather-Dateien enthielten Zeitstempel und separate Spalten für jeden Sensor. Für die weitere Analyse wurde dieser Datensatz mit einem extern aufgezeichneten Datensatz von Bosch zusammengeführt. Bosch hatte seine Daten über die HomeComfort Pro API erhoben – außerhalb des Labors und unabhängig von der lokalen Infrastruktur.

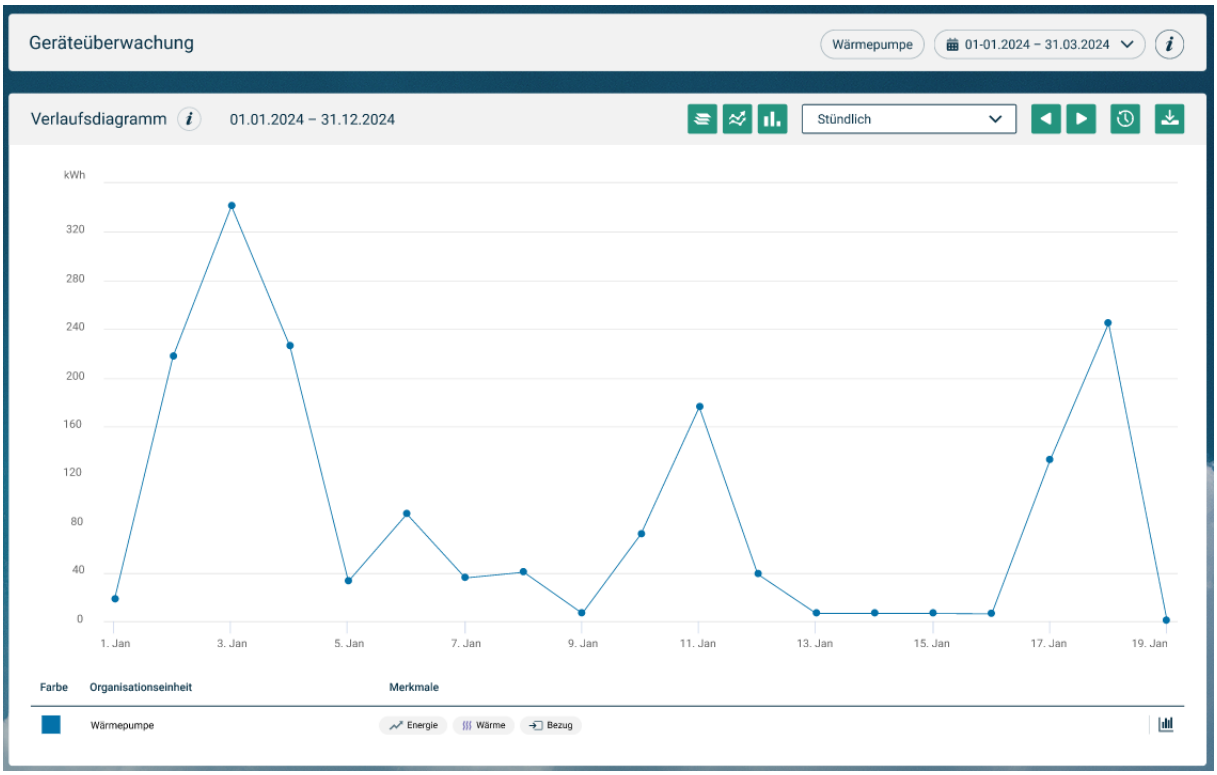


Abbildung 11: Verbräuche in kWh für einen definierten Zeitraum

4. IT-Infrastruktur (AP 3)

Verantwortlicher Projektpartner: GreenPocket

Während des Forschungsprojektes wurde die Energiemanagementsoftware für Unternehmenskunden in verschiedenen Bereichen umgebaut, um individuelle Anwendungsfälle wie ein Dashboard für Wärmepumpen mit individuellen KPIs abbilden zu können. Wie bei vielen älteren Softwarelösungen basierte die Software ursprünglich auf einer dreischichtigen, monolithischen Architektur. Diese wird seit geraumer Zeit umgebaut und durch eine Microservice-Architektur ersetzt. Dabei werden bestehende Microservices, iterativ um neue Microservices mit einem entsprechenden fachlichen Schwerpunkt erweitert. Die Migration wurde grundlegend in vier Schritten durchgeführt, die jeweils individuelle Mehrwerte für das Projekt ermöglicht haben. Die Schritte sind: die Flexibilisierung der Messdaten (1), die Flexibilisierung der Stammdaten (2), die Synchronisation beider Datenmodelle (3) sowie die Etablierung eines Energiemanagement Microservice, der die Komplexität für den Nutzenden abstrahiert (4). Nachfolgend werden die Schritte im Detail erläutert, dabei wird ebenfalls Bezug auf die Restriktionen der bisherigen monolithischen Systemarchitektur genommen und somit begründet, warum diese Aufwände notwendig gewesen sind, um das Zielbild des Forschungsprojektes erfüllen zu können.

4.1. Flexibilisierung der Messdaten

Das bestehende Messdatenmodell, das auf dem Datenmodell des Monolithen basiert, bringt eine Limitation der Energiesparten mit sich. Während der Implementierung der Energiemanagementsoftware für den Energiemarkt wurde die Anzahl der geforderten Energiesparten auf die folgenden beschränkt: Strom, Gas, Wasser, Wärme, Kälte und Öl. Alle sind als Haupt- und Untermesspunkte messbar. Alle Messreihen dieser Energiesparten hatten

zusätzlich die Limitation, dass sie systemweit auf eine fixe zeitliche Auflösung begrenzt waren, wodurch Messungen aus unterschiedlichen Quellen, wie zum Beispiel Untermesstechnik, sowie Informationen wie Fehlermeldungen nicht unabhängig voreinander im Portal abgebildet werden konnten.

- Das neue Datenmodell im Measurement Mircoservice legt diese Limitation ab und ermöglicht, dass jede Messreihe durch individuelle Eigenschaften, wie beispielsweise zeitliche Auflösung, Messgrößen (zum Beispiel Energie, Volumen, Druck, etc.), Einheiten (kWh, m3, etc.) usw. in der Datenbank ergänzt werden kann. Dies ermöglicht, dass im Portal beispielsweise stündlich gemessene Gasmessreihen vom Energieversorger importiert werden können, während durch Untermesstechnik sekündlich oder minütlich gemessene Daten über das Volumen eines Gasmesspunkts importiert werden können. Ein für den Nutzer greifbarer Vorteil aus dem beschriebenen Vorgehen ist die flexible Analyse (siehe unten). Sie ermöglicht, dass man die Messreihen jedes Messreihentyps zeitgleich in einem Verlaufsdiagramms dargestellt sehen kann, um Einflüsse und Abhängigkeiten gemeinsam darzustellen. Mithin ergibt sich ein Mehrwert, für die GreenPocket Energiemanagement-Software als auch für das Forschungsprojekt ist, dass keine Limitierung hinsichtlich der abzubildenden Daten besteht und jede mögliche Messung beispielsweise auch die einer Wärmepumpe im Portal abgebildet werden kann.
- Um dieses neue Datenmodell im Betrieb nutzen zu können, musste die Konsistenz zwischen den Monolith-Messdaten und den flexiblen Messdaten ermöglicht werden. Darüber hinaus musste die Erweiterbarkeit der Messdaten im Measurement Microservice gewährleistet sein, sowie eine Nutzung des Datenmodells in neuen Analysefunktionen ermöglicht werden. Damit alle bereits im Portal vorhandenen Messdaten, in den auf dem neuen Datenmodell aufbauenden Funktionen nutzbar sind, mussten alle Messdaten in das neue, flexible Datenmodell synchronisiert werden. Diese automatisierte Synchronisation beinhaltet zum einen das Mapping des bestehenden Datenmodells auf das neue, zum anderen das Durchführen von automatisierten Tests, die eine Synchronität verifizieren. Um neben den bereits im Portal vorhandenen Messdaten ebenfalls neuartige Messdaten importieren und nutzen zu können, wurde eine REST-API entwickelt, die Messdaten jeden Typs entgegennehmen kann. Der erste Nutzen des neuen Datenmodells wurde durch die Features flexible Analyse, Tagesprofilvergleich, Einsparungen sowie dem Sankey-Diagramm realisiert. In allen dieses Feature werden Messreihen flexible und unabhängig von ihrem Messreihentyp oder der Sparte dargestellt und für den Nutzer zugänglich gemacht.

4.2. Stammdaten-Flexibilisierung

Neben den Beschränkungen im monolithischen Messdatenmodell haben Limitierungen des Stammdatenmodells ebenfalls dazu geführt, dass der im SHANGO-Forschungsprojekt definierte Anwendungsfall nicht wie gewünscht dargestellt werden konnte. In der ursprünglichen Implementierung der Hierarchie der darstellbaren Ebenen, also der digitalen Abbildung der realweltlichen Strukturen eines Unternehmens, war die Software auf maximal zwei Ebenen von Messpunkten pro Standort begrenzt. An die Ebenen selbst konnten keine weiteren Objekte, wie zum Beispiel Anlagen oder Wärmepumpen, mit ihren individuellen Eigenschaften verknüpft werden. Diese Einschränkung basierte auf den Anforderungen der damaligen Zielgruppe der Energieversorgungsunternehmen. Standorte konnten mit Eigenschaften erweitert werden, die zum Beispiel eine Gruppierung oder Normierung der Messdaten ermöglicht – dies galt jedoch nicht für die Messpunkte. Die mangelnde Flexibilität in den Messreihen führt dazu, dass der hier behandelte Anwendungsfall zur Abbildung einer Wärmepumpe innerhalb eines Gebäudes, mit variierenden bzw. individuellen Eigenschaften, nicht korrekt abgebildet werden konnte.

- Das neue Stammdaten-Modell (Organizations) hebt die geschilderten und weitere Limitierungen auf, sodass in einem neuen Microservice und einer Graphen-Datenbank beliebige Objekte hierarchisch angeordnet werden können, um jede physische Realität bzw. jedes Messkonzept abbilden zu können. Während das Datenmodell jegliche Anordnung von Objekten erlaubt, wurde im Frontend eine künstliche Limitierung geschaffen. Die Limitierung ist, dass Messobjekte nur unterhalb von Standorten angelegt werden können und somit den Standort mit Anlagen und Untermesstechnik erweitern. Diese Einschränkung wurde eingeführt, um eine Konsistenz zwischen der monolithischen und Microservice-Architektur zu gewährleisten. Jedes Messobjekt hat eine Kategorie, zum Beispiel Gebäude, Wärmepumpe, oder PV-Anlage, die mit einem individualisierbaren Set an Eigenschaften verbunden werden kann. Diese Verbindung ermöglicht zum einen vollkommende Flexibilität, sodass jede Kategorie hinzugefügt und mit beliebigen Eigenschaften verbunden werden kann, zum anderen ermöglicht es eine einheitliche Datenhaltung über diverse Systeme hinweg. Dies bietet perspektivisch einen breiten Datenschatzes an, der zur Analyse genutzt werden kann. Durch die Verbindung von Messpunkten zu den jeweiligen Messobjekten wurde ebenfalls die Limitierung hinsichtlich der Hierarchietiefe von Messpunkten aufgehoben.
- Um diese Mehrwerte zugänglich für den Anwender zu machen, wurde, nach der Entwicklung des Datenmodells und der Synchronisation der monolithischen Daten mit dem neuen Microservice, mit dem digitalen Zwilling, ein Interface geschaffen, das seine Hierarchie unterhalb des Standorts frei erweitern kann. Im Kontext des Forschungsprojekts SHANGO kann somit ein Standort definiert werden, der unteranderem ein Messobjekt der Kategorie Wärmepumpe enthält, das zusätzlich über spezifische Wärmepumpen-Eigenschaften verfügt.
- Neben der geschilderten Abbildung des digitalen Zwillings, wird ebenfalls das Nutzer-Konstrukt sowie das verbindende Konstrukt der Sicht- und Nutzungsrechte innerhalb dieses Microservice abgebildet.

4.3. Etablierung eines Energiemanagement Microservice

Damit die Mehrwerte beider Microservices miteinander in Verbindung gesetzt werden können, wurde eine Synchronisation beider Microservices implementiert, damit der Nutzer aus der Verbindung von individuellen Messobjekten und deren flexiblen Messdaten profitieren kann. Diese Entwicklung hatte zwei Schwerpunkte – einerseits sollte ermöglicht werden, dass der Nutzer die Möglichkeit hat über die physischen Messobjekte auf die Messdaten zugreifen und filtern zu können – andererseits mussten die Sichtrechte auf die Messdaten über die im Stammdatenmodell implementierten Sichtrechte gewährleistet werden.

4.4. Abstrahierung für den Nutzenden

Um die geschilderten Mehrwerte für den Anwender nutzbar zu machen, wurde ein weiterer Microservice entwickelt, welcher die Daten der verschiedenen Datenmodelle zusammenbringt und dessen Komplexität abstrahiert. Hierbei wurde in einem ersten Schritt eine neue Template-Funktionalität entwickelt, welche alle relevanten Daten eines spezifischen Anwendungsfalls und Datenauswahl in einer definierten Menge an Widgets in einem Dashboard zusammenbringt und visualisiert. Dabei wurde das Template „Unternehmensinterne Vergleich implementiert, welches die Flexibilität der verschiedenen Datenmodelle wiedergibt.

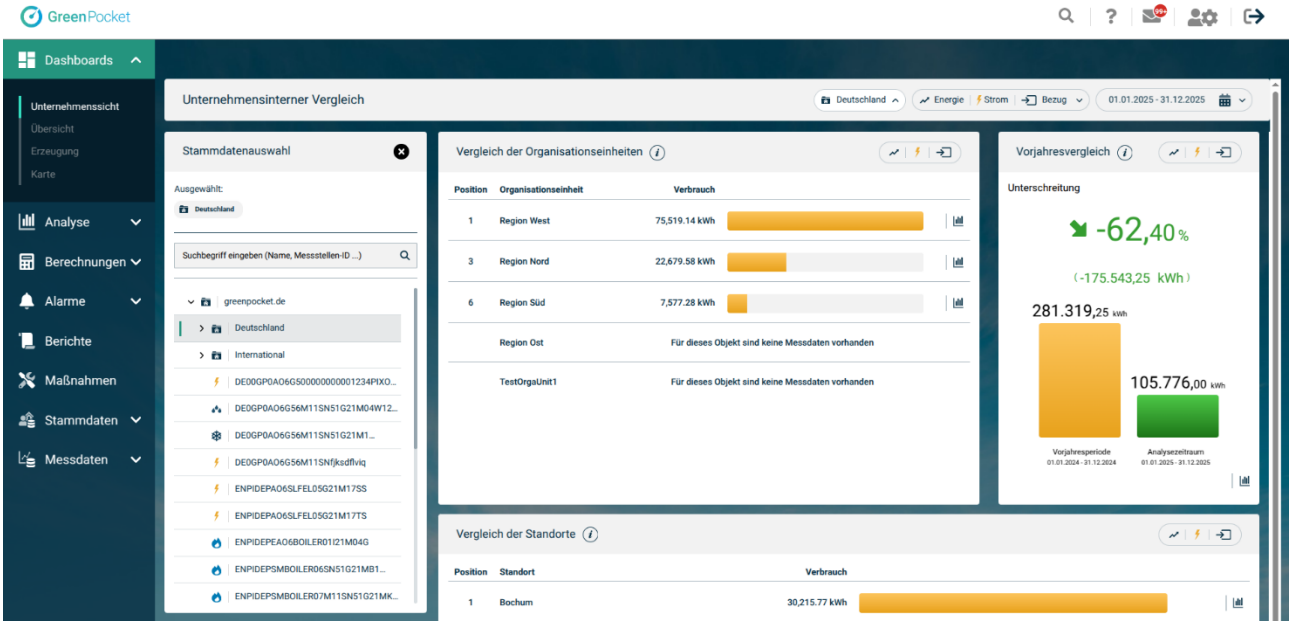


Abbildung 12: Dashboard zur Darstellung des unternehmensinternen Vergleichs in GreenPocket-Software

- Um das Stammdatenmodell abzubilden, wurde eine neue Stammdatenauswahl in Form eines Hierarchiebaums implementiert, die den gesamten digitalen Zwilling übersichtlich dargestellt. Dieser wurde durch eine Suchfunktion erweitert, mit der der User nach beliebigen Eigenschaften seiner Standorte, Objekte und Messpunkte suchen kann.
- Die Flexibilität der Messdaten wird unter anderem durch die variablen Messdatenfilter als auch über die Steuerelemente (Widgets) abgebildet. Hierbei kann der User aus einem Set an verschiedenen Messdaten-Filtern, wie der Messgröße, Sparte, Richtung sowie erweiterte Merkmale, wie Witterungsbereinigung wählen. Die im Template definierten Widgets mit Messdaten füllen sich entsprechend der Auswahl mit Daten.
- Diese sind im Rahmen des „Unternehmensinternen Vergleichs“ eine Aneinanderreihung verschiedener Vergleichs-Widgets (Vorjahresvergleich, Vergleich der Organisationseinheiten, Vergleich der Standorte, Vergleich der Hauptmesspunkte sowie Vergleich der Untermesspunkte), die abhängig sowohl vom Mess- als auch vom Stammdatenfilter sind. Hierdurch wird dem Anwender ermöglicht mit nur wenigen Klicks eine strukturierte Übersicht über seine Messdaten zu erhalten. Sofern der Nutzer (Mehr-)Verbräuche einzelner Messpunkte identifiziert und kontrollieren will, kann er diese schnell in einer Detailansicht mit Verlaufsdiagramm, Statistik-Widget sowie Zählerstands-Widget anzeigen lassen. Neben den verschiedenen Visualisierungen bietet das Dashboard ebenfalls an fast jedem Widget Weiterleitungsmöglichkeiten in die flexible Analyse oder den Messdatenexport, was die tiefergehende Analyse der Messdaten erheblich vereinfacht.
- Während die Implementierung dieses Dashboard-Templates eine erhebliche Verbesserung der Usability und Übersicht über die Energiedaten bedeutet, geht mit diesem Feature ein Meilenstein für die Energiemanagementsoftware von GreenPocket einher, da hier der „Durchstich“ bei der Verbindung der beiden Datenmodelle geschaffen worden ist. Mithilfe der Template-Funktionalität kann somit mit überschaubarem Aufwand ein Dashboard für jeden beliebigen Anwendungsfall entwickelt werden, da die Dashboards auf eine flexible Datengrundlage von Stamm- und Messdaten basieren.
- Ein Beispiel dafür ist die Implementierung des Geräteüberwachungs-Dashboards für das SHANGO-Forschungsprojekt (siehe Abbildung 12). Hierbei wurden nach der Anforderungsanalyse im Rahmen der Stakeholder des Forschungsprojekts eine mögliche

Zusammenstellung von Widgets abgeleitet und implementiert. Nach der Auswahl einer Wärmepumpe werden einerseits dessen Messdaten beliebigen Typs in einem Verlaufsdiagramm dargestellt, während andererseits die über die BOSCH-API importierten Fehlermeldung in einer tabellarischen Ansicht dargestellt werden. Hierbei hat der User die Möglichkeit tiefergehende Detailinformationen zum der jeweiligen Status- und Fehlermeldung zu erhalten.

5. Laboruntersuchungen Fehlerinjektion (AP4)

Verantwortlicher Projektpartner: Fraunhofer IIS

5.1. Einbindung Bosch TT Simulationslabor / Simulationsdaten

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden Strategien für den simulationsgestützten Betrieb des HiL-Labors festgelegt. Ziel war, ein möglichst realitätsnahes Anlagenverhalten am Prüfstand zu erzielen. Dazu wurden unter anderem Simulationsprofile für folgende Szenarien erstellt:

- Außentemperaturabhängige Heizlast: Für die Simulation des Gebäudes wurde eine Heizlastkurve von 20 kW bei -13,3 °C und 0 kW bei 21 °C verwendet.
- Mittels des Web-Tools TABULA und den darin repräsentativ für die deutsche Gebäudetypologie dargestellten Gebäuden, werden die häufigsten vorkommenden Einfamilienhäuser als Referenz ausgewählt (siehe Abbildung 13). Über das vereinfachte Verfahren für die Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 wird eine Norm-Heizlast bestimmt und linear über die Norm-Außentemperatur und die Heizgrenztemperatur aufgetragen. Weitere Vergleichswerte für Lastprofile von Wohngebäuden können in VDI 4655 nachgeschlagen werden.

er Gebäude- und lung 2011 11	Baualtersklassen										Summe
	bis 1860	1861 - 1918	1919 - 1948	1949 - 1957	1958 - 1968	1969 - 1978	1979 - 1983	1984 - 1994	1995 - 2001	2002 - 2009	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
EFH	EFH_A	EFH_B	EFH_C	EFH_D	EFH_E	EFH_F	EFH_G	EFH_H	EFH_I	EFH_J	
Anzahl Wohngebäude in Tsd.	330	966	1.131	859	1.509	1.507	704	1.160	1.035	775	**9.976**
Anzahl Wohnungen in Tsd.	399	1.213	1.389	1.060	1.948	1.915	881	1.397	1.204	858	**12.263**
Wohnfläche in Mio. m²	46	135	150	116	218	233	110	178	158	119	**1.463**

Abbildung 13: Häufigkeit im deutschen Wohngebäudebestand (Bildquelle: TABULA)

- *Warmwasser Lastprofile:* Für das Zapfmodul werden elektronisch ansteuerbare Magnetventile verwendet und ein Warmwasserprofil nach DIN EN 16147 hinterlegt. Das Warmwasser Lastprofil für ein Einfamilienhaus (EFH) hat sowohl Badewanne- als auch Waschbeckennutzungsprofile hinterlegt. Unter AP4.4 werden weitere Details zur Versuchsdurchführung erklärt.

- *Wetterprofile:* Für die Fehlerbilder wurden hauptsächlich zwei verschiedene Außentemperaturverläufe ("typical days") benutzt: ein Vier-Tages-Profil, und ein Ein-Tages-Profil. Die Daten beider Profile wurden von der Wetterstation Dresden bereitgestellt und sind repräsentativ für das Wetter in Dresden. Das Vier-Tages-Profil entsteht aus vier typical days wobei eine Wetterdatei aus einem typischen Winter-, zwei typischen Herbst- und einem typischen Sommertag zusammengestellt wurden. Das Ein-Tages-Profil entsteht bloß aus einem Wintertag. Inklusive Übergangs-Zeiträume von einem typical day auf den nächsten, sorgten die Wetterprofile für Fehlerbilder-Versuche, die 24 Stunden und 10 Minuten (in Echtzeit) lang waren.

Die erstellten Profile liegen als Programmiercode vor und wurden im Rahmen der Fehlerinjektion unter anderem genutzt, um den Einfluss der genannten Randbedingungen auf die Fehleranalyse zu simulieren

5.2. Aufbau Labormessstand

Der aktuelle Testaufbau besteht aus den folgenden Komponenten und Modulen: Dem HIL-System, dem hybriden Heizsystem (HHS) - bestehend aus einer Luft-Wasser-Wärmepumpe (AWHP) und einem konventionellen Gaskessel - einer Klimakammer und vier Wasserspeichern. Die letzteren werden verwendet, um ein Gebäude zu simulieren, das von dem Heizungssystem beheizt wird, indem sowohl die Standard-Speicherung von erwärmtem Wasser als auch die Wärmeentnahme durch das Gebäude durch die richtige Mischung eines Kaltwassertanks und eines Warmwassertanks nachgebildet wird, um eine realistische Rücklauftemperatur zu erzeugen. Zwei unabhängige Datenerfassungssysteme (DAQ) sind in der Anlage installiert, von denen eines direkt von den Laboringenieuren bedient wird und das andere der Ferndiagnose dient. Insgesamt sind über 550 Sensoren im Prüfstand installiert, darunter Sensoren für Massenstrom, Temperatur, Druck, Gaslecks und thermische Energiemessung.

Wie Abbildung 15 zeigt, arbeitet das simulierte Haus des Laboraufbaus derzeit mit zwei Mischkreisen. Der erste Kreislauf soll einen regulären Heizkörper-Heizkreislauf simulieren, während der zweite Kreislauf ein Fußbodenheizungssystem imitiert. Warmes Wasser wird aus zwei der Wasserspeicher entnommen und mit dem einströmenden Kreislaufwasser gemischt - das Wasser, das gerade „seinen Zweck der Wärmeabgabe an das Haus erfüllt hat“ und daher abgekühlt ist -, um wieder Warmwasser mit zwei Temperaturniveaus zu erzeugen, die für die Raumheizung geeignet sind. Zusätzlich wird eine Bedarfsprofildatei verwendet, um die Nutzung von Warmwasser zu simulieren (DHW). Dieses Profil wird durch eine Datei beschrieben, in der ein typischer Tagesverbrauch an Warmwasser über einen Zeitraum von 24 Stunden beschrieben wird. Die Klimakammer (teilweise zu sehen in Abbildung 14 ist mit einer 30-kW-Wärmepumpe ausgestattet, welche die Kühlung und Erwärmung der Umgebungsluft des Prüflings (die Außeneinheit der Wärmepumpe) übernimmt. Eine Feuchteregelung reguliert die Luftfeuchtigkeit der Kammer mit Hilfe von Wassersprühdüsen. Im Inneren der Kammer befindet sich die Wärmepumpen-Außeneinheit. Das Klima in der Kammer wird über einen Leitrechner gesteuert. Wir erstellen eine Wetterdatei aus einem typischen Winter-, zwei typischen Herbst- und einem typischen Sommertag, die zu einem Vier-Tage-Zyklus zusammengefügt werden. Die Wetterdaten wurden dabei von der Dresdner Wetterstation aufgezeichnet. Das Labor-Messsystem besteht aus einer Vielzahl von IO-Modulen unter Verwendung von Ethernet-basierten Protokollen, die von der Firma ICPDAS bereitgestellt werden. Die Daten werden einmal pro Sekunde an den zentralen Leitrechner übertragen. Die Daten werden zur Analyse gespeichert und über eine Web-API ebenfalls zur Verfügung gestellt. Die API kann nach den Echtzeitwerten bestimmter Sensoren abgefragt werden und bildet die Grundlage für das webbasierte Visualisierungs-Dashboard, das mit der Software FUXA-a „Web-based Process Visualization (SCADA/HMI/ Dashboard)“ erstellt wurde.

Nachfolgend wird exemplarisch der Versuchsaufbau mit eingebrachtem Hybrid-System dargestellt: Die gewählte Hybridheizung wird nach hydraulischer Verschaltung, wie in Abbildung 14 dargestellt, installiert. Die Installation ist den Planungsunterlagen von Buderus entnommen und stellt einen häufig vorkommenden Aufbau dieses Anlagentyps dar. Außerdem ist bereits eine umfangreiche Expertise aus Bosch-internen Feldtests vorhanden und es stehen weitere Datensätze zur Verfügung. Zusätzlich werden Sensoren für die Temperaturmessung von Vor- und Rücklauf sowie für die Volumenstrommessung eingebracht. Somit können exakte energetische Kenngrößen über sog. Wärmemengenzähler ermittelt werden.

Abbildung 14: Hydraulischer Aufbau der Hybridheizungsanlage mit eingezeichneten Positionen des Messequipments der Wärmemengenzähler (Bildquelle: Buderus Hydraulikdatenbank)

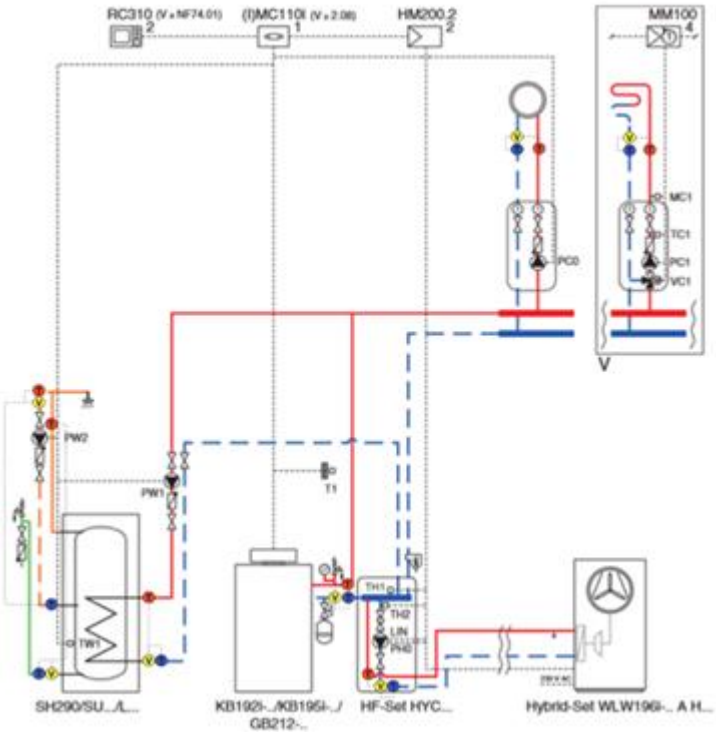


Abbildung 15: Hydraulischer Aufbau der Hybridheizungsanlage mit eingezeichneten Positionen des Messequipments der Wärmemengenzähler (Bildquelle: Buderus Hydraulikdatenbank)

5.3. Konfiguration und Parametrierung

Nach einer strengen Kalibrierungs- und Validierungsphase der Laborgeräte und des Heizungssystems wurden die von den beiden Messdatenerfassungssystemen (DAQ) gewonnenen Daten mit verschiedenen Methoden (in erster Linie Zeitreihenanalyse) analysiert, die es uns ermöglichten, das Regelungssystem auf Stabilität, ein zufriedenstellendes Komfortniveau der simulierten Innentemperaturen und die Minimierung unerwünschter Schwingungen der wichtigsten Betriebsparameter zu parametrieren. Es wurden absichtlich Fehler in das System eingebaut, um die nachfolgende Systemdynamik im Gegensatz zum fehlerfreien Betrieb zu beobachten.

Backup:

Das HHS arbeitet im bivalenten Parallelheizbetrieb; unter einem bestimmten Schwellenwert T_biv der Umgebungstemperatur T_amb wird nur der Gaskessel für Heizzwecke genutzt. Oberhalb einer bestimmten Umgebungstemperatur, T_cut, wird nur die WP zum Heizen genutzt. Wenn 〖T_biv<T_amb<T〗_cut, werden beide Wärmeerzeuger genutzt.

5.4. Experimentelle Fehlerinjektion

Für den Versuchsaufbau zur Fehlerinjektion wurde ein klassischer Wet-Test Prüfstand, ähnlich zu denen im Labor der Bosch Thermotechnik GmbH in Lollar, gewählt. Dieser besteht vereinfacht aus der Hybridheizungsanlage mit Wärmepumpe, Kessel und Warmwasserspeicher, der Klimakammer mit regelbaren Temperatur- und Luftfeuchtewerten, der Wärmesenke für das Gebäude sowie der Wärmesenke für das Trinkwarmwasser. Zusätzlich wurden Wärmemengenzähler und PowerMeter installiert, welche genaue Messwerte für Volumenströme sowie Temperaturen in Vor- und Rücklauf liefern und somit eine exakte Bilanzierung hinsichtlich energetischer Kenngrößen ermöglichen, siehe Kapitel 5.2.

Auf der Lastseite wurde ein typisches Gebäude aus dem deutschen Bestand und ein Norm-Zapfprofil ausgewählt. Die Klimawerte stammen von Messwerten des DWD in Dresden und stehen repräsentativ für drei typische Tage (Winter, Übergang und Sommer), siehe Kapitel 5.1

Das normale Betriebsverhalten der Anlage wurde zu Beginn der Versuchsdurchführungen mittels des Bosch Ferndiagnosetools RST und der Webanwendung HomeCom sichergestellt. Hierfür wurden die Erfahrungswerte von Prüfstands Ingenieure der Entwicklungsabteilung in Lollar zu Hilfe gezogen.

Versuchsdurchführung: Die Anlage wird zunächst initial in Betrieb genommen, „eingefahren“, auf Konnektivität geprüft und mit Hilfe der Unterstützung von Prüfstands-Ingenieuren der Bosch Thermotechnik GmbH auf korrekte Funktionsweise über das Online Wartungstool (RST bzw. HomeCom oder BuderusConnect) geprüft. Anschließend wurde der Datensatz der Referenzfahrt generiert. Weitere fehlerbehaftete Datensätze werden durch Einbringung von Fehlerzuständen nachfolgend erzeugt. Ein Datensatz beinhaltet jeweils die Versuchsdurchführung von 4 aufeinanderfolgenden Tagen, also 96 h. Das Wetterprofil stammt von Klimawerten einer DWD-Wetterstation in Dresden und wurde über ein gängiges KMediod-Verfahren in 3 TypTage umgewandelt. Für das Zapfprofil wurden die Werte für das Profil M und L aus der Norm verwendet. Somit ergeben sich folgende 4 Versuchsszenarien, welche über die Wärmesenke und das Zapfmodul abgebildet werden.

Szenario 1: Typischer Wintertag, Zapfprofil M

Szenario 2: Typischer Übergangstag, Zapfprofil M

Szenario 3: Typischer Übergangstag, Zapfprofil L

Szenario 4: Typischer Sommertag, Zapfprofil M

Im nachfolgenden wird dieser Datensatz und das zu beobachtende Betriebsverhalten als normales Betriebsverhalten bezeichnet. Im Weiteren wurde die Anlage für die jeweiligen Fehlerfälle vorbereitet. D.h. die im Abschnitt Fehlerfall beschriebenen Defekte werden in die Anlage eingebracht. Hierfür werden präparierte Bauteile verwendet bzw. Veränderungen an der Anlage vorgenommen. Der Versuchsablauf und die Versuchsbedingungen sind die gleichen wie bei den Referenzfahrt. Wurde ein Umbau bzw. eine Wartung der Anlage bzw. Versuchsumgebung durchgeführt wurden auch neue Referenzfahrten durchgeführt.

Nachfolgend werden die untersuchten Fehlerfälle einzeln aufgelistet. Zu jedem der Fehlerfälle wurde ein detailliertes Dokument zur Beschreibung der Vorgehensweise am Prüfstand, sowie mit Hypothesen welche Auswirkungen durch den injizierten Fehler erwartet werden, erstellt.

Verschmutzter Filter (25%, 50%, 75%, 100%): Die Aufgabe des Filters besteht darin den Plattenwärmetauscher der Außeneinheit vor groben Partikeln sowie Verschmutzung und Verschlammung zu schützen. Bei Bedarf bzw. regelmäßigen Wartungsintervallen kann dieser gesäubert werden und die Verunreinigungen aus dem System entnommen werden. Es soll untersucht werden, ob ein Grad der Zusetzung in den Daten erkennbar ist. Dieser wird mittels Klebefläche im Fließbereich des Filters nachgestellt und vor Beginn jedes Versuchsdurchlaufs in die Anlage eingebracht.

Rückschlagklappe 1 geöffnet (Speicher Trinkwarmwasser): Die Aufgabe einer Rückschlagklappe besteht darin die Fließrichtung des Wärmeträgermediums Wasser in eine Richtung zuzulassen und in die andere zu sperren. Im Versuch wird nachgestellt, wie sich eine defekte Rückschlagklappe auf den Betrieb der Heizanlage auswirkt. Defekt bedeutet in diesem Fall, dass der Federmechanismus des Ventils nicht mehr schließt und eine bidirektionale Flussrichtung ermöglicht wird. Daraus resultierend werden Fehlströmungen erwartet, welche zu ineffizientem Verhalten führen können. Die Position der Rückschlagklappe 1 befindet sich im Vorlauf der Trinkwarmwassererwärmung.

*Rückschlagklappe 2 geöffnet (Heizkreis):*Analog zu Rückschlagklappe 2, diese befindet sich im Heizkreisset der Anlage.

Kugelhahn Heizkreis (manuell geschlossen): Bei der Installation und Wartung der Anlage können Flüchtigkeitsfehler passieren. Der Servicetechniker kann z.B. vergessen ein Absperrventil wieder zu öffnen und es in geschlossener Position zu belassen. Dieser Fehlerfall soll diesen Fall abdecken und die Folgen nachstellen, sofern keine Wärme von der Wärmepumpe an das System abgeben werden kann.

Plattenwärmetauscher der ODU verschmutzt (25%, 50%, 75%, 100%): Der Plattenwärmetauscher der Außeneinheit der Wärmepumpe ist primär durch das Filterelement abgesichert. Dennoch kann sich dieser über die Zeit zusetzen und eine manuelle Spülung kann vorgenommen werden. Es soll untersucht werden, ob die Zusetzung erkannt werden kann bzw. das System sich aufgrund dessen verändert.

Sensor TC3 (Vorlauftemperatur ODU) gealtert (Drift des Widerstands): Sensoren unterliegen einem natürlichen Alterungsprozess, der zu einer schleichenden Veränderung der Messwerte führt – typischerweise als Drift bezeichnet. Dieser Effekt wird in der Untersuchung durch den Einsatz

zusätzlicher Festwiderstände simuliert. Im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten mittels des Einsatzes von Methoden des maschinellen Lernens eine agentenbasierte Regelung von HVAC-Systemen untersucht. Ein Ausschnitt der Laborumgebung stellt dabei den Versuchsstand dar.

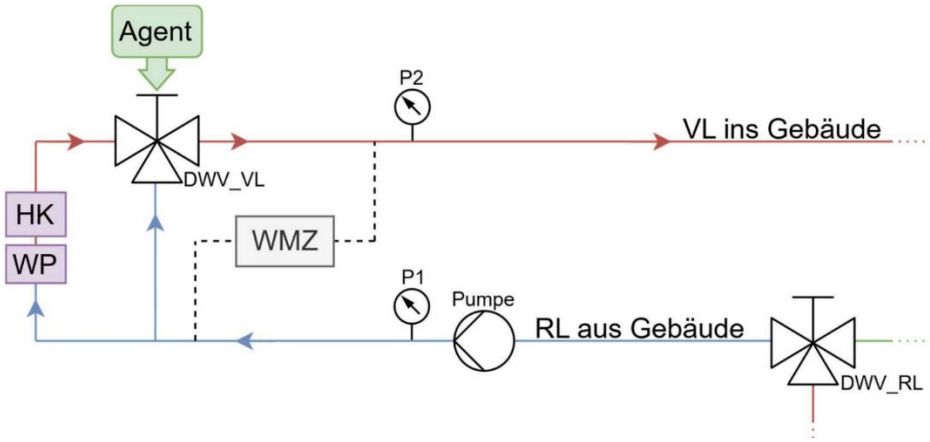


Abbildung 16: Schematische Darstellung des Versuchsstands

Der Versuchsstand umfasst keinen physischen Verbraucher, stattdessen wird eine softwareseitig vorgegebene Rücklauftemperatur (Rücklauf = RL) durch das Dreiwegeventil (DWV) DWV_RL abgemischt. Beim Vorlauf (VL) ins Gebäude fließt das Wasser in temperierte Speichertanks, aus denen wiederum Wasser für den RL entnommen wird. Die eingezeichnete Pumpe fördert einen fest eingestellten Volumenstrom von 850 l/h. Die Wärmepumpe (WP) mit 9 kW und der Heizkessel (HK) mit 30 kW Heizleistung sind in Reihe geschaltet. Deren Regelungen entnehmen die jeweilige Soll-VL-Temperatur aus hinterlegten Heizkurven. Diese sind herstellerseitig vorgegeben und werden im Rahmen dieser Arbeit nicht verändert. Die VL-Temperatur ins Gebäude wird durch das DWV_VL abgemischt. Hier erfolgt in dieser Arbeit der Steuerungseingriff des Agenten. Da in der restlichen Arbeit hauptsächlich das DWV_VL von Bedeutung ist, wird dieses von nun an als DWV bezeichnet. P1 und P2 bezeichnen statische Drucksensoren. Der Wärmemengenzähler (WMZ) misst die eingebrachte Wärmemenge durch die WP. Die Außeneinheit der verbauten Luft-Wasser-WP befindet sich in der Klimakammer, diese ermöglicht die dynamische Einstellung von Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit im Verlauf des Versuchs. Die entsprechenden Sollwerte werden aus einer Wetterdatei bezogen.

Die simulative Abbildung des gesamten Systems ist stark vereinfacht, um für geringe Rechenzeiten zu sorgen. Dies ist aufgrund der häufigen und seriell ablaufenden Simulationsläufe während des Trainings des Agenten hochgradig relevant. Weiterhin wird eine geringe Trägheit des Modells priorisiert, um auch bei den geplanten kurzen Versuchszeiten von fünf bis zehn Stunden maßgebliche Effekte beobachten zu können.

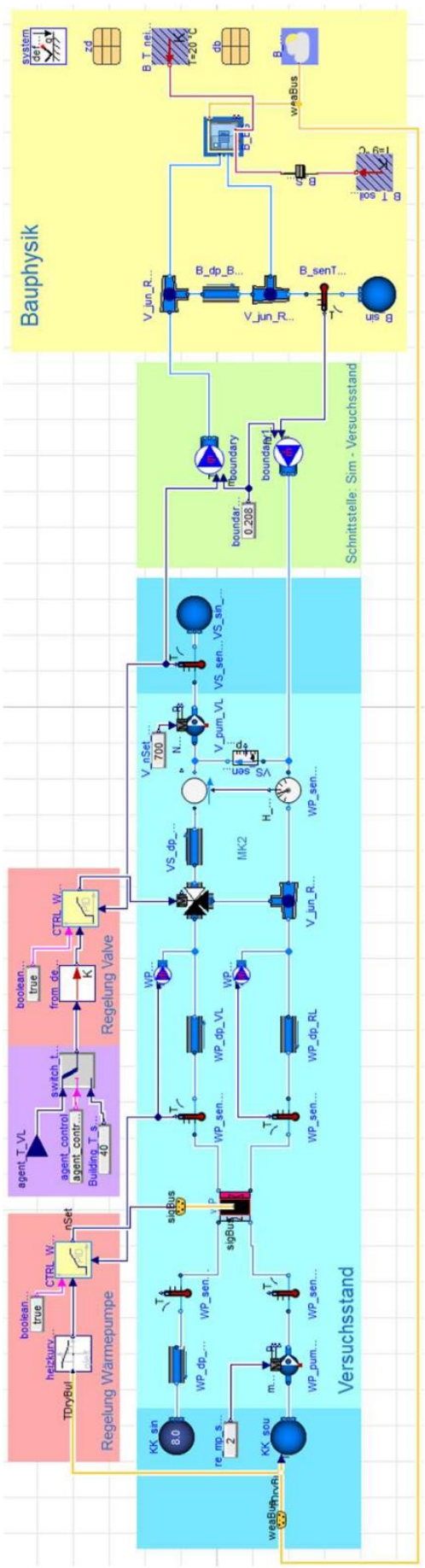


Abbildung 17: Stark vereinfachte simulative Abbildung des gesamten Systems

6. Analysestrategien und Algorithmen zur Betriebsfehlererkennung (AP 5)

Verantwortlicher Projektpartner: GreenPocket

6.1. Auswertung der Experimente

Im Rahmen der datengestützten Auswertung der Experimente wurden folgende Forschungsfragen aufgestellt und bearbeitet:

- Forschungsfrage 1: Welche Methoden des unüberwachten maschinellen Lernens sind für den Anwendungsfall „Heizanlage" sinnvoll einsetzbar?
- Forschungsfrage 2: Wie können Fehlerzustände innerhalb der Heizungsanlage automatisiert erkannt werden?
- Forschungsfrage 3: Wie kann die Effizienz der Anlage mit der vorhandenen Sensorik abgeschätzt werden?

6.2. Vorverarbeitung und Datenmigration

Die in der Klimakammer verbaute Anlage ist mit einer reichen Sensorik ausgestattet, über die 311 verschiedene Messgrößen erfasst und an das EMS-System von Bosch gesendet werden. In der Klimakammer selbst ist ebenfalls Sensorik verbaut, die weitere 165 Messgrößen generiert. Für die analytische Auswertung wurden diese Daten in einem gemeinsamen Dateiformat zusammengeführt. GreenPocket hat zu diesem Zweck ein Python-Skript entwickelt und dessen Ausführung i.d.R. auch selbst betreut und überwacht.

Zunächst werden die Formate beschrieben, wobei der Fokus auf die für die Zusammenführung relevanten Unterschiede gelegt wird.

Laboraufzeichnung Klimakammer (Fraunhofer)

- feather-Dateiformat
- Menschenlesbare UTC-Datumswerte (yyyy-MM-dd HH:mm:ss)
- Sekündliche Abtastung bzw. Aufzeichnung
- Unregelmäßige Zeitintervalle je Datei
- Datenerfassung nur während eines laufenden Versuchs

EMS-Datenerfassung Hybridanlage (Bosch)

- csv-Dateiformat
- Unix-Timestamps
- Unregelmäßige Abtastung bzw. Aufzeichnung
    - Ereignisgesteuert; nur bei einer tatsächlichen Wertänderung wird ein Messwert geschrieben
    - dünnbesetzte Datei (nicht explizit gemessene Werte je Zeile sind ausgespart)
- Eine Datei pro Kalendertag
- Dauerhafte Datenerfassung (auch außerhalb von Versuchszeiten)

Bei der Zusammenführung werden die Laboraufzeichnungen als führende Datenquelle verstanden. Das heißt, EMS-seitig werden alle Daten verworfen, die außerhalb der Versuchszeiten liegen. Eine Zusammenführung wird immer pro Versuch durchgeführt.

Die für einen Versuch ausgewählten EMS-Dateien werden an das Datenformat der Laboraufzeichnungen angeglichen. Zeitstempel werden auf Sekundengenauigkeit gerundet. Duplikate, die aufgrund von Rundungsfehlern entstehen, werden entfernt. Ein eventueller Datenverlust wird dabei als vernachlässigbar hingenommen. Als nächstes erfolgt ein Upsampling auf sekündliche Frequenz unter Anwendung eines Forward-Fill. Das bedeutet, ein Wert wird einfach in die Zukunft fortgeschrieben, bis ein neuer Wert im Ausgangsdatensatz auftaucht. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass der zuletzt erfasste Wert solange gilt bis ein neuer auftritt. Da Upsampling und Forward-Fill auch über Tages- und damit Dateigrenzen hinweg erfolgen muss, werden die Dateien sequenziell verarbeitet und die jeweils letzte Zeile als Übertrag in die nächste Datei verwendet. Die durch das Forward-Fill angereicherten Zeilen lassen sich über eine weitere Metadatenspalte von den explizit gemessenen Datenpunkten unterscheiden.

Die Daten beider Seiten sind nun strukturell gleich und werden zeilenweise anhand von Zeitstempelgleichheit verbunden. Diese Verbindung entspricht einem LEFT OUTER JOIN relationaler Datenbanken, wobei der Labordatensatz die linke Seite besetzt. Dies bedeutet, dass für jede Zeile aus dem Labordatensatz die zeitliche Entsprechung der Gegenseite (rechte Seite) genommen wird. Zeilen der rechten Seite (EMS-Daten), für die es im Labordatensatz (links) keine Entsprechung gibt, werden verworfen. Bei Zeilen, zu denen auf der rechten Seite keine Entsprechung gefunden werden kann, bleiben die rechtsseitigen Spalten unbesetzt.

Die Spalten des Labordatensatzes sind mit kryptischen alphanumerischen Bezeichnern versehen. Diese werden im Skript mit Hilfe einer Übersetzungsdatei in eine menschenlesbare Form überführt. So wird z.B. aus "XLM12CPW01" der anschauliche Bezeichner "Mischkreis 2 Pumpe Ansteuerung".

Schließlich gibt das Skript die aufbereiteten und zusammengeführten Daten im feather-Format aus. Die zeitliche Aufteilung auf mehrere Dateien entspricht dabei genau den eingegebenen Dateien des Labordatensatzes und folgt auch deren syntaktischer Struktur.

6.3. Analyseverfahren

Es werden Statistiken der Betriebstage einer Einzelanlage erstellt und als Vergleichswerte verwendet. Anders als die Anwendung auf die Gesamtheit des Datensatzes wird zunächst über das dichte-basierte Clustering-Verfahren dbscan eine Unterteilung in n Unterdatenmengen vorgenommen. Die Anzahl der Cluster n wird über die Einstellung der Hyperparameter des dbscan-Verfahrens vorgenommen. Die eingestellten Werte ergeben sich aus dem Expertenwissen bzgl. des Datensatzes und können über eine Sensitivitätsanalyse an den Anwendungsfall angepasst werden.

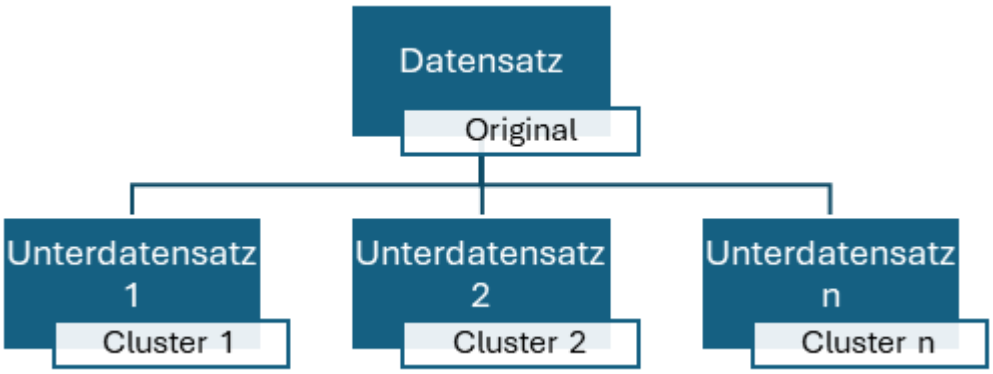


Abbildung 18: Dichtebasierte Clustering-Verfahren dbscan

Auswahl relevanter Datenpunkte des EMS-Bus: Der EMS-Bus ist das Datenübertragungssystem der Heizungsanlage und ermöglicht die Kommunikation der Wärmeerzeuger mit den weiteren Modulen. Hierüber werden regelungstechnisch relevante Informationen ausgetauscht und an ein Konnektivität-Modul gesendet. Primär soll das Betriebsverhalten der Wärmeerzeuger überwacht werden. Somit wird eine Übertragbarkeit auf viele Feldanlagen gewährleistet, die in klassischer industrieller Fertigung dieselbe Bauweise und Sensorik aufweisen. Man kann dort umgangssprachlich von Informationsbilanzgrenzen sprechen, also einer Analyse des Wärmeerzeugers ohne Einbezug der weiteren Peripherie, welche sich aufgrund der unterschiedlichen Einbauweise vor Ort unterscheiden kann. Eine Vorauswahl der etwa 300-500 verfügbaren Datenpunkte reduziert dies auf etwa 10-15 Parameter, die ein komplexitätsreduziertes Abbild der Anlage ermöglichen. Für den Speicher und den gemischten Heizkreis wird jeweils ein weiterer Sensor mit aufgenommen.

Gewählte Datenpunkte der EMS-Bus Kommunikation:

- Wärmepumpe: Stellgröße Kompressor, Lufteintrittstemperatur, Heißgastemperatur, Vorlauftemperatur, Rücklauftemperatur
- Pumpe: Stellgröße Drehzahl, Volumenstrom, Förderhöhe
- Kessel: Stellgröße Brenner, Vorlauftemperatur, Rücklauftemperatur
- Speicher: Warmwassertemperatur
- Gemischter Heizkreis: Vorlauftemperatur

Visueller Vergleich des normalen Betriebsverhaltens mit dem Fehlerfall (durch den Menschen): Mittels eines Streudiagramms (Punktwolke) bei niedriger Deckkraft der einzelnen Punkte werden die zwei Betriebszustände miteinander verglichen. Für das Diagramm wird die Python Bibliothek seaborn und die darin vorhandene Funktion pairplot verwendet. Somit wird ein erster visueller Eindruck generiert, ob die einzelnen Datenpunkte im Fehlerfall von denen des normalen Betriebs abweichen. Im Fall des zugesetzten Filters zeigt sich die Abweichung z. B. durch einen verminderten Volumen-strom bei gleichzeitig erhöhter Stellgröße der Drehzahl der Pumpe.

Anwendung der Clusteranalyse für die Reduktion vieler Datenpunkte in wenige Repräsentationswerten mit Mittelwert und Standardabweichung des Clusters (als typische Systemzustände bezeichnet → Automatisierung durch Maschine): Unüberwachtes maschinelles Lernen (spez. Clustering) kann Strukturen in Datensätzen automatisiert erkennen. Die gefundenen Cluster werden als repräsentative Clusterschwerpunkte mit Mittelwert und Standardabweichung dargestellt. Diese können nun im Referenz- und Fehlerfall verglichen werden und somit Aussagen über Systemveränderungen getroffen werden. Weitere Informationen wie z.B. die Zeit im Betriebszustand können über die Zeitstempel des EMS-Datensatzes berechnet werden.

Im Fall des zugesetzten Filters kann z.B. eine Veränderung des Clusterschwerpunktes festgestellt werden. Mit Hilfe des Q/H-Diagrammes des Pumpenherstellers Wilo konnte z.B. gezeigt werden, dass der typische Betriebspunkt zwar mit den Angaben des Herstellers übereinstimmt, sich jedoch bei den unterschiedlichen Graden der Zusetzung grafisch erkennbar bewegt.

Effizienzbewertung der Betriebsweise in den gefundenen Clustern: Eine abschließende Bewertung der Energieeffizienz soll eine Bewertung der Zustände ermöglichen. Hierfür soll zunächst eine vereinfachte Abschätzung über die Carnot Effizienz und den Gütegrad der Wärmepumpe ausreichen. Somit wir der Stellwert des Kompressors, die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe und die Lufteintrittstemperatur benötigt.

Prüfen auf Stationarität der Cluster: Ein klassischer Prüfstand arbeitet mit sog. Beharrungszuständen zur Effizienzmessung. Werden die relevanten Parameter für eine fest definierte Zeit gehalten kann eine Messung der Leistungsgrößen der Anlage erfolgen. Mittels der 1.Ableitung der verwendeten Datenpunkte wird eine solche Prüfung der Cluster vorgenommen. Ist eine ausreichend große Stationarität der Cluster gegeben kann der gefundene typische Zustand der Anlage als Referenz für die Effizienzbewertung dienen.

Zu Forschungsfrage 1 (Methoden des maschinellen Lernens): Damit Modelle des maschinellen Lernens „trainiert“ und spezifische Merkmale in den Datensätzen finden können, werden sog. Label benötigt. Ein Trainingsdatensatz enthält somit die Information, ob dieser von einer Referenz- oder von einer fehlerhaften Versuchsdurchführung stammt. Ist das Label im Voraus bekannt, wird von überwachtem maschinellem Lernen gesprochen. Anders beim unüberwachten maschinellen Lernen, bei welchem ohne Label nach auffälligen Charakteristika bzw. nach homogenen Gruppen von Betriebspunkten bei der Clusteranalyse gesucht wird. Für die anschließende Bewertung wird beim unüberwachten Lernen also ein zusätzliches Konzept benötigt, das den Datensatz klassifiziert/labeled.

Aus der Literatur wurde (Ester & Sander, 2000) als primäre Quelle für Methoden des maschinellen Lernens ausgewählt. Mit den darin beschriebenen Clusteringverfahren einer Forschergruppe der LMU in München können große Datensätze über wenige repräsentative typische Betriebspunkte vereinfacht dargestellt und bewertet werden. Die rund 7200 Messwerte pro Tag bei ~15 Mess- und Regelgrößen der Heizanlage können nun mit wenigen typischen Betriebspunkten und deren statistischen Abweichungen dargestellt werden. Dies ermöglicht die automatisierte Erkennung von Abweichung nach klassischer regelbasierter Logik, sobald Grenzwerte gehäuft über bzw. unterschritten werden.

Zu Forschungsfrage 2 (Fehlzustände): Statistiken sollen, „objektiv“ (unabhängig vom Standpunkt des Statistikherstellers), „reliabel“ (verlässlich), „valide“ (überkontextuell gültig), signifikant (bedeutend) und „relevant“ (wichtig) sein. Für die bereits angesprochene Klassifizierung von Fehlzuständen müssen diese Kriterien berücksichtigt werden, um eine nützliche Aussage zum Zustand der Anlage treffen zu können. Für die Erkennung von Fehlzuständen werden deswegen vier Vergleiche zu Hilfe genommen und bei späterer Analyse auf die gezeigten Kriterien geprüft.:

- Vergleich Anlage mit sich selbst über die Zeit
- Vergleich zu anderen baugleichen Systemen (z.B. zwei WLW196 Wärmepumpen)
- Vergleich zu Prüfstandswerten
- (Ähnlich zum Vergleich zu anderen Anlagen aber als „Best Case“ bzw. Benchmark Aufbau angedacht) Vergleich zu physikalischen Modellen bzw. Simulation (Stichwort Digitaler Zwilling)

Sofern Abweichungen bei den Vergleichen mit dem fehlerfreien Referenzzustand identifiziert werden können, müssen diese auf ihre “Signifikanz” bewertet werden. Liegen die beobachteten Werte außerhalb des tolerierten bzw. beobachteten Normalverhalten (z.B. signifikante Abweichung zur Standardverteilung eines oder mehrerer Parameter), wird dieses Muster als Indiz für den injizierten Fehlerzustand gewertet. Die Implementierung der entsprechenden (gelernten) Mustererkennung dient dann anschließend zur Erkennung des Fehlerzustandes in neuen (bisher nicht untersuchten) Datensätzen.

Zur Umsetzung in die Praxis müssen die erkannten Muster allerdings zunächst auf generelle Übertragbarkeit geprüft werden. Die Mustererkennung an einem System unter Laborbetriebsbedingungen stellt alleine noch keine gesicherte Grundlage für eine verlässliche generelle Anwendung im Feld dar, liefert aber verwertbare Hinweise auf die für die Erkennung des Fehlers besonders relevanten Parameter.

Forschungsfrage 3 (Effizienz): Anfangs wurde die Hypothese aufgestellt, dass die gefundenen Fehlzustände zu ineffizientem Betriebsverhalten führen und eine automatisierte Erkennung relevant ist. Es soll überprüft werden, inwiefern die Effizienz der Anlage tatsächlich abweicht. Hierfür soll ein vereinfachtes Verfahren zur Abschätzung entwickelt und mit den zusätzlich installierten Wärmemengenzähler überprüft werden. Aus energetischer Sicht ist v.a. die Wärmepumpe ein interessanter Untersuchungsgestand, genauso kann aber auch die Heizungspumpe bzw. der Kessel betrachtet werden. Die Effizienz der Wärmepumpe kann über den sog. Gütegrad und die Carnot Effizienz der Anlage abgeschätzt werden. Innerhalb der Entwicklungsabteilung der Bosch Thermotechnik GmbH stehen bereits vereinfachte mathematische Modelle zur Effizienzbewertung zur Verfügung. Eine zusätzliche Validierung findet über die installierten Wärmemengenzähler statt.

Zusammenfassend kann die gestellte Forschungsfrage nur teilweise bewertet werden. Grundsätzlich konnte ein Einfluss der Fehlerzustände auf die Effizienz einer Anlage nachgewiesen werden. Die Stärke der Einflüsse der Fehlerzustände auf die Effizienz einer Heizungsanlage sind allerdings nur bedingt zu quantifizieren und u.a. abhängig von folgenden Faktoren:

- Schweregrad des Fehlerzustandes: Beispielsweise zeigt sich im Fehlerfall des "verschmutzten Filters” erst bei einem sehr hohen Verschmutzungsgrad ein Einfluss auf das System. Ebenso im Kontext des Plattenwärmetauschers kann ein Fehler erst verlässlich erkannt werden, wenn die Verschmutzung in Bereiche von 75% oder mehr beträgt.
- Außentemperatur / Belastung des Systems: Ein Fehler, der sich maßgeblich im Heizbetrieb äußert, wird bei Inaktivität des Heizsystems /z.B. im Sommer) zunächst unerkannt bleiben. Erst bei stärkerer Last des Systems z.B. durch sehr niedrige Außentemperaturen kann ein Effekt erkannt werden. D.h. hier gilt es wiederkehrende Betriebszustände auch auf Basis der Außentemperatur/Last zu identifizieren
- Dauer des fehlerhaften Zustandes: Die kurze Laufzeit der Testzyklen von 4 Tagen mit unterschiedlichem Profil erlauben keine gesicherten Rückschlüsse auf die Effizienzabweichung einer Anlage über längere Zeiträume (z.B. Heizperiode). Es ist aber davon auszugehen, dass, sofern ein fehlerhaftes Muster vorliegt, die Ausprägung bzw. die Auswirkung über Zeit und Belastung des Systems zunimmt Dauerversuche oder Simulationen über einen längeren Zeitraum können hier beitragen, die Effekte besser zu quantifizieren.

Datenakquise über Simulation (Fraunhofer): Ein digitaler Zwilling des Laboraufbaus wurde unter Verwendung der Modelica-Modellierungssprache erstellt und modelliert den Prüfstand innerhalb der hydraulischen und thermischen Domäne. Abbildung 19 zeigt einen Screenshot des Modelica-Modells der physikalischen Anlage. Auf der linken Seite sind die beiden Mischkreise zu sehen, die aus verschiedenen Wasserquellen mit unterschiedlichen Anfangstemperaturen und Wärmetauschern (HEX) bestehen. Das gelbe Kästchen unten rechts regelt die Komponenten der Klimakammer und das grüne Kästchen oben rechts in der Abbildung regelt den Rest der Komponenten, die mit dem HIL in Verbindung stehen (Wasser Speichertanks, Wasserpumpen und Sensoren).

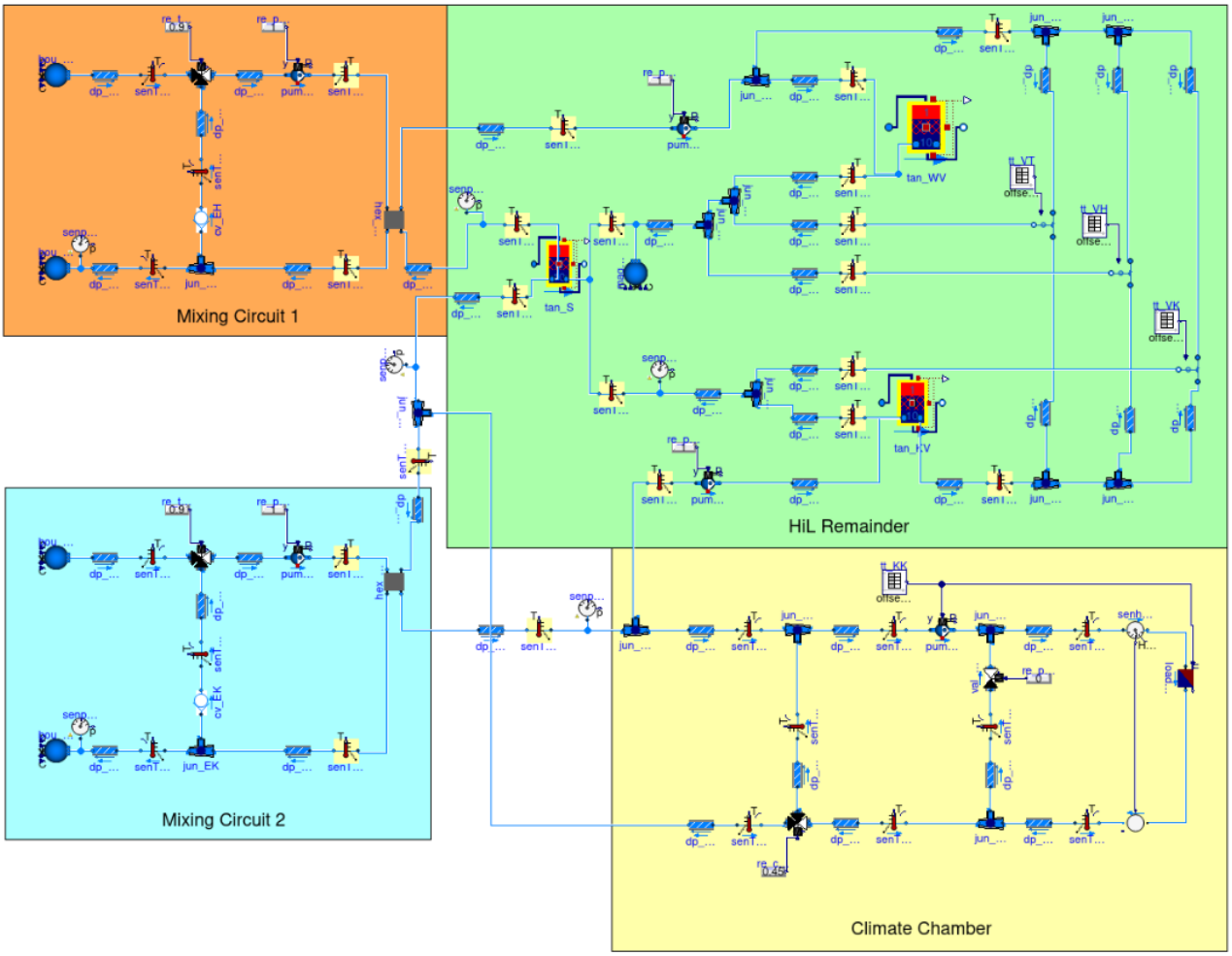


Abbildung 19: Ein digitaler Zwilling des Laboraufbaus

7. Lastverschiebungspotenzial / Smart Grid-Strategien (AP 6)

Verantwortlicher Projektpartner: Fraunhofer IIS

7.1. Ziel der Simulation:

Das Simulationsmodell dient der Untersuchung der Einflussfaktoren im Energiemanagement eines Hauses, insbesondere hinsichtlich der Lastverschiebung. Es wird analysiert, wie sich Maßnahmen wie Abschaltung oder Drosselung einer Wärmepumpe durch eine externe Lastverschiebung bspw. durch den Netzbetreiber auf den Komfort (Raumtemperatur, Trinkwassertemperatur) und auf den Energieverbrauch auswirken. Ebenso wird die Veränderung der Schaltzyklen bzw. Taktzyklen der Wärmepumpe – als Indikator für mechanischen Verschleiß – untersucht. Gleichzeitig liefern die gewonnenen Daten auch Erkenntnisse zu Auswirkungen durch interne Lastverschiebungsmaßnahmen, wie durch Steuerung durch ein Energiemanagementsystem. Aufbau des Modells:

Simulationsmodell

- Als Vorlage für das erstellte Simulationsmodell diente eine typische Doppelhaushälfte mit einer Grundfläche von 8x9m, bestehend aus 3 Zonen (EG, OG, DG). Die Wärmeerzeugung erfolgt über eine Luft-Wasser-WP, welche einen Pufferspeicher mit Wärme versorgt.
- Es werden für Herbst und Winter typische Wettersituationen untersucht

Eingangsparameter und Parametervariationen:

- Die Simulation wird über ein zentrales Python-Skript gestartet, in dem Parameter wie Simulationsdauer, FMU-Pfad sowie spezifische Gebäudedaten definiert werden.
- Wesentliche Eingangsgrößen sind beispielsweise das Volumen des Pufferspeichers, die Solltemperatur und Parameter der Lastverschiebung wie Dauer, Startzeitpunkte sowie der Schaltmodus (WP komplett deaktiviert oder nur reduzierter Modus).
- Die Gebäudehülle, dargestellt durch U-Werte (Wärmedurchgangskoeffizienten) für Baujahre 1960, 1990 und 2022, wird ebenfalls berücksichtigt, wenn auch in Multiplikation, um eine intuitivere Interpretation zu ermöglichen.

Systemintegration und Export:

- Die Simulation erfolgt über eine FMU, die in Dymola exportiert wird. Dabei wird auf reale, aber auch synthetische Wetterdaten (über EnergyPlus EPW-Dateien bzw. ein selbst-generiertes Wetterfile) zurückgegriffen, um konsistente Umgebungsbedingungen zu schaffen.
- Für die Erzeugung und den Export der Wetterdaten existiert ein Python-Skript, welches bei Bedarf gesteuert werden kann, um beispielsweise einen Tag zu wiederholen und so den Einfluss der Lastverschiebung auf einen idealisierten Tag besser zu interpretieren.
- Abbildung 20: Ansicht des Simulationsmodells im Simulationstool Dymola
- Die Integration des Modells in die Testumgebung erfolgt dabei über das zuvor genannte FMU. Dieses gekapselte Modell wird dann in einer Python Umgebung aufgerufen und simuliert, wobei die Simulationsergebnisse protokolliert werden.

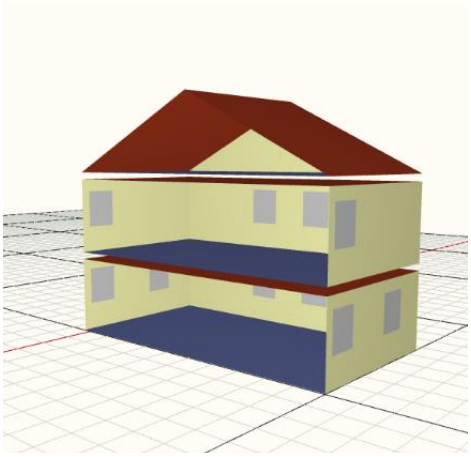


Abbildung 20: Ansicht des Townhouse-Simulationsmodells

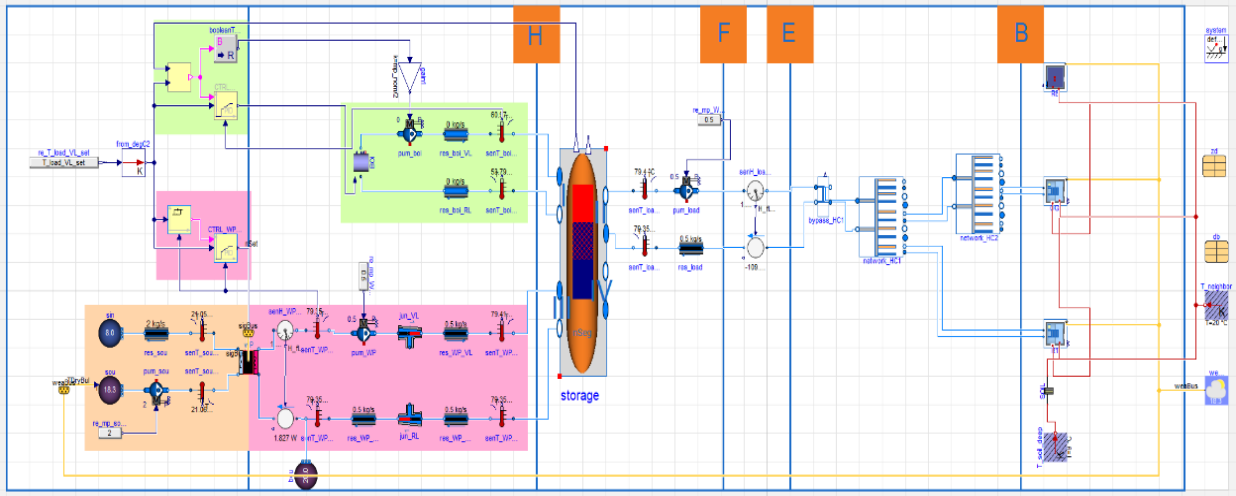
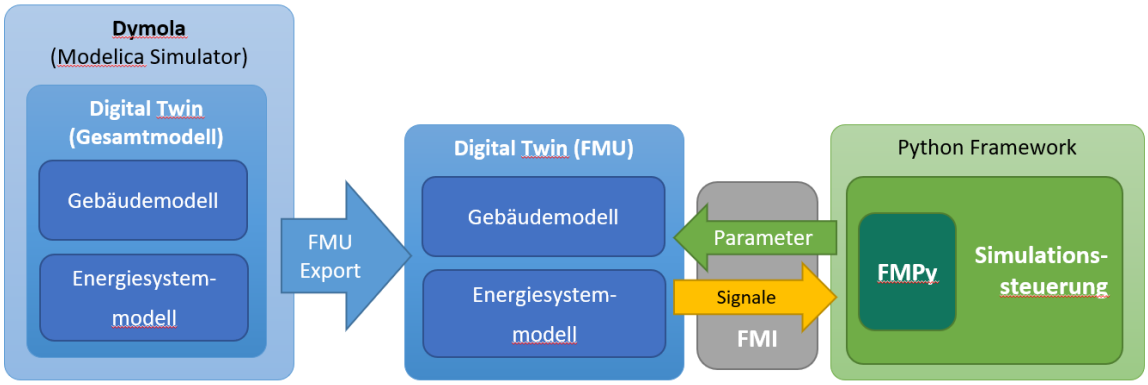


Abbildung 21: Ansicht des Simulationsmodells im Simulationstool Dymola



2.

Abbildung 22: Integration des Simulationsmodells als FMU

7.2. Simulationsergebnisse und deren Auswertung

Simulationsergebnisse – Parametervariationen: Nachfolgend sind die wesentlichen Simulationsergebnisse bei variierenden Eingangsparametern zusammengefasst.

Variation der Pufferspeichergröße: Die Größe des Pufferspeichers wurde zwischen 800 und 1300l variiert.

- *Beobachtungen:* Bei kleineren Pufferspeichergrößen wurde eine größere Anzahl an Schaltvorgängen im Steuersignal festgestellt. Dies liegt daran, dass ein kleiner Speicher schneller die Zieltemperatur erreicht und generell häufiger nachgefüllt werden muss. Die WP läuft kürzer und taktet insgesamt häufiger.
- *Ergebnisinterpretation*: Ein zu kleiner Pufferspeicher begünstigt einen unstabilen Betrieb, wobei sich die Regelungsparameter stärker zeitlich ändern. Gleichzeitig zeigen sich bei optimaleren (größeren) Speichergrößen geringere Schwankungen und ein optimales Energieverbrauchsverhalten, das sich auch im COP (Coefficient of Performance) widerspiegelt.

Variation der Solltemperatur: Die Raumtemperatur wird zwischen 20 und 25°C variiert.

- *Beobachtungen*: Der Energieverbrauch steigt linear mit der Erhöhung der Solltemperatur. Die täglichen Temperaturprofile verhalten sich relativ konstant, auch wenn Lastverschiebungen durchgeführt werden. Die Solltemperatur hat dabei keinen Einfluss auf ein verzögertes Ansprechen oder gar einen Temperaturabfall
- *Ergebnisinterpretation*: Die Stabilität der Raumtemperatur, trotz der unterschiedlichen Sollwerte, belegt, dass das System in der Lage ist, den gewünschten Komfort zu gewährleisten. Gleichzeitig ermöglicht der lineare Energieverbrauch eine direkte Kalkulation der Kosteneinsparungen durch Lastverschiebung, ohne dass es zu abrupten Temperaturschwankungen kommt.

Variation der Lastverschiebungsdauer: Die Dauer der Lastverschiebung, d.h. die Deaktivierung der Wärmepumpe wird zwischen 0 und 2 Stunden variiert.

- Beobachtungen: Die Analyse der Lastverschiebung (durch Abschaltung oder Drosselung der Wärmepumpe) zeigt, dass mit zunehmender Länge der Abschaltphase, das Steuersignal an die Wärmepumpe immer stärker ansteigt. Auffällig ist auch ein Umschwung der Schaltzyklen: Bei einer LV-Dauer von etwa einer Stunde wechselt das System von einem zu zwei Schaltzyklen pro Tag, was als Folge eines verstärkten Steuersignals interpretiert werden kann.
- Ergebnisinterpretation: Eine zu lange Lastverschiebung führt zu einem signifikanten Abfall des COP, da die Wärmepumpe gezwungen wird, außerhalb des optimalen Betriebsfensters (bei kälteren Nachtemperaturen) zu arbeiten. Dies resultiert in einem etwas ineffizienteren Betrieb, wobei die Raumtemperatur dennoch im akzeptablen Rahmen gehalten wird.

Die Analysen deuten darauf hin, dass ein Kompromiss zwischen der Länge der Abschaltung und der Systemeffizienz gefunden werden muss, um einerseits kostensparende Maßnahmen zu realisieren und andererseits die Betriebseffizienz der Wärmepumpe nicht zu gefährden.

Weitere Kennzahlen und Auswertungselemente:

- COP (Coefficient of Performance): Der COP, der das Verhältnis von erzeugter Heizleistung zu elektrischer Leistungsaufnahme darstellt, zeigt einen ungewöhnlichen Verlauf, der bei zu hohen Solltemperaturen zunächst sinkt und dann leicht wieder ansteigt. Dies wird darauf zurückgeführt, dass die Regelung in diesen Szenarien eingeschränkt agiert.
- Raum- und Trinkwassertemperatur: Die Raumtemperaturen schwanken nur minimal um den Sollwert, was auf einen ausreichend funktionierenden Regelkreis hinweist. Die Trinkwassertemperatur variiert deutlich im Tagesverlauf, vor allem, wenn keine Lastverschiebung erfolgt.
- Schaltzyklen der Wärmepumpe: Ein automatisiertes Zählen der Schaltzyklen (jede Abschaltung im Steuersignal wird gezählt) zeigt, dass das System bei langer Lastverschiebungsdauer häufiger schaltet. Dies hat als mögliche Folge eine erhöhte mechanische Beanspruchung der Wärmepumpe und kann somit zu einem potenziell schnelleren Verschleiß der WP führen.

7.3. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die umfassende Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt, dass eine externe Lastverschiebung keine wesentlichen Auswirkungen auf den Komfort bzw. die Wärmeversorgung des Gebäudes hat. Bei einer kurzfristigen Lastverschiebung von bis zu 2h kann das WP-Puffer-System die Wärmeversorgung aufrechterhalten. Längere Unterbrechungszeiten sind abhängig von

Gebäudealter und Wärmebedarf jedoch zunehmend problematisch. Die wesentlichen Erkenntnisse sind aus den simulationsbasierten Untersuchungen sind:

- Optimierungspotenzial: Es konnte ein Optimum in Bezug auf den Energieverbrauch und den COP ermittelt werden, wobei diese beiden Parameter weitgehend übereinstimmende Trends zeigen. Eine passende Dimensionierung des Pufferspeichers und eine moderate Lastverschiebungsdauer wirken sich positiv auf die Energieeffizienz aus. Umgekehrt bewirken ein zu klein dimensionierter Puffer oder zu lange LV-Abschnitte einen geringfügig erhöhten Energieverbrauch. Besonders wenn LV als Maßnahme zu Erhöhung des Eigenverbrauchs von regenerativer Energie angewandt werden soll, ist dieser Zusammenhang zu berücksichtigen.
- Systemstabilität und Komfort: Trotz der eingeleiteten Lastverschiebungen bleibt der Raumkomfort (konstante Raumtemperatur) erhalten. Allerdings führen zu starke oder zu lange Eingriffe, z. B. durch sehr lange Abschaltzeiten, zu Überschwingern und könnten den Verschleiß der Wärmepumpe erhöhen.
- Weiterentwicklung: Das Modell ist als vergleichendes Untersuchungswerkzeug zu verstehen. Aufgrund der idealisierten Parameter und des vereinfachten Nutzerverhaltens ist eine validierte Aussage zur Bestimmung realer Betriebsgrenzen noch nicht gegeben. Zukünftige Arbeiten sollten die Simulation um reale Marktdaten, umfangreichere Wetterdaten und zusätzliche Gerätetypen erweitern, um auch unvorhergesehene Nutzungsmuster zu integrieren.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Lastverschiebung in einem smarten Energiesystem sowohl ökonomische Vorteile als auch einen positiven Einfluss auf den Betrieb einer Wärmepumpe haben kann. Gleichzeitig zeigt die Auswertung der Simulationen jedoch, dass ein empfindliches Gleichgewicht zwischen Regelungsstrategie, Systemstabilität und Nutzerkomfort gewahrt werden muss, um langfristig optimale Ergebnisse zu erzielen.

8. Feldtest (AP 7)

Verantwortlicher Projektpartner: Bosch TT

Entgegen der initialen Planung entwickelte Algorithmen zur Fehlererkennung mit realen Feldtestanlagen zu verproben, wurde kein Feldtest durchgeführt. Aufgrund der allgemeinen Verzögerung im Projekt konnte der erzielte Stand an Analyseergebnissen und Modellen nicht ausreichend validiert werden, um eine Übertragbarkeit ins Feld im Rahmen der Projektlaufzeit zu realisieren. Bosch TT prüft die erzielten Ergebnisse und Verfahren, um im Nachgang an das Projekt einen Transfer in die Praxis sicher zu stellen. Dazu wurden beispielsweise zusammen mit einem Service-Partner Felddatensätze gesammelt, die gemäß der zugehörigen Service-Berichte analoge Fehlerbilder aufgewiesen haben (z.B. Luft im System, verschmutzter Filter). Anhand dieser ”gelabelten” Datensätze soll u.a. erarbeitet werden, ob die gleichen Fehlermuster erkannt werden können wie am SHANGO-Versuchsprüfstand.

9. Validierung (AP 8)

Verantwortlicher Projektpartner: GreenPocket

9.1. Wesentliche Anwendungsfälle

Die entwickelten Projektergebnisse im SHANGO-Vorhaben fokussieren sich auf drei zentrale Use Cases, die in besonderem Maße zur praktischen Verwertung und künftigen Vermarktung beitragen:

- API-Integration
- Digitaler Zwilling
- Dashboard

In ihrer Kombination bieten sie einen unmittelbaren Mehrwert für folgende Nutzergruppen:

- Energieversorger
- Energiedienstleister aus dem Contracting-Segment
- Energieeffizienzberater
- Messstellenbetreiber

Die Realisierung der API-Integration, bildet die technische Grundlage des gesamten Ansatzes. Durch die erfolgreiche Einbindung der Bosch Partner-API konnte gezeigt werden, dass sowohl Betriebs- als auch Verbrauchsdaten aus Heizsystemen einfach und zuverlässig in externe Energiemanagementsysteme, wie dem von GreenPocket, überführt werden können. Auf Basis dieser angebundenen Datenströme wurde der Digitale Zwilling entwickelt, der eine exakte, digitale Abbildung der realen Anlagen und ihrer Betriebszustände ermöglicht. Diese Modellierung erlaubt eine präzise Verortung und Analyse einzelner Komponenten (z. B. Wärmepumpen, Heizkreise, Speicher) und bildet damit die strukturelle Grundlage für alle weiteren datenbasierten Services. Das Dashboard macht die gewonnenen Informationen für den Nutzer sichtbar und nutzbar. Es bereitet sowohl Verbrauchsdaten als auch Zustands- und Fehlerinformationen in einer intuitiven, verständlichen Form auf. Nutzer können dadurch Anlagen-Assets einfach überwachen, Betriebszustände nachvollziehen und Instandhaltungsbedarfe frühzeitig erkennen. Aufgrund des fehlenden Feldtests gibt es keine Indikatoren, welche der 12 Fehlerbilder den größten Einfluss auf einen energieeffizienten Einsatz von z.B. Wärmepumpen hat. Dennoch kann mit Hilfe des entwickelten Dashboards nun schnell ein Überblick über die Häufigkeit von Fehlerbildern gegeben werden. Auch dies kann zur besseren Beurteilung oder zur prädiktiven Instandhaltung von Anlagen-Assets beitragen.

9.2. Nutzerinterviews

Die Durchführung von Nutzerinterviews war ursprünglich geplant, um qualitative Einschätzungen zur Praxistauglichkeit und Nutzerakzeptanz der Anwendungsfälle zu erhalten. Geplant war, unterschiedliche Zielgruppen einzubeziehen, um Kernaussagen zu den Vor- und Nachteilen des Systems sowie zu möglichen Verbesserungsvorschlägen zu erheben.

Allerdings konnten die Interviews nicht in der geplanten Form durchgeführt werden. Dies lag vor allem an organisatorischen und praktischen Hürden wie dem hohen Koordinationsaufwand, Datenschutzfragen (insbesondere bei potenziellen Feldpartnern) und fehlenden bereits ausreichend stabilen Prototypen. Daher liegen keine belastbaren Interviewergebnisse vor.

9.3. Analyse und Evaluation der Modellergebnisse

Im Rahmen des Projekts wurden Best Practices aus der Forschung sowie bestehende Qualitätskriterien zur Modellgüte recherchiert. Dabei wurden vor allem Verfahren aus den Bereichen maschinelles Lernen (ML) und Clustering-Methoden (z. B. dbscan) berücksichtigt. Zudem wurden für die Effizienzanalysen Benchmarks wie der Coefficient of Performance (COP) und theoretische Referenzmodelle (z. B. Carnot-Wirkungsgrad) herangezogen. Diese Recherchen dienten als Grundlage, um die Modellansätze mit bestehenden Ansätzen in Wissenschaft und Praxis abzugleichen und zu bewerten, ob die gewählten Methoden für die intendierten Anwendungen (z. B. Fehlererkennung, prädiktive Wartung) geeignet sind.

Die eingesetzten Algorithmen (z. B. unüberwachtes Clustering) wurden kritisch in Bezug auf ihre Parametrisierung, mögliche Verzerrungen (Bias) und die Gefahr von Overfitting geprüft. Die Verfahren sind grundsätzlich geeignet, um Fehlerbilder und Effizienzabweichungen im Laborumfeld zu erkennen und zu dokumentieren. In realen Betriebsumgebungen könnten jedoch Variabilitäten in Nutzerverhalten, Gebäudestruktur und Witterung zu abweichenden Ergebnissen führen. Im Projektverlauf zeigte sich, dass viele Fehlerbilder (z. B. verschmutzter Filter, Rückschlagklappen-Fehler) nur bei stark ausgeprägten Zuständen zuverlässig detektierbar sind. Dies liegt an den geringen Änderungen in den Parametern bei geringen Verschmutzungsgraden. Zudem wurde reflektiert, dass aufgrund der begrenzten Datengrundlage (keine echten Feldtests, wenige Langzeitzyklen) keine vollständige Validierung der Mustererkennung möglich war.

Die Gefahr, dass ein Fehlerzustand erkannt wird, obwohl dieser gar nicht existiert (False-Positive) ist bei der aktuellen Datenlage noch sehr hoch. Daher müssen weitere Daten aus realen Anlagen einbezogen werden, um die Modelle weiter abzusichern. Außerdem wurden Alternativen wie eine stärkere Integration von digitalen Zwillingen oder hybride Modellansätze (Kombination aus physikalischen Modellen und ML) als potenzielle Weiterentwicklung identifiziert, um die Robustheit der Fehlererkennung zu erhöhen.

9.4. Einordnung der Analyseergebnisse in den Gesamtkontext des Projektes

Das Vorgehen innerhalb des Projektvorhabens war geprägt von einer engen, konstruktiven Zusammenarbeit zwischen allen Partnern. Besonders hervorzuheben ist der Aufbau der modularen IT-Architektur bei GreenPocket, die eine spätere Erweiterung und Integration weiterer Datenquellen oder Funktionen erlaubt. Die erzielten Effizienzgewinne, etwa durch verbesserte Fehlererkennung und prädiktive Wartung, konnten im Laborumfeld nachgewiesen werden, wenngleich eine genaue Quantifizierung der CO_2-Einsparpotenziale im realen Feldbetrieb noch nicht möglich war. Dennoch verdeutlichen die Testergebnisse, dass eine signifikante Reduktion unnötiger Energieverbräuche durch frühzeitige Identifikation von Fehlzuständen grundsätzlich realisierbar ist.

Die entwickelten Modelle und Analysen zeigen ein hohes Potenzial, die Betriebskosten durch optimierte Wartungsintervalle und eine präzisere Betriebsführung zu senken. Insbesondere für Contracting-Dienstleister oder große Gebäudeverwaltungen können hier erhebliche wirtschaftliche Vorteile entstehen. Allerdings sind die wirtschaftlichen Effekte stark von den Rahmenbedingungen abhängig, etwa der Qualität und Verfügbarkeit der Anlagendaten. Z. B. muss der Nutzer dafür sorgen, dass Submeter-Daten Verfügbar sind, um diese in die Software zu integrieren. Insbesondere Contracting-Dienstleister, Energieeffizienzdienstleister, sowie Messstellenbetreiber werden zukünftig Submeter-Daten zu Verfügung stellen können. Zudem muss berücksichtigt werden, dass False Positiv-Meldungen in der Praxis zusätzliche Kosten durch unnötige Serviceeinsätze verursachen können. Daher ist eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Algorithmen zur Minimierung dieser Fehlerquote entscheidend für den praktischen Einsatz. Außerdem haben die Tests zur Bewertung des Lastverschiebungspotentials beim Einsatz von

Wärmepumpen sehr gut aufgezeigt, dass bei einer Verschiebung im Rahmen eines Zeitfensters von bis zu 2h Preisvorteile genutzt werden können, ohne dass bei den Bewohnern signifikant spürbare Komfortverluste entstehen. Voraussetzung hierfür ist die dynamische Preisgestaltung z.B. beim Einsatz von Spotmarkt Day Ahead-Börsenpreisen. Diese Erkenntnis kann für Prosumer-Applikationen durch den Einsatz entsprechender Algorithmen bei Verwendung dynamischer Tarifangebote hervorragend eingesetzt werden. Genauso denkbar wäre aber ein Service-Angebot "Managed Heat" für den großflächigen Einsatz im gewerblichen Bereich.

Die erarbeiteten Konzepte und technischen Lösungen sind grundsätzlich auf andere Gebäudetypen und Nutzungsszenarien übertragbar. Auf diesem Weg könnten dann detaillierte Energieverbrauchsprofile von Gebäuden für Versorger und andere Dienstleister sowie die Verbraucher erstellt und ggf. miteinander verglichen und ausgewertet werden. Auf dieser Grundlage wäre es möglich, aussagekräftige Benchmarks zu erstellen und weiter zu verarbeiten. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass eine ausreichende Menge von Vergleichswerten vorliegt und diese spezifischen Gebäudecharakteristika zugeordnet werden können.

Das Gesamtvorhaben zeigt, dass eine durchgängige Ende-zu-Ende-Lösung von der Datenerhebung über die Analyse bis hin zur nutzerfreundlichen Visualisierung grundsätzlich möglich ist. Die im Projekt entwickelten Prototypen demonstrieren, wie ein solches System in der Praxis aussehen kann. Jedoch wurde aufgrund der fehlenden Feldvalidierung noch kein vollständiger Nachweis für die flächendeckende, praxisnahe Einsatzfähigkeit erbracht. Die Übertragbarkeit auf den realen Gebäudebestand muss daher in weiteren Schritten, etwa durch Feldtests oder Pilotprojekte mit Partnern aus der Wohnungswirtschaft und dem Contracting-Segment, geprüft und bestätigt werden. Dennoch bildet das Projekt SHANGO mit seinen Ergebnissen eine starke Basis, auf der zukünftige praxisorientierte Entwicklungen und Geschäftsmöglichkeiten aufbauen können.

9.5. Zusammenstellung der Ergebnisse und Erfassung von Verbesserungsvorschlägen

Zur nachhaltigen Sicherung der Projektergebnisse wurde ein Konzept für das interne Wissensmanagement erarbeitet. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Tools zur strukturierten Ablage und kollaborativen Bearbeitung geprüft. Ziel war es, eine Plattform bereitzustellen, die nicht nur die Dokumentation der Ergebnisse, sondern auch die Weiterentwicklung unterstützt. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass alle Partner jederzeit auf den aktuellen Stand zugreifen und frühere Entwicklungsstände nachvollziehen können.

Während der Projektlaufzeit wurden zahlreiche Verbesserungsvorschläge gesammelt, die sowohl aus internen Erfahrungen als auch aus externen Rückmeldungen des Expertengremiums stammen. Diese wurden sorgfältig dokumentiert und nach Themenfeldern (z. B. technische Umsetzung, Benutzerfreundlichkeit, algorithmische Weiterentwicklung) kategorisiert. Eine Verbesserung der False-Positive-Rate in den Fehlererkennungsalgorithmen ist notwendig. Außerdem wurde angemerkt, dass die Datenaufbereitung und die Visualisierung in einzelnen Bereichen optimiert werden sollte. Beispielsweise war dem Expertengremium die Darstellung im Dashboard noch nicht intuitiv genug. Auch Hinweise zur Integration zusätzlicher Datentypen und externer Datenquellen wurden aufgenommen, um die Plattform künftig noch flexibler und herstellerunabhängiger nutzen zu können.

Die finalen Ergebnisse, inklusive der experimentellen Erkenntnisse aus dem Labor, den entwickelten Algorithmen, der API-Integration sowie den Rückmeldungen zu Digitalem Zwilling und Dashboard, wurden in einem umfassenden Ergebniskatalog gebündelt. Dieser Katalog wird kontinuierlich gepflegt und fortgeschrieben, um zukünftige Ergänzungen und Weiterentwicklungen

abzubilden. Darüber hinaus wurde vereinbart, dass die Partner auch nach Projektende Zugriff auf diese zentrale Wissensbasis behalten, um Synergien für nachgelagerte Forschungs- und Entwicklungsprojekte zu schaffen. Damit soll sichergestellt werden, dass die im Projekt SHANGO entwickelten Grundlagen langfristig wirksam bleiben und kontinuierlich in Produkt- und Serviceinnovationen einfließen können.

10. Zusammenfassung der Ergebnisse

AP1 – Anforderungsanalyse

Mittels entsprechender Verfahren wurden Anlagen mit einer hohen Marktdurchdringung in den zentral- und nordeuropäischen Märkten selektiert, um die Arbeitsergebnisse auf eine möglichst hohe Anzahl von installierten Anlagen übertragen zu können. Wir kommen zu dem Schluss, dass unsere Ergebnisse grundsätzlich auf bis zu 60% der im Feld installierten Anlagen übertragen werden können (Luft-Wasser Wärmepumpen, Gas-Boiler sowie Hybrid-Technologie wurde untersucht).

In einem zweiten Schritt wurde ein Verfahren etabliert, um kritische Fehlerbilder in den Komponenten des Heizsystems über einen indikatorenbasierten Ansatz zu identifizieren und zu priorisieren. Insgesamt wurden zwölf Fehlerbilder identifiziert und in diesem Forschungsprojekt näher untersucht. Hierbei handelt es sich um die meistvorkommenden Fehler im Markt.

AP2 – Schnittstellenentwicklung

Die Schnittstellenimplementierung (Bosch HVAC System <> digitales Backend eines Partners) wurde mittels einer REST basierten API realisiert. Diese einfache und weitverbreitete Technologie zur Übertragung der Daten hilft dabei, die Implementierung auf der Partner-Seite ohne großen Aufwand auf andere Systeme zu übertragen.

Fehlerzustände der Anlage sowie Energieverbrauchsinformationen können über die REST-Schnittstelle von den Anlagen angefragt werden bzw. werden event-basiert gepusht. Im weiteren Verlauf des Projektes wurden zusätzliche Parameter ebenfalls auf der REST-Schnittstelle bereitgestellt wie bspw. Temperaturen oder Statusinformationen. Die Schnittstelle wurde ebenfalls so vorbereitet, dass Parameter nicht nur lesend, sondern auch schreibend verfügbar sind. Das bildet die Grundlage für aktive Eingriffe von außen über digitale Tools, z.B. zur Optimierung per Remote.

Die Implementierung der Schnittstelle auf Seiten GreenPocket (als Konsument / 3rd Party) verlief schnell und problemlos. Darüber hinaus bietet die gewählte Technologie eine hohe Stabilität, Sicherheit und Performance. Die Antwortzeiten (Aufruf bis zur vollständigen Darstellung) bewegten sich durchweg im Bereich von unter zwei Sekunden. Tests mit Nutzern haben gezeigt, dass das Ansprechverhalten durchweg als performant empfunden wurde und in den Kontext der GreenPocket Software passt.

AP3 – IT-Infrastruktur

Die Erweiterung der GreenPocket Software um ein flexibles Messdatenmodell mit variabler Auflösung und unterschiedlichen Sparten sowie eine flexibles Stammdatenmodell inkl. Hierarchien erlaubt es, die Verortung einzelner Komponenten naturgetreu darzustellen (digitaler Zwilling). Hierdurch kann jegliche Konstellation von Standorten, Gebäuden und Messtechnik naturgetreu nachgebaut werden. Die Demonstration des digitalen Zwillings trifft sowohl bei Bestandskunden als auch bei potentiellen Neukunden auf reges Interesse. Erste Kunden haben bereits signalisiert, einen digitalen Zwilling ihrer Liegenschaften realisieren zu wollen. Das neu eingeführte Dashboard-Template mit nutzerzentrierter Visualisierung von Fehler- und Verbrauchsdaten wurde von Nutzern als intuitiv verständlich und performant eingestuft. Die Antwortzeiten (Aufruf bis zur vollständigen Darstellung) bewegten sich durchweg im Bereich von unter zwei Sekunden.

AP4 – Laboruntersuchungen Fehlerinjektion

Um ein möglichst realitätsnahes Anlagenverhalten am Prüfstand zu erzielen, wurden Simulationsprofile für vier Standardtestszenarien erstellt. Hierdurch konnte alle zwölf Fehlerbilder experimentell im Labor injiziert und dokumentiert werden. Die Nachvollziehbarkeit der Fehlerwirkungen (z. B. veränderte Volumenströme, Temperaturabweichungen, Schaltverhalten) konnten im Test bestätigt werden. Basierend auf den erzielten Ergebnissen konnte ein umfangreiches und präzise dokumentiertes Fehler-Datenfundaments als Basis für die Analyse (AP5) erzeugt werden.

AP5 - Analysestrategien und Algorithmen zur Betriebsfehlererkennung

Es wurde ein Verfahren zur Datenmigration (Labordaten kombiniert mit Bosch-spezifischen Gerätedaten) erstellt und die Daten als Basis für die Analyse zentral zur Verfügung gestellt. Entsprechende Label bzgl. des Fehlerversuchs sowie Zustand der Anlage bzw. Gebäude und Außentemperatur-Profil wurden erzeugt und den Datensätzen zugeordnet.

Anschließend wurden verschiedene Verfahren zur Datenanalyse angewandt:

- Datenexploration auf Basis verschiedener Plots
- Statistische Verfahren zur Prüfung auf grundsätzliche Unterschiede zwischen den Zuständen
- Verfahren des maschinellen Lernens zur Clusterung und Trend-/Fehler-Detektion

Grundsätzlich konnte ein Einfluss der Fehlerzustände auf die Effizienz einer Anlage nachgewiesen werden. Die Stärke der Einflüsse der Fehlerzustände auf die Effizienz einer Heizungsanlage sind allerdings nur bedingt quantifizierbar. Dies kann unterschiedliche Gründe haben. So hat ein verschmutzen Filter erst ab einem sehr hohen Verschmutzungsgrad einen Einfluss auf das System. Bei einem Plattenwärmetauschers muss der Verschmutzungsgrad min. 75% betragen, um erkannt zu werden. Darüber hinaus können Fehler durch zu geringer Last übersehen werden. Die erzielten Ergebnisse ermöglichen noch keinen direkten Transfer in die Praxis, bilden aber eine solide Grundlage zur Weiterarbeit und Entwicklung digitaler Mehrwertdienste im Kontext Remote Diagnose und Preventive Maintenance.

AP 6 - Lastverschiebungspotenzial / Smart Grid-Strategien

Es wurde ein Simulationsmodell zur Untersuchung der Einflussfaktoren im Energiemanagement eines Hauses hinsichtlich der Lastverschiebung erzeugt. Dabei wurde Variationen für folgende Parameter analysiert:

- Pufferspeichergröße
- Solltemperatur
- Lastverschiebungsdauer

Die Größe des Pufferspeichers wurde zwischen 800 und 1300l variiert. Es hat sich gezeigt, dass ein zu kleiner Pufferspeicher einen unstabilen Betrieb begünstigt, wobei sich die Regelungsparameter stärker zeitlich ändern. Entsprechend zeigen sich bei größeren Speichergrößen geringere Schwankungen und ein optimales Energieverbrauchsverhalten, das sich auch im Coefficient of Performance (COP) widerspiegelt.

Die Stabilität der Raumtemperatur, trotz der unterschiedlichen Sollwerte, belegt, dass das System in der Lage ist, den gewünschten Komfort zu gewährleisten. Gleichzeitig ermöglicht der lineare

Energieverbrauch eine direkte Kalkulation der Kosteneinsparungen durch Lastverschiebung, ohne dass es zu abrupten Temperaturschwankungen kommt.

Eine zu lange Lastverschiebung führt zu einem signifikanten Abfall des COP, da die Wärmepumpe gezwungen wird, außerhalb des optimalen Betriebsfensters (bei kälteren Nachtemperaturen) zu arbeiten. Dies resultiert in einem leicht ineffizienteren Betrieb, wobei die Raumtemperatur dennoch im akzeptablen Rahmen gehalten wird.

Die Analysen deuten darauf hin, dass ein Kompromiss zwischen der Länge der Abschaltung und der Systemeffizienz gefunden werden muss, um einerseits kostensparende Maßnahmen zu realisieren und andererseits die Betriebseffizienz der Wärmepumpe nicht zu gefährden. Die umfassende Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt, dass eine externe Lastverschiebung keine wesentlichen Auswirkungen auf den Komfort bzw. die Wärmeversorgung des Gebäudes hat. Bei einer kurzfristigen Lastverschiebung von bis zu 2h kann das WP-Puffer-System die Wärmeversorgung aufrechterhalten. Längere Unterbrechungszeiten sind abhängig von Gebäudealter und Wärmebedarf jedoch zunehmend problematisch.

AP7 – Feldtest

Aufgrund der allgemeinen Verzögerung wurde kein Feldtest durchgeführt. Bosch TT prüft die erzielten Ergebnisse und Verfahren, um im Nachgang an das Projekt einen Transfer in die Praxis sicher zu stellen.

AP8 – Validierung

Es wurde gezeigt, dass durch die Integration moderner Schnittstellen, den Einsatz eines Digitalen Zwillings und die Entwicklung eines nutzerzentrierten Dashboards eine durchgängige, datengetriebene Optimierung von Heizsystemen möglich ist. Die im Labor erfolgreich durchgeführte Fehlererkennung und die damit verbundene Datenanalyse haben eine belastbare Grundlage für die automatisierte Erkennung von Betriebsfehlern geschaffen. Gleichzeitig konnte demonstriert werden, dass Lastverschiebungsstrategien mit Wärmepumpen unter Beibehaltung des Nutzerkomforts realisierbar sind und damit einen wichtigen Beitrag zur Flexibilisierung im Energiemarkt leisten können. Die finale Übertragbarkeit der entwickelten Methoden in den Feldbetrieb muss noch durch weitere Tests bestätigt werden. Die hohe Flexibilität und Modularität der entwickelten Softwarearchitektur eröffnet zudem vielversprechende Perspektiven für neue Geschäftsfelder und die Skalierung auf andere Gebäudetypen und Anlagentechnologien.

Anhang

10.1. A1 Literatur

Bettgenhäuser, K., von Manteuffel, B., Offermann Guidehouse Germany GmbH, M., Benjamin Köh-ler, B., Bürger, V., Braungardt, S., Klinski, S., Stefan Klinski, jur, & Herausgeber, B. (2024). Wärmepumpensysteme in Bestandsgebäuden.

Huang, Chenzi, Stephan Seidel, and Jan Bräunig. “Cascaded Reinforcement Learning Based Supply Temperature Control,” December 1, 2023. **https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/7/072010**.

Huang, Chenzi, Stephan Seidel, Hervé Pruvost, and Jan Bräunig. “Ein Reinforcement-Learning-Ansatz für die Optimierung von Heizkurven,” April 12, 2023. **https://doi.org/10.17560/atp.v65i4.2648**.

Huang, Chenzi, Stephan Seidel, Xuehua Jia, Fabian Paschke, and Jan Bräunig. “Energy Optimal Control of a Multivalent Building Energy System Using Machine Learning,” 2021. **https://doi.org/10.24406/publica-r-411085**.

Huang, Chenzi, and Elisabeth Eckstädt. “Comparison of Different Coupling Variants for Building and HVAC Simulation,” December 1, 2023. **https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/7/072005**.

LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden LowEx-Bestand Analyse. (2023). **www.lowex-bestand.de**

Neubert, D., Glück, C., Schnitzius, J., Marko, A., Wapler, J., Bongs, C., & Felsmann, C. (2022). Analy-sis of the Operation Characteristics of a Hybrid Heat Pump in an Existing Multifamily House Based on Field Test Data and Simulation. Energies, 15(15). **https://doi.org/10.3390/en15155611**

Schneider, André, Elisabeth Eckstädt, Chenzi Huang, Kristin Majetta, Claudia Liersch, Danny Borchert, Anne Paepcke, et al. “FMI4BIM - Standardisierte Schnittstelle für Analysemodelle von Anlagen- und Gebäudekomponenten für BIM-basierte Planung und Betrieb.” Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, March 31, 2023. **https://doi.org/10.24406/publica-1997**.

Seifert, H.-J. (2024). Effizienter Betrieb von Wärmepumpenanlagen. **www.vde-verlag.de/buecher/das-gebaeude/**

10.2. A2 Liste der im Projekt hervorgegangenen Publikationen

Arora, S.-J., F. Weiss, Jan Bräunig, S. Erkel, M. Mensing, and Andreas Wilde. “Smarte HeizungsANlaGenOptimierung - ögP SHANGO,” April 26, 2023. **https://doi.org/10.51202/9783181024096-25**.

Jakob, Daniel, Konstantin Wrede, Florian Weiss, and Jan Bräunig. “A Hardware-in-the-Loop System for Monitoring Building Energy Consumption with Sparse Sensors.” Automation, Robotics & Communications for Industry 4.0/5.0, 005 February 2025, 190–93. **https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.13085.63208**.

10.3. A3 Anschriften der Projektpartner

Bezeichnung	**Ansprechpartner**	**Anschrift**
GreenPocket	**Dr. Thomas Goette** Tel.: +49 221 355095-80 ***thomas.goette@greenpocket.de***	GreenPocket GmbH Labor 3.09 I Schanzenstr. 6-20 51063 Köln
Fraunhofer IIS/EAS	**Dr.-Ing. Jan Bräunig** Tel.: +49 351 45691-153 ***Jan.Braeunig@iis.fraunhofer.de***	Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS Institutsteil Entwicklung Adaptiver Systeme Münchner Str. 16 01187 Dresden
BOSCH TT	**Steffen Erkel** Tel.: +49 173 9220259 ***steffen.erkel@de.bosch.com***	Bosch TT Postfach 13 09 73243 Wernau

Abbildungen

Abbildung 1: Arbeitspakete des Projektes "SHANGO" 9

Abbildung 2: Gannt Chart zur Abweichung im Projektzeitplan 11

Abbildung 3: Indikatoren basierte Auswahl kritischer Fehlerbilder 14

Abbildung 4: Eisenhower-Matrix zur Kategorisierung der Fehlerbilder für die ausgewählte Sole-Wärmepumpe 15

Abbildung 5: Ablauf der Ereignisse im Kontext der Bosch Partner-API 18

Abbildung 6: Schematische Darstellung der Benutzer- und Systemidentifikation 19

Abbildung 7: Schematische Darstellung der Anforderung von Daten 19

Abbildung 8: Schematische Darstellung der Ereignisbenachrichtigungen via Webhook 19

Abbildung 9: Schematische Darstellung des ferngesteuerten Auslösens von Funktionen des HVAC-Systems 20

Abbildung 10: Darstellung von Fehlermeldungen in der Benutzeroberfläche der GreenPocket-Software 22

Abbildung 11: Verbräuche in kWh für einen definierten Zeitraum 23

Abbildung 12: Dashboard zur Darstellung des unternehmensinternen Vergleichs in GreenPocket-Software 26

Abbildung 13: Häufigkeit im deutschen Wohngebäudebestand (Bildquelle: TABULA) 27

Abbildung 14: Hydraulischer Aufbau der Hybridheizungsanlage mit eingezeichneten Positionen des Messequipments der Wärmemengenzähler (Bildquelle: Buderus Hydraulikdatenbank) 29

Abbildung 15: Hydraulischer Aufbau der Hybridheizungsanlage mit eingezeichneten Positionen des Messequipments der Wärmemengenzähler (Bildquelle: Buderus Hydraulikdatenbank) 29

Abbildung 16: Schematische Darstellung des Versuchsstands 32

Abbildung 17: Stark vereinfachte simulative Abbildung des gesamten Systems 33

Abbildung 18: Dichtebasierte Clustering-Verfahren dbscan 35

Abbildung 19: Ein digitaler Zwilling des Laboraufbaus 39

Abbildung 20: Ansicht des Townhouse-Simulationsmodells 40

Abbildung 21: Ansicht des Simulationsmodells im Simulationstool Dymola 41

Abbildung 22: Integration des Simulationsmodells als FMU 41

Tabellen

Tabelle 1: Benutzte Produkte und Komponenten und Zuordnung zum System-Cluster 13

Abkürzungsverzeichnis

APC	Advanced Process Control
API	Application Programming Interface
BHKW	Blockheizkraftwerk
BIM	Building Information Modelling
COP	Coefficient of Performance
DAQ	Data Acquisition
DHW	Domestic Hot Water
DWD	Deutscher Wetterdienst
EFH	Einfamilienhaus
EM	Energiemanagement
EMS	Energie Management System
ES	Energiesystem
FE	Feldtest
FMI	Functional Mockup Interface
FMPy	Functional Mock-up Python
FMU	Functional Mock-up Unit
GA	Gebäude-Automation
GDPR	General Data Protection Regulation
GUI	Graphical User Interface
HIL	Hardware in the Loop
HMI	Human Machine Interface
HVAC	Heating, Ventilation, Air-conditioning, Cooling
KI	Künstliche Intelligenz
MVP	Minimal viable product
ODU	Outdoor Unit
QM	Qualitätsmanagement
REST	Representational State Transfer
RH	Residential Heating
RL	Rücklauf
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TRL	Technology readiness level
VL	Vorlauf
WMZ	Wärmemengenzähler