

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

31/07/2022

DigitalEnergyTestbed

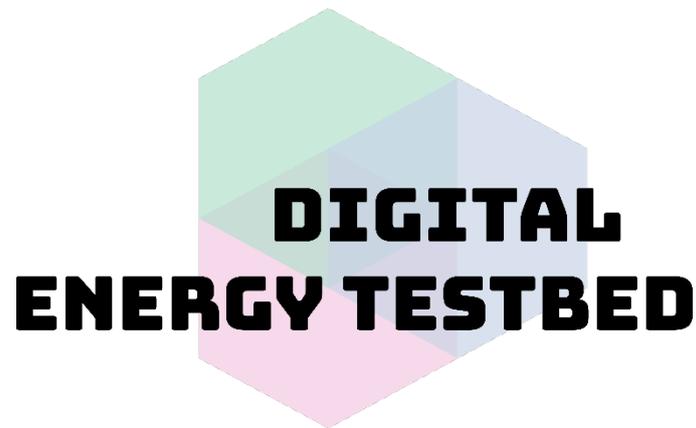
offene Testumgebung zur Evaluierung von
Digitalisierungslösungen für integrierte
Strom-Wärmenetze

Projektnummer: 881132

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

Ausschreibung	6. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/11/2020
Projektende	30/04/2022
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	18 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	AIT Austrian Institute of Technology GmbH
AnsprechpartnerIn	Ralf-Roman Schmidt
Postadresse	Giefinggasse 6 1210 Wien
Telefon	+43 664 2351901
Fax	+43 50550-6390
E-mail	ralf-roman.schmidt@ait.ac.at
Website	www.ait.ac.at



Offene Testumgebung zur Evaluierung von Digitalisierungslösungen für integrierte Strom- Wärmenetze

AutorInnen:

Ralf-Roman Schmidt

Edmund Widl

Andreas Sporr

Aurelien Bres

Thomas Natiesta

Nicolas Marx

Catalin Gavriluta

Jawad Kazmi

Martin Mairhofer

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	6
2.1	Ausgangslage	6
2.2	Problemstellung	8
2.3	Aufgabenstellung	8
2.4	Schwerpunkte des Projektes	10
2.5	Einordnung in das Programm	10
2.6	Verwendete Methoden	11
2.7	Aufbau der Arbeit	12
3	Review bestehender Lösungen	13
3.1	Digitalisierungslösungen für Strom-Wärme-Anwendungen	13
3.1.1	Optimierung des Gesamtsystems	13
3.1.2	Herstellung von Datenaustausch und Kommunikation	14
3.1.3	Durchführung von demand side management im Gebäude	15
3.2	Testumgebungen für Digitalisierungslösungen im integrierten Energiesystem	15
3.3	Middleware zur Realisierung von HIL/ CIL und Co-Simulation Ansätzen	18
4	Das Grundkonzept des DigitalEnergyTestbed	20
4.1	Die LabLink Middleware	21
4.2	Mögliche use cases für das DigitalEnergyTestbed	24
4.2.1	Hardware-in-the-loop	24
4.2.2	Controller-in-the-loop	25
4.2.3	Systemebene	27
4.3	Ausgewählte use cases	28
5	Use case 1: Hardware-in-the-loop für Fernwärme-Übergabestationen	29
5.1	Einführung	29
5.1.1	Laborprüfstand für Fernwärmeübergabestationen	30
5.1.2	Gebäudemodell	34

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

5.1.3	Schnittstelle für die Kopplung	35
5.2	Implementierung im DigitalEnergyTestbed	36
5.3	Ergebnisse	37
6	Use case 2: Untersuchung der koordinierten Spannungsregelung für gekoppelte thermisch-elektrische Verteilungssysteme mit Power-to-Heat-Anlagen	41
6.1	Einführung.....	41
6.1.1	Regelungskonzept	42
6.2	Implementierung im DigitalEnergyTestbed	43
6.2.1	Elektrisches Verteilnetz	43
6.2.2	Fernwärmenetz und Power-to-Heat-Anlage	43
6.3	Ergebnisse	44
7	Use case 3: Testen der Regelung einer Fernwärmeübergabestation mit Booster-Wärmepumpe mittels Controller-Hardware-in-the-loop-Simulation	46
7.1	Einführung.....	46
7.2	Implementierung im DigitalEnergyTestbed	46
7.2.1	Fernwärmenetz	47
7.2.2	Booster-Wärmepumpe und Gebäude.....	47
7.2.3	Digitaler Zwilling	47
7.3	Ergebnisse	48
8	Review des DigitalEnergyTestbed	51
8.1	Experteninterviews.....	51
8.2	Internationaler Stakeholder-Workshop	53
9	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	55
10	Ausblick und Empfehlungen.....	56
10.1	Verwertung und Folgeprojekte.....	57
11	Literaturverzeichnis.....	58
12	Kontaktdaten.....	63

2 Einleitung

2.1 Ausgangslage

Die Klima- und Energiestrategie¹ und das Regierungsprogramm Österreichs² identifiziert Sektorkopplung als ein wesentliches Schlüsselkonzept zur Dekarbonisierung des Energiesystems bei gleichzeitiger Stabilität und Versorgungssicherheit. Ein wichtiger Aspekt der Sektorkopplung regionaler Energiesysteme ist der integrierte Betrieb von Strom-, Wärme- und Kältenetzen³. Ziel dabei ist die Schaffung und Erschließung neuer Synergien in Erzeugung, Speicherung und Verbrauch von Energie. Die erforderlichen Technologien sind auf Komponentenebene schon weit fortgeschritten, jedoch stellen sich vielfältige Probleme bei der Systemintegration. Dies gilt speziell im Zusammenspiel mit Digitalisierungslösungen, die eine konsistente Integration von Automatisierungs- und Regelungslösungen sowie Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) erfordern. Der großflächige Einsatz von dezentraler Erzeugung und dem damit einhergehenden Roll-Out von Informations- und Kommunikationstechnologien im Elektrizitätssektor hat in den letzten Jahren eine Vielzahl neuer Anwendungen erschlossen.

Die notwendige Dekarbonisierung des Wärmesektors in Österreich und Europa führt zu einem Paradigmenwechsel, die bei Wärmenetzen eine ähnlich drastische Veränderung der Erzeugungsstruktur bedingen wird. Die traditionelle Wärmeversorgung durch zentrale Wärmeerzeugung, unidirektionale Wärmelieferung und Nutzung hoher Vorlauftemperaturen begrenzt die Integration dezentraler Niedertemperatur-(Ab-)Wärmequellen (Rechenzentren, Umgebungswärme, Supermärkte, Kühlung von Büros, etc.)⁴. Dies inkludiert dezidiert auch bislang ungenutzte Abwärme aus industriellen und gewerblichen Prozessen⁵. In diesem Zusammenhang spielen Wärmepumpen eine Schlüsselrolle, die damit eine Kopplung des Wärme- und des Stromsektors herstellen, somit also „hybrides“ Energiesystem bilden⁶.

Hybride bzw. gekoppelte thermisch-elektrische Energiesysteme und -netze haben das Potenzial, die Effizienz, Systemstabilität und Versorgungssicherheit des gesamten Energiesystems zu steigern. Ihr Einsatz kann die Flexibilität des Systems auf verschiedenen Zeitskalen erhöhen und ermöglicht es so, zeitliche Ungleichgewichte schwankender erneuerbarer Energien besser zu verwalten und abzumildern, an unterschiedlichen Energiemärkten zu agieren, Netzverluste und Netzbeschränkungen zu verringern sowie Kosten zu senken um so den Bedarf an Investitionen in alternative Speicher zu verringern (Schmidt & Leitner, 2021).

¹ <https://mission2030.info/>

² <https://www.bundestkanzleramt.gv.at/bundestkanzleramt/die-bundesregierung/regierungsdokumente.html>

³ <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/e2050/publikationen/schriftenreihe-2020-22-umsetzungsplan-eforschungsinitiative.php>

⁴ IEA DHC Annex TS2: <https://www.iea-dhc.org/the-research/annexes/2017-2021-annex-ts2>

⁵ IEA DHC Annex TS7

⁶ IEA DHC Annex TS3 <https://www.iea-dhc.org/the-research/annexes/2017-2021-annex-ts3>

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

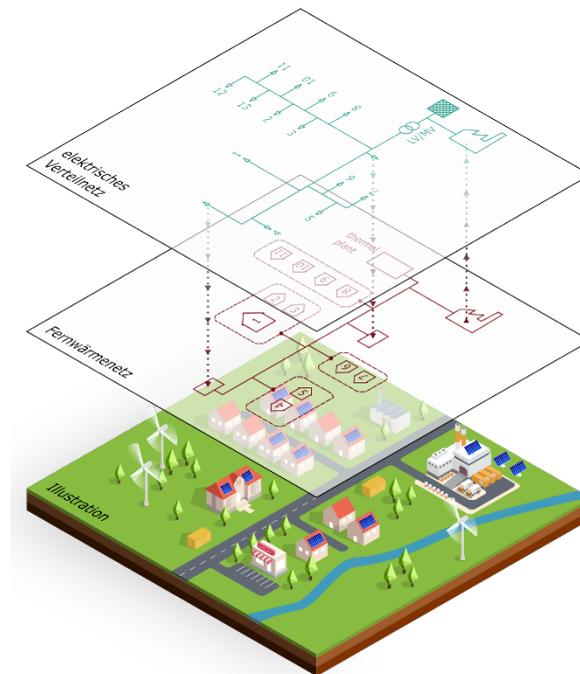


Abbildung 2-1: Illustration von gekoppelten Strom- und Wärmenetzen (Benedikt Leitner, 2020)

Gerade bei der Transformation zu niedrigen Fernwärmenetztemperaturen um zusätzliche Abwärme- und Anergiequellen zu integrieren wird der Nutzen von gekoppelten Strom-Wärmenetzen augenscheinlich, wo beispielsweise Wärmepumpen für die notwendige dezentralen Erhöhung der Warmwassertemperatur bei gleichzeitiger Nutzung lokaler Photovoltaik-Erzeugung genützt werden können.

Eine zunehmende Systemintegration führt jedoch zu einer höheren Komplexität bei Planung und Betrieb des Gesamtsystems, da die Anzahl der Optimierungsparameter und Akteuren steigt und gleichzeitig Abhängigkeit unter den Teilsystemen erzeugt werden. Bislang bestehende Digitalisierungslösungen für integrierte Strom-Wärme-Systeme sind jedoch oftmals komplex und werden im Regelfall spezifisch für konkrete (Demo-)Projekte konfiguriert bzw. für spezifische Anforderungen entwickelt (siehe Abschnitt 3.1). Zur Weiterentwicklung, Charakterisierung und Validierung der Einsetzbarkeit dieser Digitalisierungslösungen unter heterogenen Systemkonfigurationen (Netztopologie, Versorgungs- und Verbraucherstruktur etc.) und zur Optimierung der Betriebs- und Regelungsstrategien ist eine geeignete Testumgebung erforderlich. Darüber hinaus würden damit ein einheitliches und systematisches Testen und die Vergleichbarkeit dieser Lösungen für definierte oder standardisierte Testfälle (inklusive off-design Betrieb von Komponenten) ermöglicht. Die Realisierung von Laborprüfständen und Testumgebungen für thermisch-elektrische Hybridsysteme/-netze in denen die Auswirkung von Digitalisierungslösungen auf das System evaluiert werden können ist ein aktuell beginnender internationaler Trend (siehe Abschnitt 3.2). Die Verwendung offener Standards, Plattformen und open-source Software, Bereitstellung offener Schnittstellen nach außen und remote Zugriff (vgl. Virtual Lab), Verfügbarkeit detaillierter Beschreibungen der Laborinfrastruktur, relevanter Anwendungsfälle und Prozesse sowie die digitale Kopplung unterschiedlicher, geografisch und institutionell getrennter

Laborinfrastruktur kann dabei die Verwendbarkeit und den Nutzen solcher Testumgebung signifikant steigern.

2.2 Problemstellung

Die Durchführung von Tests, Evaluierungen und (Weiter-)Entwicklung von Komponenten – sowohl Soft- als auch Hardware – für die Regelung komplexer bzw. integrierter Strom- und Wärmenetze erfordert momentan die Umsetzung von Pilot- und Demoprojekten. Der damit verbundene erhebliche Zeit- und Kostenaufwand verhindert eine rasche Markteinführung. Darüber hinaus ist die Übertragbarkeit und Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus unterschiedlichen Demoprojekten auf Grund der stark variierenden regionalen Gegebenheiten und Anforderungen (bestehende Netztopologien und Gebäude, Verfügbarkeit von Energiequellen, Last- und Erzeugungsprofile, etc.) sowie durch Projektspezifika (Nutzerstrukturen, Energiespeicher, Erzeugungstechnologie, Systemcharakteristika, Temperaturniveaus etc.) stark eingeschränkt. Ein direkter Vergleich verschiedener Digitalisierungslösungen und Komponenten wird dadurch praktisch unmöglich, aber auch das Testen neuer Produkte unter variierenden Systemeinflüssen und off-design Situationen wird erschwert.

Die Durchführung standardisierter und holistischer Tests für domänenübergreifende Anwendungen ist aber auch in aktuell verfügbarer Laborinfrastruktur nicht oder eingeschränkt möglich (siehe Abschnitt 3.2). Die überwiegende Mehrheit der verfügbaren Labors und Teststände in Österreich und Europa fokussiert traditionell auf domänenspezifische Anwendungen. Zwar gibt es international erste Bestrebungen und Arbeiten zur Schaffung von Labors die dezidiert integrierte Energiesystem/-netze abbilden sollen, jedoch ist die Errichtung neuer Laborinfrastruktur mit einem erheblichen Zeit- und Kostenaufwand verbunden, zudem sind die geschaffenen Lösungen im Regelfall proprietär. Die digitale sowie physikalische Kopplung und Integration bestehender Laborinfrastruktur und Testständen in Kombination mit dem gezielten Einsatz von Simulationsmodellen könnte dabei eine wesentlich effizientere und damit kostengünstigere Alternative darstellen. Dies vor allem dann, wenn die Einbindung relevanter Stakeholder durch offene Strukturen (Softwarestandards, Zugang, Beschreibungen, klare Kosten-Nutzen-Strukturen, definierte Prozesse, usw.) unterstützt wird.

2.3 Aufgabenstellung

Aufgabenstellung in dem gegenständlichen Projekt DigitalEnergyTestbed war die **Sondierung der konkreten Herausforderungen, Möglichkeiten und Voraussetzungen für die Integration unterschiedlicher Software- und Hardware-Komponenten zu einer offenen und domänenübergreifenden Testumgebung für die Evaluierung von Digitalisierungslösungen für Anwendungen in integrierten Strom-Wärmenetze.**

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Im Vergleich zu Demonstrationsvorhaben ermöglicht eine derartige Testumgebung die Kombination aus Hardware-in-the-Loop (HIL), Controller-in-the-Loop (CIL) und Simulation und bietet damit eine hohe Flexibilität bei der realitätsnahen Abbildung verschiedenster Szenarien in integrierten Strom- und Wärmenetzen mit diversen Verbrauchs- und Erzeugungskomponenten, Netztopologien sowie durch unterschiedliche Regelungssysteme und Digitalisierungslösungen. Die Möglichkeit intelligente thermisch-elektrische Anwendungen in einer offenen Testumgebung mit CIL, HIL und Simulations-Methoden zu evaluieren kann wesentlich dazu beitragen diese Unsicherheiten zu limitieren. Insbesondere wenn eine solche Testumgebung den Betrieb einer Übergabestation, einer Wärmepumpe, den Einfluss auf elektrische und thermische Netze und Gebäude sowie die Interaktionen mit unterschiedlichsten Digitalisierungslösungen (von Modelprädiktiver Regelung bis Datenaustausch mit IoT Plattformen) unter realistischen Bedingungen abbilden kann. Dies ermöglicht die holistische Validierung und Entwicklung neuer Produkte für diese komplexen cyber-physikalischen Systeme unter realistischen dynamischen Betriebszuständen (transiente Temperaturänderungen oder Spannungsschwankungen).

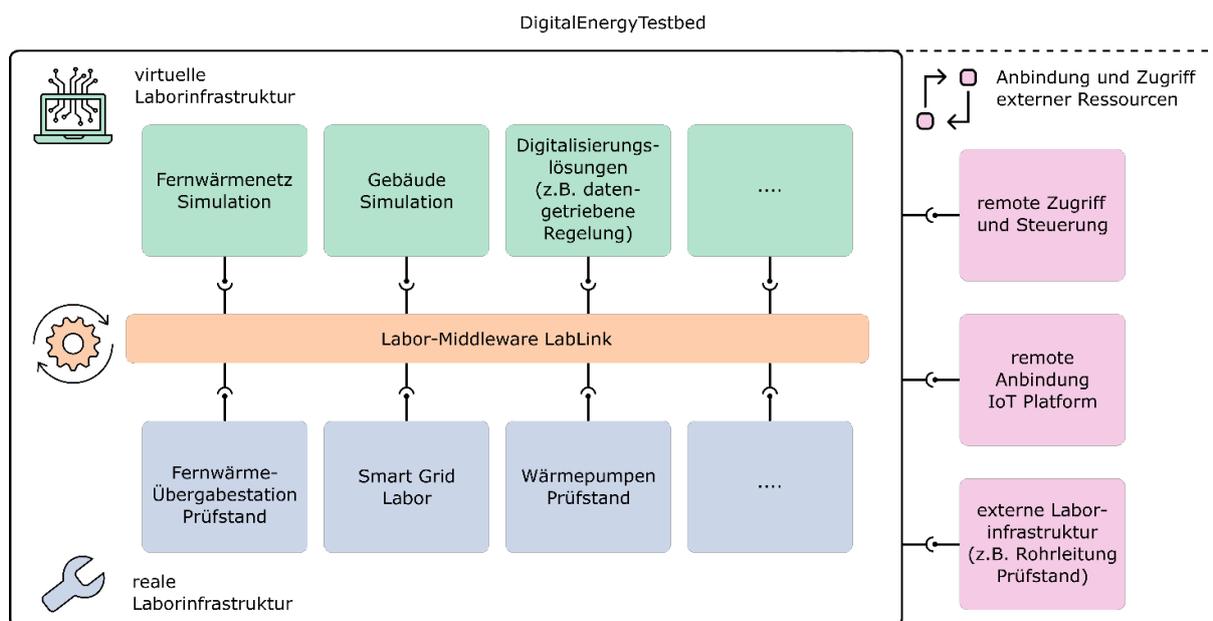


Abbildung 2-2: Gesamtkonzept der offenen Testumgebung

Exkurs: Bestehende Testumgebungen am AIT: Das AIT verfügt insgesamt über eine gut ausgebaute Laborinfrastruktur, auf deren Basis eine flexible, integrierte Testumgebung für netzgebundene Sektorkopplung und Digitalisierungslösungen für Strom-Wärme-Anwendungen aufgebaut werden kann. Dierses betrifft insbesondere den Prüfstand für Fernwärmeübergabestation, der als ein Schlüsselement in den Prototypen des DigitalEnergyTestbed integriert wird, siehe Abschnitt 5.1.1; Weiters sind noch das Wärmepumpenlabor⁷ sowie das Smart-Grid-Labor (SmartEST⁸) zu nennen. In Hinblick auf aktuelle Entwicklungen im Bereich Fernzugriff (Virtual Access) sowie der Kopplung von

⁷ <https://www.ait.ac.at/loesungen/heat-pump-technologies/laboratories>

⁸ <https://www.ait.ac.at/index.php?id=5523>

verteilter Laborinfrastruktur, ist dieses Vorhaben damit ein weiterer wichtiger Puzzle-Stein in der europäischen Forschungslandschaft. Die Herausforderung dabei besteht darin, dass eine derartige Testumgebung hinreichend offen ist hinsichtlich der Nutzung durch externe Partner (sowohl aus der Industrie als auch der Forschung). Dafür maßgeblich sind offene Standards (z.B. Open Source Software), offene Schnittstellen (z.B. für Virtual Access) als auch die Verfügbarkeit von relevanter Information (Open Access, Open Data).

2.4 Schwerpunkte des Projektes

- 1) **Die gekoppelte Betrachtung von unterschiedlichen Wärme- und Stromsystemen in einer gemeinsamen Testumgebung.** Bislang konzentrieren sich bisherige Laborumgebungen im Wesentlichen auf Einzeldomänen. Diese gleichzeitige Betrachtung ermöglicht die Analyse und Optimierung von innovativen Lösungen wie z.B. der Integration von Übergabestation mit Booster-Wärmepumpen oder Sektorübergreifender Regelungstechnik bzw. IoT Plattformen und Gesamtkonzepten (hardware- und/ oder controller-in-the-loop).
- 2) **Die digitale Einbindung von Hard- und Softwarekomponenten mit einer hohen Interoperabilität.** Das Projekt DigitalEnergyTestbed vereint in einzigartiger Weise physikalische Laborinfrastruktur mit unterschiedlichen Simulationsmodellen von Energieinfrastrukturen, Speichern und Gebäuden über fortschrittliche Digitalisierungslösungen, die über FMU-Schnittstellen eine hohe Interoperabilität auch mit externen Lösungen erlaubt.
- 3) **Die offene Entwicklung und angestrebte „Öffnung“ der Testumgebung:** Während bestehende Lösungen im Regelfall einen proprietären Charakter haben und oftmals rein kommerziell ausgerichtet sind, verfolgt das Projekt DigitalEnergyTestbed eine „offene“ Philosophie, die sich über folgende Punkte äußert:
 - a. Die Nutzung und Weiterentwicklung offener Software und Veröffentlichung der im Projekt entwickelten Digitalisierungslösungen als open-source code
 - b. Die Öffnung der Testumgebung zur Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Partnern zu einem virtuellen Labor sowie die Ermöglichung der (digitalen) Integration externer Softwareanwendungen und Laborinfrastrukturen

2.5 Einordnung in das Programm

Das Projekt DigitalEnergyTestbed adressiert die folgenden Programmziele⁹ in absteigender Priorität:

⁹ <https://www.ffg.at/6-Ausschreibung-Energieforschung>

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

- Ziel 2: Österreichs Technologieführerschaft schafft Zugang zu internationalen Märkten
- Ziel 1: Grand Challenges: Energieforschung im Zentrum großer gesellschaftlicher Herausforderungen
- Ziel 3: Energieforschung und Innovation als Beschäftigungsmotor für den Standort Österreich

Dabei werden in absteigender Priorität die folgenden Ziele der Ausschreibung adressiert:

- primär den Ausschreibungsschwerpunkt 2: „*Digitalisierung integrierter regionaler Energiesysteme*“, mit dem Fokus auf Zuverlässigkeit und Effizienzsteigerungen mit weiter zunehmender Digitalisierung und Automatisierung im Betrieb von Energienetzen.
- Weiters adressiert der Ausschreibungsschwerpunkt 3: „*Digitalisierung industrieller Energiesysteme*“ mit dem Fokus auf Einbindung ins Energiesystem im Bereich Wärmenetze und industrielle Abwärmenutzung sowohl für Wärmebereitstellung wie auch Kühlung und Speicherung.

2.6 Verwendete Methoden

Methodisch folgt das Projekt DigitalEnergyTestbed folgenden Schwerpunkten

1. Literatur- und Projektrecherche: Hierbei liegt der Schwerpunkt auf einem Review bestehender Lösungen im Bereich Digitalisierungsplattformen und Teststände und der Analyse der Anforderungen an die Testumgebung bzw. Anwendungsfällen aus der Literatur und Praxis.
2. Interaktion mit ausgewählten Stakeholdern: Projektbegleitend wurden relevante Stakeholder aus dem Bereichen Wärmenetze, Herstellern von Digitalisierungslösungen und anderen Forschungslaboren einbezogen, um die wesentlichen Anwendungsfälle sowie Schnittstellen zu bestehenden Lösungen zu diskutieren, Dieses inkludiert die Durchführung von Experteninterviews sowie eines internationalen Stakeholder-Workshops.
3. Laborarbeit: Dieses betrifft einerseits die Kommissionierung des Fernwärmepfprüfstandes bzgl. der Kommunikation und Integration mit dem DigitalEnergyTestbed sowie der Optimierung des Betriebsverhaltens und die Durchführung von konkreten Messungen für die Umsetzung eines use cases.
4. Programmier- und Simulationsarbeit bzgl. der Anpassung und Anwendung der Labor-Middleware LabLink und der (Co-)Simulation und Modellierung virtueller Komponenten wie Gebäude und Fernwärmenetz.

2.7 Aufbau der Arbeit

Der gegenständliche Bericht ist wie folgt aufgebaut.

- In Abschnitt 4 wird ein Review bestehender Lösungen im Bereich Digitalisierungslösungen für Strom-Wärme-Anwendungen sowie Testumgebungen für Digitalisierungslösungen im integrierten Energiesystem und Middleware zur Realisierung von HIL/ CIL und Co-Simulation Ansätzen durchgeführt.
- Abschnitt 5 führt in das Grundkonzept des DigitalEnergyTestbed ein, mit einem Fokus auf der LabLink Middleware und einer Analyse möglicher use cases für das DigitalEnergyTestbed
- In Abschnitt 6 wird der use case 1 dargestellt, der wichtige Kernelemente DigitalEnergyTestbeds (einen Laborprüfstand für Fernwärmeübergabestationen sowie ein Gebäudemodell) inkludiert.
- In den Abschnitten 7 und 8 wird die Implementierung zwei weiterer use cases im DigitalEnergyTestbed dargestellt und es werden die Ergebnisse dargestellt.
- Im Abschnitt 10 werden Informationen aus dem begleitenden Stakeholderprozess beschrieben und Ergebnisse zusammengefasst.
- Die Abschnitte 11 und 12 fassen die Ergebnisse und Schlussfolgerungen sowie Ausblick und Empfehlungen zusammen.

3 Review bestehender Lösungen

Moderne Automatisierungs- und Steuerungslösungen auf Basis digitaler Prozesse sind Schlüsseltechnologien für diesen Paradigmenwechsel, der traditionelle thermische Energiesysteme im Wesentlichen in integrierte Energiesysteme umwandelt. Dafür stehen bisher allerdings nur wenige Plattformen zur Verfügung (siehe Abschnitt 3.1). Außerdem sind bestehende Lösungen meist komplex, speziell für konkrete (Demo-)Projekte konfiguriert oder für spezielle Anforderungen entwickelt. Daher werden Testumgebungen zur Weiterentwicklung, Charakterisierung und Validierung ihrer Einsetzbarkeit unter heterogenen Randbedingungen (Netztopologie, Versorgungs- und Verbraucherstruktur etc.) und zur Optimierung von Betriebs- und Regelungsstrategien benötigt. In den folgenden Abschnitten wird der aktuelle Stand der Technik hinsichtlich der dafür notwendigen Laborinfrastruktur (siehe Abschnitt 3.2) und Middleware (siehe Abschnitt 3.3) beleuchtet.

3.1 Digitalisierungslösungen für Strom-Wärme-Anwendungen

Bislang beschränken sich Digitalisierungslösungen im Wärmebereich bei *Planungsvorgängen* auf einfache Netzberechnungen mit Hilfe von GIS basierten Berechnungsprogrammen für eine statische Auslegung auf den Volllastfall. Der *Betrieb* von Wärmenetzen konnte in traditionellen und unidirektionalen (Hochtemperatur-)Wärmenetzen die Massenströme über den Netzschlechtepunkt geregelt werden und erforderte somit keine weitreichende Digitalisierung.

Die Dekarbonisierung des Wärmesystems und damit der Übergang zu vollständig im Energiesystem integrierten Wärmenetzen mit dezentralen Strukturen, niedrigeren Temperaturen und höheren Anteilen nicht kontrollierbarer Wärmequellen erfordert neben einer dynamischen Betrachtungsweise die weitgehende Einbeziehung von Prosumern und die Berücksichtigung bidirektionaler Strukturen, wofür eine umfassende Digitalisierung wesentlich ist. Hierfür existieren bislang nur wenige Plattformen. Im Folgenden wird kurz auf einige ausgewählte Systeme basierend auf Internetrecherchen sowie Ergebnissen aus Experteninterviews (siehe Abschnitt 8) eingegangen:

3.1.1 Optimierung des Gesamtsystems

E.ON ectocloud¹⁰: Die E.ON ectocloud integriert und kombiniert Komponenten im E.ON ectogrid (ab hier Ectogrid genannt) auf unterschiedliche Weise. Das Ectogrid ist ein in sich geschlossenes integriertes Heiz- und Kühlsystem, in welchem Wärmepumpen und Kältemaschinen die Gebäudetemperaturen bedarfsgerecht anpassen. Das Ectogrid ist für Quartiere, Stadtteile bis hin zu ganzen Städten ausgelegt, noch nicht jedoch für Einfamilienhäusern. Die Simulationen und Steuerungen basieren auf grundlegenden physikalischen Gesetzen. Ein wichtiger Teil des Ectogrids ist die Kontrolle der Vorlauftemperatur. Die Ectocloud erlaubt eine vollständig integrierte Regelung von Erzeugung

¹⁰ https://www.eon.se/en_US/foeretag/ectogrid/ectocloud

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

und Verbrauch von Wärme, Kälte und Strom im Energienetz. Wesentliche Elemente hierbei sind ein „Energy Manager“, der für die Zweiwege-Kommunikation und den Datenaustausch zwischen Netz, Ausgleichseinheiten und der ectocloud verantwortlich ist sowie ein „algorithm engine“ zur gleichzeitigen Ausführung verschiedener Berechnungs- und Optimierungsalgorithmen. Funktionalitäten der ectocloud inkludieren die Aggregation der stromseitigen Flexibilität während Spitzenzeiten, die integrierte Betrachtung von Strom, Wärme und Kälte, die Nutzung verschiedener Optimierungsalgorithmen, die Verbindung unterschiedliche Systemkomponenten, die vorrausschauende Regelungen zur Reduktion der Betriebskosten sowie die Visualisierung der Systemperformance und Fehlererkennung.

Gradyent¹¹ hat sich auf die digitale Optimierung von Fernwärmesystemen spezialisiert. Man verfolgt einen integrierten Ansatz und versucht das gesamte System abzubilden. Um Anlagen zu optimieren, werden diese mit hydraulischen Berechnungen und Daten der Übergabestation verknüpft. Durch die Verknüpfung der einzelnen Netzpunkte werden Bedarf und Erzeugung verbunden. Fokus sind historisch gewachsene Netze, in welchen den Betreibern oft Verständnis über die Hydraulik und generelle Zusammenhänge fehlt. Eine dezidierte IoT Lösung ist derzeit nicht breit verfügbar.

3.1.2 Herstellung von Datenaustausch und Kommunikation

Utilifeed¹² hat eine Software entwickelt, welche Messdaten unterschiedlicher Systeme sammelt und standardisiert aufbereitet. Mit den Messdaten der Primärseite wird ein digitaler Zwilling des Netzes bzw. von Übergabestationen erstellt. Das Modell ist in der Lage Energieflüsse, Volumenstrom und die Rücklauftemperatur der Übergabestation vorherzusagen. Als Grundlage dafür dienen unter anderem die Außentemperatur und Kalenderdaten. Das Modell wird genutzt, um den Wärmebedarf vorherzusagen und um Fehler im Netz zu detektieren. Zugänglich gemacht wird das Modell durch universelle APIs, um es für möglichst viele Systeme kompatibel zu machen. Zusätzlich hat man auch den wirtschaftlichen Teil der Fernwärmenetze in einem Modell digital abgebildet.

Crossbreed Energy OS¹³: Mit dem Crossbreed Energy OS bietet Crossbreed eine breite Produktpalette an Smart Energy Services an. Welche unter anderem eine Vielzahl von autonom und in Symbiose arbeitende Algorithmen beinhaltet. Crossbreed Energy OS ist eine Cloud-basierte Infrastruktur, die Systeme und Algorithmen miteinander verbindet, damit sie in Symbiose arbeiten und alle Teile des Energiesystems optimieren. Sie ist über eine einzige API verfügbar. Crossbreed Energy OS ermöglicht vernetzte Datenströme, die Entwicklung kommerziell nutzbarer OEM-Lösungen, welche die Fernwärmeversorgung und -verteilung optimieren.

¹¹ <https://www.gradyent.ai/>

¹² <https://www.utilifeed.com>

¹³ <https://www.crossbreed.se/crossbreed-energy-os/>

3.1.3 Durchführung von demand side management im Gebäude

Leanheat¹⁴: bietet intelligente Gebäudedienste rund um künstliche Intelligenz (KI), selbstlernende Systeme und Cloud-Lösungen für Fernwärmeversorgungsunternehmen und Gebäudeeigentümer. Die Leanheat-Lösung nutzt künstliche Intelligenz, um zentral beheizte Gebäude optimal zu steuern und zu überwachen. Daten aus der zentralen Gebäudeleitwarte werden mit Daten kombiniert, die von IoT-Sensoren (drahtlos) in den einzelnen Wohnungen des Gebäudes gesammelt werden. Durch den Einsatz von KI zur Verarbeitung der gesammelten Daten kann die Zentralheizung je nach Wetter, Belüftung und Lebensgewohnheiten der Bewohner optimal gesteuert werden. Leanheat ist ein enger Partner von Danfoss A/S und die Leanheat Lösung ist fester Bestandteil in der Fernwärmenetzoptimierung der Firma.

NODA¹⁵ bietet KI-basierte Lösungen im Bereich Fernwärme und Fernkälte. NODA Heat Network bietet Netzbetreibern ein Werkzeug zur dynamischen Steuerung von Angebot und Nachfrage. Es bietet Lösungen für die Netzoptimierung, einschließlich dynamischer Vorlauftemperatur. Der Fokus liegt allerdings auf dem Demand Side Management, Steuerung der Übergabestationen und Predictive Maintenance. Das NODA-System kann in bestehende IT-Systeme integriert werden und mit den meisten aktuellen Datenmanagementsystemen koexistieren. NODA Building ist ein KI-basiertes System zur Optimierung von Heizung und Kühlung in Wohn- und Geschäftsgebäuden bei gleichzeitiger Gewährleistung eines guten Raumklimas. Das Building-System bietet eine breite Palette von Lösungen für den Datenzugriff. Zu den Hauptalternativen gehören Sensor-Override, Gateway-Lösungen für Standard-Kommunikationsprotokolle der Automatisierungstechnik und vollständige IT-basierte Integrationen.

FLEXharvester¹⁶ wurde von VITO/Energy Ville entwickelt. FLEXharvester ist ein leicht übertragbares offenes Datenmodell und Architektur für den Aufbau von Lösungen für das Energieflexibilitätsmanagement. Die Plattform basiert auf dem Microsoft Azure ARM-Template-Konzept und integriert die laufenden Forschungsentwicklungen von VITO im Bereich der Demand-Response-Anwendungen von Wärmenetzen. Sie ermöglicht es Microsoft-Lösungsanbietern, Anwendungen zur Energieflexibilität auf der Grundlage von Microsoft-Anwendungen und -Plattformen zu verstehen, zu integrieren und einzusetzen.

3.2 Testumgebungen für Digitalisierungslösungen im integrierten Energiesystem

Für die Planung und den Betrieb von Energienetzen, können basierend auf Computermodellen optimale Netzkonfigurationen und Regelstrategien erarbeitet werden. Im Kontext der Produktentwicklung von Komponenten oder Automatisierungssystemen ist allerdings die

¹⁴ <https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/news/cf/artificial-intelligence-provides-comfort-for-apartments-residents/>

¹⁵ <https://noda.se/about-noda/>

¹⁶ <https://flexharvester.vito.be/en>

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

computergestützte Analyse allein oft nicht mehr ausreichend, weil relevante Effekte nur unzureichend modellierbar sind. Beispiele dafür sind die komplexe Dynamik von Komponenten und ihr transientes Verhalten, Softwareartefakte in Reglern, Vektoren für Cyberattacken und viele andere mehr.

Hier kommt „Hardware-in-the-Loop“ (HIL) ins Spiel, wo kritische Komponenten oder Teilsysteme als Hardware betrieben werden und der restliche Teil des Systems mit Hilfe einer Simulation in Echtzeit emuliert wird. Im Energiebereich kommen derartige Anwendung bislang zwar hauptsächlich im Kontext von Smart Grids zum Einsatz (Strasser et al., 2017), (Steinbrink et al., 2017), allerdings wird diese Technologie auch immer mehr für thermische Systeme eingesetzt (Steinbrink et al., 2017), (Schneider et al., 2015).

Im Folgenden werden ausgewählte Labore für die Nutzung von Hardware-in-the-Loop Ansätzen für thermische bzw. Sektorgekoppelte Anwendungen basierend auf Internetrecherchen sowie Ergebnissen aus Experteninterviews (siehe Abschnitt 8) kurz dargestellt. Kriterium für die Auswahl der Labore war, dass das Labor mindestens zwei relevante Domänen (Stromnetz, Wärmenetz, Gebäude, Wärmepumpe, Übergabestation) inkludiert, davon mindestens eine Domäne als Hardware. Details sind in Anhang 1 „Übersicht bestehender Testumgebungen“ zu finden.

Das **NODES Lab** umfasst einen Aufbau eines vereinfachten Quartiers mit drei Verbrauchern, einem saisonalen Speicher und einer Wärmequelle. Auf Basis von Echtzeitsimulationen können die Heiz- und Kühlprofile sowohl von Verbrauchern als auch von Lieferanten emuliert werden.

Das **Energy Exchange Lab** bietet eine flexible Testumgebung, mit der verschiedene Betriebskonfigurationen für ein kleines Fernwärmenetz erstellt werden können. Es ermöglicht die Simulation von Niedertemperatur-Wärmenetzen, einschließlich mehrerer dezentraler Erzeugungs- und Verbrauchseinheiten. Die Energiequellen umfassen Solarthermie, einen Gaskessel, eine ORC Einheit und eine Absorptionskältemaschine.

Das **District LAB** besteht aus einem flexiblen Wärmenetz, einem Rohrprüfstand und einem dedizierten Leitsystem. Mehrere HIL-Einheiten können Verbrauchs- und Erzeugungsmuster im Netzwerk emulieren, was die Emulation dezentraler Prosumer ermöglicht. Durch ein digitales Leit- und Regelungssystem können Betriebszustände exakt eingestellt und gemessen werden. Eine Stärke des DistrictLABs ist der flexible und modulare Aufbau.

Campus of the University of Parma: Es werden Tests zur Integration von erneuerbarer Energieerzeugung, innovativer Energieverteilung und Speichern in bestehende Systeme untersucht. Des Weiteren werden intelligente Management- und Kontrollsysteme getestet.

Sibelga: Getestet werden soll die Integration von erneuerbarer Energieerzeugung, CNG, Flexibilitätsdienstleistungen und Energiespeicherung. Weiters werden Smart Meter, Smarte Gebäude, Near-Zero Gebäude, elektrisch und CNG- Autos und smarte Beleuchtung untersucht

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Smart Otaniemi: Hier können verschiedene Lösungen für Flexibilität in bestehenden Systemen und hybride Netze getestet werden. Es werden Daten mit neuen Technologien wie KI und 5G ausgewertet. Des Weiteren werden Prototypen in enger Zusammenarbeit zwischen Forschern, Studenten und Startups entwickelt

The Green Village: Im Green Village werden die Integration von erneuerbaren Energiequellen und Speicher in das bestehende System, die Reaktion von Konsumenten auf Innovationen, Regulierungs- und Standardisierungsfragen und komplexe kommerzielle oder gesellschaftliche Geschäftsmodelle untersucht.

CoSES Research Laboratory: Das CoSES Forschungslabor bietet ein Mikronetz, welches 4 Einfamilienhäuser und ein Mehrparteienhaus beinhaltet. So sollen Realbedingungen simuliert werden. Im Labor können Wetterzustände, welche Windenergie, Photovoltaik und Solarthermie beeinflussen entweder simuliert werden oder es können die natürlichen Wetterzustände genutzt werden. Im vorhandenen Wärmenetz agiert jeder Knotenpunkt unabhängig von den anderen. Jeder Knotenpunkt ist zu gleich Einspeise- und Ausspeisepunkt.

Thor Park Regulatory Sandbox: Momentan gibt es sechs Gebäude, welche mit der neuesten Heiz- und Kühltechnik, sowie mit Energiemonitoring Systemen ausgestattet sind. 55 Ladepunkte für Elektroautos sind vorhanden. EnergyVille verbindet die einzelnen Systeme zur SmarThor Cloud Plattform. Die Integration neuer Systeme, Services und Kontrollstrategien wird erforscht, um die Einbindung erneuerbarer Energie zu verbessern. In den Laboren können Batterien, Fernwärme und -kälte, DC Lösungen, Netzsimulation und Energiemanagementsysteme von Gebäuden untersucht werden.

In der folgenden Tabelle sind die wesentlichen Eigenschaften der analysierten Labors zusammenfasst:

Tabelle 3-1: Zusammenfassung der wesentlichen Eigenschaften der analysierten Labors

Name	NODES Lab	Energy Exchange Lab	DistrictLAB	University of Parma	Sibelga	Smart Otaniemi	The Green Village	CoSES Research Laboratory	Thor Park Regulatory Sandbox
Land	Schweiz	Italien	Deutschland	Italien	Belgien	Finnland	Niederlande	Deutschland	Belgien
Betrieb	unklar	in Betrieb	in Betrieb	in Betrieb	Planung	in Betrieb	in Betrieb	in Betrieb	in Betrieb
Wärmenetz	Ja, mit 3 Abnehmern	Ja, NT Wärme + Kältenetz	Ja, Testnetz	FW+FK Netz + Übergabestationen	x	Ja	Ja	Ja, gekoppelt mit Stromnetz, für bidirektionale Nutzung	Fernwärme + Kältenetz
Rohrprüfstand	x	x	Ja	x	x	x	x	x	x
Stromnetz	Simuliert	Simuliert	x	Teststand	Ja	Ja	Ja	Ja, gekoppelt mit Wärmenetz	DC Netz + AC Mittelspannungsnetz
Gasnetz	x	x	x	x	Ja	x	Ja, Erdgas + Wasserstoff	x	x
Batterien	x	x	x	x	x	x	x	x	Batterietestlabor
Data/Controlling	x	Testen von Steuermodellen	Digitales Leit- und Regelsystem	Intelligente Management + Kontrollsysteme	Datenmanagement + Energiezähler	Datenauswertung mit 5G und KI	x	Ja, gekoppelt mit anderen Netzen	Azure Cloud Integration

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Wärme-pumpe	Ja	Ja	x	x	x	x	x	x	x
Last-profile	Simuliert, mittels Wärmetauscher	Simuliert, elektr. WP	Betriebszustände werden simuliert	x	x	x	x	x	x
Quellen	Ja, im Labormaßstab	Ja, Solarthermie, Gaskessel, ORC Einheit, Absorptionskältemaschine => KKWK Anlage simuliert	Wärmeerzeuger werden getestet	Tests zur Integration von erneuerbaren	Brennstoffzellen; Notstromaggregate, Wärmequellen, KWK Anlage, PV	x	x	Prüfstand für stark fluktuierende Energieerzeugung	x
Speicher	Saisonal-speicher	x	x	Tests zu Speichern in bestehenden Systemen	x	x	x	x	x
HIL - Einheit	x	x	Ja	x	x	x	x	x	x
Verbraucher	Ja, 3 Abnehmer	Ja, simuliert durch elektrische WPs	x	Campus	Beleuchtung, Bürogebäude	Gebäude	Interaktionen mit Green Village	4 Einfamilienhäuser + 1 Mehrfamilienhaus	6 Gebäude
Verkehr	x	x	x	x	Elektro- und CNG Autos+ Ladepunkte	Ladeinfrastruktur für Elektroautos	x	x	55 Ladepunkte
Living Lab	x	x	x	Ja	x	Teilweise	Ja	x	x

3.3 Middleware zur Realisierung von HIL/ CIL und Co-Simulation Ansätzen

Ein Nachteil von traditionellen HIL-Ansätzen ist oft die relativ kostspielige proprietäre Hardware und Software, die für den Einsatz notwendig ist. Aktuelle Entwicklungen versuchen daher kostengünstige Alternativen zu etablieren, speziell im Kontext von „Controller Hardware-in-the-Loop“ (CHIL), wo Prototypen von Reglern oder Automatisierungssystemen getestet werden. Dabei zeichnet sich derzeit ein Trend ab, bei dem vermehrt auf offene Standards und quelloffene Software gesetzt wird (Nouidui, T. S. & M. Wetter, n.d.). Außerdem werden vermehrt Ansätze aus dem Bereich Simulationskopplung (*co-simulation*) verwendet, um komplexe, domänenübergreifende Simulationsmodelle mit hohem Detailgradrad emulieren zu können (Otte et al., 2018a), (Drauz et al., 2018a).

Im Folgenden werden unterschiedliche Middleware-Lösungen zur Realisierung von HIL/ CIL und co-simulations Ansätzen basierend auf Internetrecherchen sowie Ergebnissen aus Experteninterviews (siehe Abschnitt 8) kurz dargestellt.

Im Bereich Gebäudetechnik wurde das **Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB)** entwickelt, das unterschiedliche Simulationsprogramme verlinken (Co-Simulation) kann (Wetter, 2011), aber auch für eine Kopplung von Simulationsprogrammen mit Gebäudeautomationssystemen eingesetzt werden kann (Nouidui et al., 2011). Obwohl für den letzteren Fall eine BACnet-Schnittstelle entwickelt wurde, sind die meisten in der Literatur beschriebenen Anwendungen des BCVTBs der Co-Simulation zuzuordnen.

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

Für die Entwicklung bzw. den Test von Regler Konzepten bis hin zu Leitsystemen im Smart Grid Bereich wurde **OpSim**¹⁷ von Fraunhofer IEE in Zusammenarbeit mit der Uni Kassel entwickelt. Nutzer haben die Möglichkeit eigene Software mit simulierten Stromnetzen verbinden. Des Weiteren lassen sich umfangreiche spannungsebenenübergreifende Netzgebiete mit einer großen Auswahl an dezentralen Erzeugern, Speichern und Lastprofilen emulieren. OpSim verfügt über APIs für diverse Simulationen, sowie Schnittstellen für Hardware-in-the-Loop (HiL) Tests. Zudem ist das Programm geeignet für kombinierte Strom/Gas- sowie Strom/Wärme-Simulationen.

¹⁷ <https://www.iee.fraunhofer.de/de/schnelleinstieg-wirtschaft/themen/opsim.html>

4 Das Grundkonzept des DigitalEnergyTestbed

Prüfstände ermöglichen die ganzheitliche Validierung und Entwicklung neuer Produkte für integrierte Energiesysteme unter realistischen dynamischen Betriebsbedingungen. Für Fernwärmeanwendungen müssen Prüfstände den Einfluss auf thermische Netze und Gebäude, den Betrieb von Übergabestationen und dezentralen Wärmeversorgern sowie die Wechselwirkungen mit unterschiedlichsten Digitalisierungslösungen (modellprädiktive Regelung, Datenaustausch mit digitalen Plattformen etc.) abbilden. In der Praxis verfügen nur wenige Einrichtungen – wie beispielsweise die in Abschnitt Testumgebungen für Digitalisierungslösungen im integrierten Energiesystem genannten – über eine multifunktionale Laborinfrastruktur, um solche Systemkonfigurationen in Hardware und/oder mit traditionellen HIL-Aufbauten zu implementieren. Viele F&E-Organisationen betreiben jedoch kleine, bedarfsspezifische Prüfstände, die ganz spezifisch für die Entwicklung und Prüfung konkreter thermischer Komponenten (z.B. Wärmepumpen oder thermischer Speicher) konzipiert sind. Und aufgrund der stetig fortschreitenden Digitalisierung sind viele dieser Prüfstände bereits mit einer digitalen Automatisierungsschnittstelle ausgestattet, die einen Fernzugriff ermöglicht.

Das Grundkonzept des DigitalEnergyTestbed zielt darauf ab, diese bereits vorhandenen Prüfstände zu nutzen. Voraussetzung ist, dass eine Automatisierungsschnittstelle verfügbar, per Fernzugriff erreichbar und in der Lage ist, den Prüfling (*device under test*, DUT) ordnungsgemäß anzusteuern. Dies wird durch die Voraussetzungen V1 und V2 in Tabelle 4-1 adressiert. Die Verknüpfung und Synchronisierung eines solchen eigenständigen Prüfstands mit Echtzeitsimulationen ermöglicht effektiv HIL- (und CHIL-)Aufbauten. Moderne Ansätze für die (Co-)Simulation integrierter Energiesysteme stützen sich in der Regel auf leistungsstarke Programmierschnittstellen (*application programming interface*, API), die den Benutzern die notwendige Kontrolle über die Ausführung eines Simulationsmodells geben. Damit bieten diese Ansätze ein hohes Maß an Flexibilität für die Umsetzung komplexer Systemkonfigurationen über den Rahmen der verfügbaren Hardwareprüfstände hinaus. Dies wird durch die Voraussetzung V3 in Tabelle 4-1 adressiert.

Darüber hinaus bietet das vorgeschlagene Konzept durch die Nutzung offener Standards und Open-Source-Software eine Umgebung, die reproduzierbar und für andere zugänglich ist sowie das Potenzial hat F&E-Ausgaben zu senken. Dies wird durch die Anforderungen A1 und A2 in Tabelle 4-1 adressiert. Damit kann das vorgestellte Konzept zukünftig als Grundlage für standardisierte und systematische Testverfahren dienen und die Vergleichbarkeit bestehender Lösungen auf Basis standardisierter Testfälle verbessern.

Tabelle 4-1: Voraussetzungen (V) und Anforderungen (A) für offene Testumgebungen

Voraussetzungen für Hardware	
V1	Alle Hardware-Komponenten (Prüfstände, Server, Edge-Geräte usw.) müssen eine per Fernzugriff zugängliche Schnittstelle bereitstellen, die zur asynchronen

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

	Kommunikation für den Datenaustausch (Sollwertvorgaben, Sensorinformationen abrufen usw.) fähig ist.
V2	Hardwareprüfstände müssen eine ausreichende Regelqualität bieten, um den Prüfling und seine Ein-/Ausgänge nach externen Vorgaben anzusteuern.
Voraussetzungen für Software	
V3	Simulationswerkzeuge müssen eine API bereitstellen, die zum Datenaustausch und zur Handhabung von Anwendungen (Start, Schritt, Stopp usw.) mit Simulationsmodellen während der Ausführungszeit fähig ist.
Anforderungen für offene Testumgebungen	
A1	Die gesamte Software, die eine Testumgebung implementiert, muss Open Source sein, um die Erweiterbarkeit zu erleichtern. Dies gilt nicht für Software, die an den Teststand angebunden wird, z.B. proprietäre Automatisierungslösungen oder Simulationstools.
A2	Alle Schnittstellen der Testumgebung müssen offenen Standards entsprechen, um die Zugänglichkeit und Interoperabilität zu gewährleisten.

4.1 Die LabLink Middleware

Unter den Voraussetzungen V1 - V3 (siehe Tabelle 4-1) kann ein Prüfstand wie im vorherigen Abschnitt beschrieben mithilfe einer Labor-Middleware implementiert werden. Diese Middleware ist für das Management von und der Datenübertragung zwischen den verteilten Komponenten des Prüfstands – also der angeschlossenen Hardware und den Simulationswerkzeugen – verantwortlich.

Das im Projekt DigitalEnergyTestbed vorgestellte Konzept basiert auf Lablink, einem Open-Source-Softwareprojekt gemäß Anforderung V1. Lablink wickelt die Kommunikation zwischen verteilten Clients über die Datenrouting- und Codierungsfunktion ab, die von seiner Kernbibliothek bereitgestellt wird. Es ist als verteilte Anwendung konzipiert und stützt sich auf dedizierte Lablink-Clients für den Zugriff auf Laborhardware oder Simulationstools. Abbildung 4-1 zeigt eine schematische Darstellung der grundlegenden Architektur von Lablink. Zusätzlich stehen auch verschiedene Hilfswerkzeuge zur Verfügung, z. B. zum Synchronisieren von Clients oder zum Protokollieren und Visualisieren von Daten.

Lablink wurde bereits zuvor für HIL- und CHIL-Anwendungen im Zusammenhang mit Forschung und Entwicklung für Smart Grids verwendet (Gavrilita et al., 2019; Stahleder et al., 2018). Lablink ist aber genauso gut für Anwendungen im thermischen Bereich geeignet. Als Machbarkeitsnachweis wurde ein Prototyp eines Prüfstands rund um einen bestehenden Teststand für Fernwärmeübergabestationen implementiert. Dieser Prüfstand ist für die stationäre Charakterisierung (gemäß Standard CEN CWA 16975) von Fernwärmeübergabestationen konzipiert und Teil der Laborinfrastruktur des Center for Energy

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

am AIT Austrian Institute of Technology. Der Teststand umfasst eine handelsübliche Fernwärmeübergabestation als Prüfling, die auf jeder Seite mit thermohydraulischen Systemen zur Nachbildung von Wärmeversorgung (Primärseite) und Wärmeverbrauch (Sekundärseite) verbunden ist, siehe Abschnitt 5 für weitere Details.

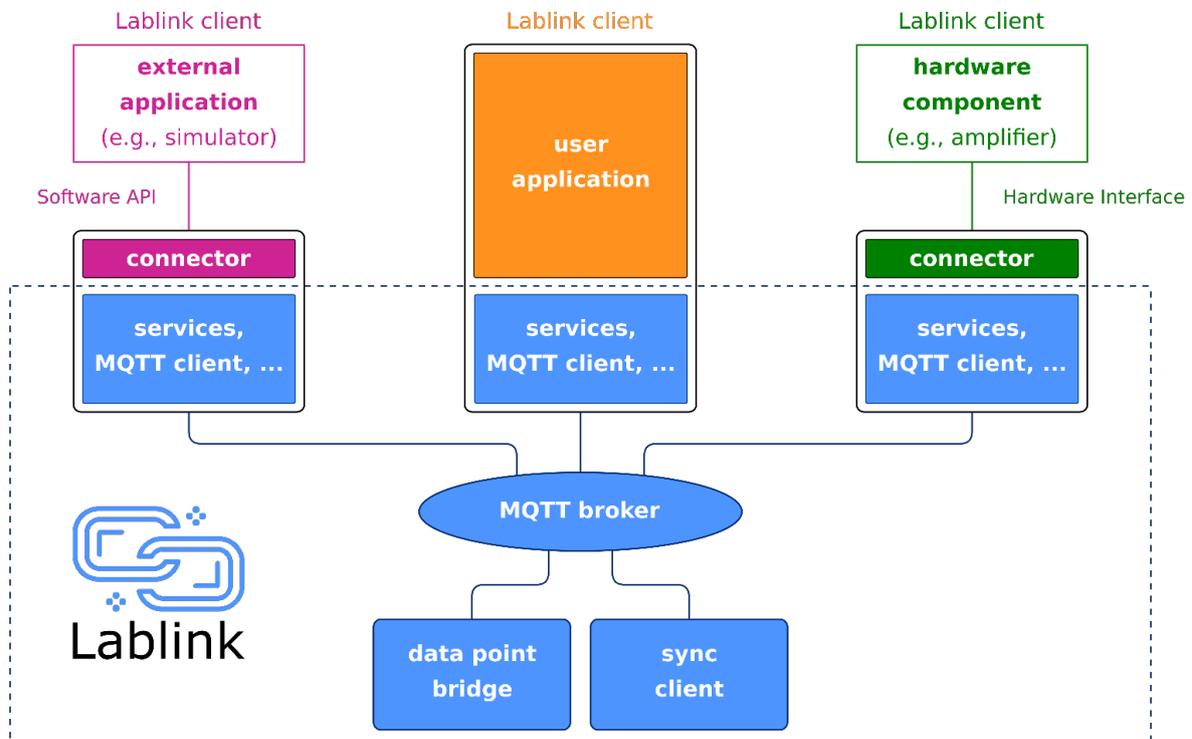


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung der Architektur von Lablink.

Um die Anforderung A2 zu erfüllen, werden folgende Schnittstellen bereitgestellt:

- Für die Kommunikation mit dem Prüfstand wird die *OPC Unified Architecture* (OPC UA) (International Electrotechnical Commission, 2020) verwendet. OPC UA ist ein plattformübergreifender, offener Standard für den Datenaustausch, der in industriellen Automatisierungsanwendungen weit verbreitet ist. Die Kommunikation mit Lablink wird über einen dedizierten OPC UA-Client hergestellt.
- Für die Anbindung von Simulationswerkzeugen wird das *Functional Mock-up Interface* (FMI) (Blochwitz et al., 2011) verwendet. FMI ist ein offener Standard, der einen Container und eine Schnittstelle zum Austausch von Simulationsmodellen. Das geschieht mithilfe einer Kombination aus XML-Dateien, Binärdateien und C-Code, die in einer einzigen Datei gezippt sind, einem sogenannten Functional Mock-up Unit (FMU). Die Kommunikation mit Lablink erfolgt über einen dedizierten FMU-Client.
- Für die Einbindung der elektrischen Domäne wurde ein *Echtzeit-Simulator* (OPAL-RT) verwendet. Dieser Simulator ermöglicht die Berechnung elektromagnetischer Transienten und elektromechanische Simulationen großer und komplexer elektrischer Verteilnetze, sowie die Emulation von hochfrequenten Leistungselektronikschaltungen und anderer elektrischer Komponenten. Dieser Echtzeit-Simulator kann mit einer

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

gewöhnlichen Datenbank (Redis) synchronisiert werden, deren Synchronisationsrate an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden kann (und im Allgemeinen deutlich unter der zeitlichen Auflösung der Echtzeit-Simulation liegt). Die Anbindung an Lablink erfolgt über einen Redis-Client.

- Für die Einbindung von Digitalisierungslösungen bietet das modulare Konzept von Lablink prinzipiell eine Vielzahl von Kopplungsmöglichkeiten. Für die Zwecke des Projekt DigitalEnergyTestbed wurde eine Schnittstelle gemäß dem *Representational State Transfer* (REST) Paradigma verwendet, die insbesondere für die Einbindung von Webservices und für Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M) geeignet ist. Die Anbindung an Lablink erfolgt über einen Universal API-Client.
- Für die Visualisierung von Daten, die über Lablink ausgetauscht werden, steht ein Plotter-Client zur Verfügung. Dieser Client stellt Daten als fortlaufende Zeitreihen in Echtzeit dar.

Diese Schnittstellen ermöglichen eine Synchronisation des Betriebs der Primär- und Sekundärseite des Prüfstands mit Simulatoren für thermische Systeme (z. B. Dymola, TRNSYS oder EnergyPlus), Echtzeit-Simulatoren für elektrische Systeme (OPAL-RT) sowie Digitalisierungslösungen (M2M). Abbildung 4-2 skizziert den resultierenden Prototypen des Prüfstands, der einen Validierungsaufbau für intelligente Anwendungen in integrierten Energiesystemen bietet. Wie die in Abschnitt 4.2 vorgestellten Anwendungen zeigen, kann dieser Prüfstand verwendet werden, um verschiedene Anwendungsfälle zu validieren.

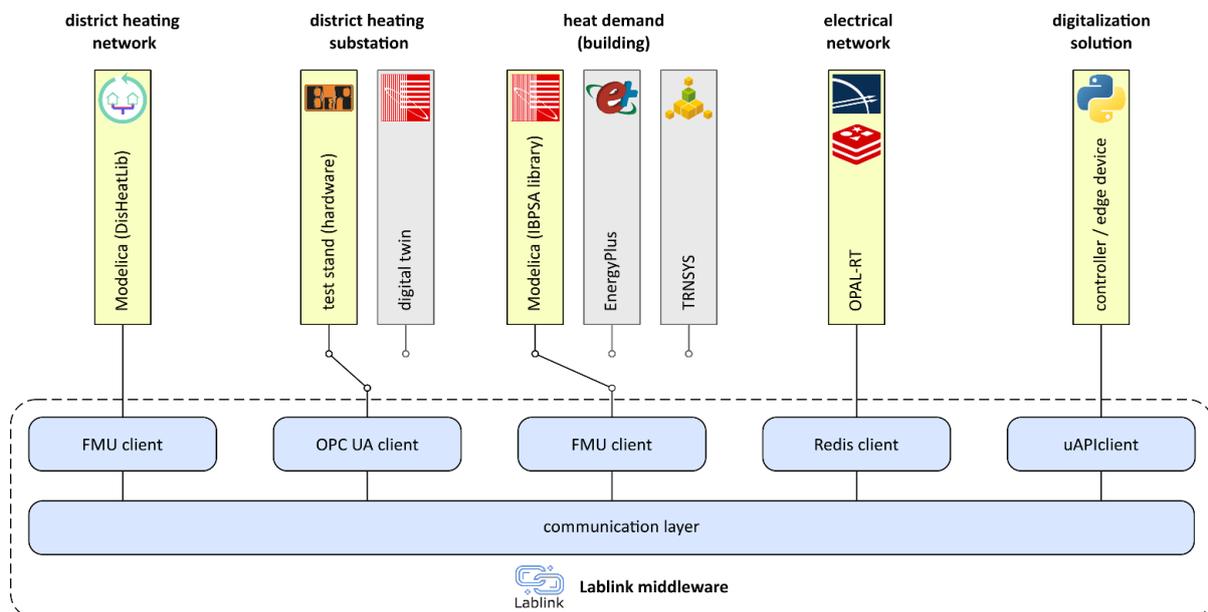


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung des Prototypen des Prüfstands

Es ist zu beachten, dass der in Abbildung 4-2 dargestellte Prototyp nur ein spezifischer Implementierungsaufbau ist, der als Machbarkeitsnachweis ausgewählt wurde. Die Flexibilität und Erweiterbarkeit von Lablink bietet eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Entwicklung von

Prüfständen, einschließlich der Integration verschiedener Digitalisierungslösungen und weiterer Teststände.

4.2 Mögliche use cases für das DigitalEnergyTestbed

Gemeinsam mit den Aktivitäten in Abschnitt 8 und basierend auf aktuellen Forschungs- und Kundenprojekten sowie weiterführenden Recherchen wurden mögliche use cases für das DigitalEnergyTestbed identifiziert. Die use cases wurden mithilfe eines Template erarbeitet und dokumentiert, in der die wichtigsten Aspekte erfasst wurden (Kontext, Zielsetzung, umfasste Domänen, involvierte Stakeholder, technische Diagramme, etc.), siehe auch Anhang 2. Es lassen sich folgenden drei Ebenen der use cases unterscheiden:

- Hardware-in-the-loop
- Controller-in-the-loop
- Auf Systemebene

Im Folgenden sind die use cases der jeweiligen Ebenen kurz zusammengefasst.

4.2.1 Hardware-in-the-loop

4.2.1.1 Use case: Hardware-in-the-loop für Fernwärme-Übergabestationen

Ziel: Testen einer Fernwärme-Übergabestation mit verschiedenen Sollwerten und Analysieren des thermischen Verhaltens

Involvierte Domänen: Fernwärmeübergabestation; Fernwärmeprüfstand; Regler;

Beschreibung: Für eine stabile Funktionalität muss die Übergabestation unterschiedliche Temperaturen und Drücke sowie unterschiedliche Zapfzyklen auf der Sekundärseite verarbeiten. Im Rahmen dieses Anwendungsfalls wird eine Reihe realistischer Szenarien getestet und das Verhalten der Übergabestation analysiert. Diese Ergebnisse werden für die Anpassung des Reglers zur Gewährleistung einer hohen Regelungsqualität und für die Entwicklung geeigneter Gebäudemodelle verwendet, die von dieser Übergabestation geliefert werden. Weiters können so unterschiedliche Prüfungen durchgeführt werden, u.a. ob die Dimensionierung einer Fernwärmeübergabestation passend gewählt ist, ob die Regelung der Übergabestation für die dynamischen Änderungen des Gebäudes geeignet implementiert wurde oder ob Änderungen am angeschlossenen Gebäude sinnvoll für einen effizienteren Betrieb sein könnten. Weiters können unterschiedliche mechanische oder regelungstechnische Fehler in die Übergabestation eingebaut werden, die mit Hilfe verschiedener Algorithmen zu erkennen sind.

4.2.2 Controller-in-the-loop

4.2.2.1 Use case: Testen der Regelung einer Fernwärmeübergabestation mit Booster-Wärmepumpe mittels Controller-Hardware-in-the-loop-Simulation

Ziel: Test der tatsächlichen Implementierung von Reglern für die Fernwärme-Übergabestation mit Booster-Wärmepumpe auf einer Kombination aus Hardware-Testbed und Simulationsmodell

Involvierte Domänen: Fernwärmenetz; elektrisches Netz; Steuerung; Fernwärmeübergabestation; Gebäude;

Beschreibung: Fernwärmeübergabestationen mit Booster-Wärmepumpe werden in Niedertemperatur-Fernwärmenetzen eingesetzt, um die Temperatur an den Bedarf (Raumheizung und/oder Warmwasserbereitung) anzupassen. Ihre Anbindung sowohl an das Fernwärme- als auch an das Stromnetz macht derartige Übergabestationen zu einer interessanten Flexibilitätsoption, um z.B. Fernwärme-Nachfragespitzen zu reduzieren oder die Eigennutzung lokaler Erzeugung aus der PV zu erhöhen. Solche Dienste erfordern innovative Regelungsalgorithmen. Dieser Anwendungsfall zielt auf die Erprobung solcher Regler in einem hybriden Aufbau unter Verwendung von Controller-Hardware-in-the-Loop, um den realen Regler und die Fernwärme-Übergabestation zu berücksichtigen, während Simulationsmodelle verwendet werden, um die Randbedingungen und gegenseitigen Einflüsse von Fernwärme- und Stromnetzen zu emulieren.

4.2.2.2 Use case: Remote controller-in-the-loop for HVAC

Ziel: Testen von Reglern / Kopplung von geografisch verteilten realen (Low-Level-)Steuergeräten mit einem virtuellen HVAC-Modell; Ferngesteuerter Controller-in-the-Loop für HVAC

Involvierte Domänen: Gebäude- und HLK-Systemmodellierung, Steuerungstechnik (Software und Hardware), standardisierte Kommunikationsprotokolle

Beschreibung: Ziel des use cases ist das Testen von „low-level“-Reglern hinsichtlich ihrer Funktionalität (korrekte Umsetzung von Regelstrategien) oder ihrer Regelgüte (z.B. bzgl. des Regelverhaltens, die Reaktion auf Störungen, usw.). Im Gegensatz zu einer Prüfung des Reglers vor Ort können die Steuersignale über weitere Strecken übertragen werden. Der Vorteil ist, dass die zu prüfenden Regelung nicht in das Unternehmen geliefert werden müssen, in dem sich die Prüfsoftware befindet, sondern in den eigenen Räumlichkeiten verbleiben kann. Hierfür müssen jedoch Aspekte wie z.B. die Übertragungszeiten berücksichtigt werden. Der Datenaustausch erfolgt über bekannte Protokolle, wie z.B. BACnet oder MODBUS. Der Regler kann sich wie gewohnt verhalten, da es keinen Unterschied macht, ob die Sensorsignale von einem Simulationsmodell berechnet oder von einer realen Anlage erzeugt werden.

4.2.2.3 Use case: Remote controller-in-the-loop für HVAC inkl. BEMS

Ziel: Testen von Reglern / Kopplung realer oder virtueller building energy management systeme (BEMS), „Low-Level“-Regler mit virtuellem HVAC-Modell zu Testzwecken (Qualität und Funktionalität)

Involvierte Domänen: Gebäude- und HVAC-Systemmodellierung, Steuerungstechnik (Software und Hardware), standardisierte Kommunikationsprotokolle

Beschreibung: Ziel des use cases ist das Testen von „low-level“-Reglern hinsichtlich ihrer Funktionalität (korrekte Umsetzung von Regelstrategien) oder ihrer Regelgüte (z.B. bzgl. des Regelverhaltens, die Reaktion auf Störungen, usw.). Der Regler und das BEMS können auf einer realen Low-Level-Regelungshardware oder als virtuelle Software angesiedelt sein, wobei die Einstellungen und der Datenfluss konzeptionell gleichbleiben. Der Regler ist physikalisch über seine Standardprotokolle wie z.B. BACNet, Modbus RTU, etc. mit einer Kommunikationsschnittstelle für das DigitalEnergyTestbed verbunden. Aus Sicht des Reglers kann er sich wie gewohnt verhalten, da es keinen Unterschied macht, ob die Sensorsignale von einem Simulationsmodell berechnet oder von einer realen Anlage erzeugt werden. Dieser Aufbau ermöglicht eine funktionale Qualitätsprüfung eines realen Reglers. Als weitere Option kann der Regler und sein BEMS auch virtuell sein.

4.2.2.4 Use case: Rapid Prototyping von Echtzeit-Komponenten für HVAC

Ziel: Virtuelle Komponentenprüfung / Testen von Echtzeit-HVAC-Komponentenmodellen in einer virtuellen Umgebung

Involvierte Domänen: Steuerung; HVAC-Komponentenmodelle; Gebäude;

Beschreibung: Dieser use case umfasst das virtuelle Testen von Echtzeit-HVAC-Komponentenmodellen. *(Es handelt sich um einen unterstützenden use case für die use cases "Remote Controller-in-the-Loop für HVAC" oder "Controller-in-the-Loop für HVAC inkl. BEMS").* Hierbei ist die Annahme, dass ein rein virtuelles Testen der Komponenten zweckmäßiger ist als das Testen mit realen Reglern und/oder realer Hardware, insbesondere wenn die zu testenden Komponentenmodelle für eine Reihe von unterstützten Use Cases verwendet werden können. Außerdem macht ein rein virtueller Aufbau automatisierte Tests und Regressionstests effizienter.

4.2.2.5 Use case: Untersuchung der koordinierten Spannungsregelung für gekoppelte thermisch-elektrische Verteilungssysteme mit Power-to-Heat-Anlagen

Ziel: Testen von Reglern / Test der tatsächlichen Implementierung des koordinierten Spannungsregelungsalgorithmus auf einer Kombination aus Hardware-Testumgebung und hochrealistischem Simulationsmodell

Involvierte Domänen: Fernwärmenetz; elektrisches Netz; Steuerung; Power-to-Heat-Anlage

Beschreibung: Zur Steigerung des kollektiven Eigenverbrauchs in einem Stadtteil wird die lokale PV-Erzeugung für den Betrieb einer Power-to-Heat-Anlage genutzt. Die von den an das Stromverteilungsnetz angeschlossenen PV-Anlagen erzeugte elektrische Energie wird von

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

einer Wärmepumpe in thermische Energie umgewandelt und in einem Warmwasserspeicher gespeichert. Der Warmwasserspeicher dient als dezentrale Wärmequelle für den lokalen Zweig des Fernwärmenetzes. Dieser Anwendungsfall befasst sich mit einem Szenario, in dem dieser Sektorkopplungsansatz und eine hohe PV-Durchdringung trotz eines schwachen elektrischen Verteilungsnetzes umgesetzt werden. Die daraus resultierende Belastung des Netzes wird durch die Implementierung eines Spannungsreglers reduziert, der die Ansteuerung der Wärmepumpe auf der Grundlage von lokalen Spannungsmessungen koordiniert.

4.2.3 Systemebene

4.2.3.1 Use case: Prüfung von IoT Plattformen

Ziel: Testen der realen Implementierung von IoT Plattform für (Multi-)Energienetze auf einer Kombination aus Hardware-Testumgebung und Simulationsmodell

Involvierte Domänen: Fernwärmenetz; elektrisches Netz; Gebäude; IoT-Plattform;

Beschreibung: Die Integration von verteilten Energieressourcen wie Prosumern in integrierte Wärme- und Stromnetze erfordert eine koordinierte Datenerfassung, Steuerung / Regelung, Visualisierung, Schnittstellen zum Markt, etc. auf Systemebene. IoT-Plattformen, auf denen mehrere unterschiedliche Anwendungen zu diesem Zweck eingesetzt werden (siehe Abschnitt 3.1), spielen dabei eine wichtige Rolle. Dieser Anwendungsfall zielt auf das Testen solcher IoT-Plattformanwendungen unter Verwendung von Simulationsmodellen ab, die eine virtuelle Nachbildung eines bestimmten integrierten Netzwerks darstellen, um das Verhalten des physischen Systems zu emulieren. Auf diese Weise können alle Arten von Tests durchgeführt werden, bevor die digitale Plattform oder einzelne Anwendungen davon im Feld eingesetzt werden.

4.2.3.2 Use case: Cyber-physikalische Sicherheitsbewertungen kritischer Energieinfrastrukturen für die Sektorkopplung

Ziel: Erstellung eines erweiterten Cyber-Range¹⁸-Cockpits für die Schulung von Betreibern zur Analyse von Ausfallszenarien in hybriden thermisch-elektrischen Verteilungssystemen, die durch Cyber-Sicherheitsangriffe verursacht werden

Involvierte Domänen: elektrischer Bereich (Netzwerk & Komponenten), thermischer Bereich (Netzwerk & Komponenten), Fernerkundungseinheiten, IT-Infrastruktur, virtuelle Ebene (SCADA SW, Cloud-Lösungen, etc.)

Beschreibung: Systemkonfigurationen wie z.B. den lokalen Verbrauch von überschüssiger Energie aus der PV-Produktion mit Hilfe von dezentralen Wärmepumpen in der Fernwärme zu nutzen bestehen aus einer Vielzahl von Komponenten, die direkt oder indirekt voneinander abhängig sind. Alle diese Komponenten sind (oder werden) einer Cyber-Ebene ausgesetzt,

¹⁸ AIT's Cyber Range is a virtual environment that supports cyber security training, cyber security exercises, testing of contingency plans or incident response processes to enhance the resilience and increase cyber security capabilities of organizations. <https://cyberrange.at/>

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

wodurch sich potenzielle Angriffsflächen für die angeschlossene kritische Energieinfrastruktur ergeben. Um potenzielle Angriffe und Gegenmaßnahmen in der Cyber-Ebene zu untersuchen, müssen alle sicherheitskritischen Komponenten (IT-Ausrüstung, Sensoren, Aktoren usw.) wie in einer realen Implementierung zur Verfügung stehen, um eine sinnvolle Validierung zu ermöglichen. Für eine vollständige Untersuchung müssen die physikalischen Auswirkungen auf das hybride Energiesystem in einer Testumgebung bewertet werden. Funktional relevante, aber nicht sicherheitsrelevante Teile des Systems, die nicht direkt als Hardware im Labor implementiert werden können (z.B. Fernwärmenetz), können als "virtuelle" Komponenten integriert werden (Software-Simulation).

4.3 Ausgewählte use cases

Um das Konzept des DigitalEnergyTestbed testen zu können, wurde ein DigitalEnergyTestbed Prototyp erstellt. Dieser soll die grundlegenden Funktionalitäten und dessen Einsatz in charakteristischen Anwendungsfällen demonstrieren. Dafür wurden aus den im Abschnitt 4.2 entwickelten use cases folgende ausgesucht:

- Hardware-in-the-loop für Fernwärme-Übergabestationen: Der use case inkludiert die folgenden zwei charakteristische Kernelemente des DigitalEnergyTestbed Grundkonzepts, einen Laborprüfstand für Fernwärmeübergabestationen (Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), der über LabLink mit einem Gebäudemodell (Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) gekoppelt ist.
- Untersuchung der koordinierten Spannungsregelung für gekoppelte thermisch-elektrische Verteilungssysteme mit Power-to-Heat-Anlagen: Dieser Anwendungsfall demonstriert wie eine Digitalisierungslösung für ein integriertes thermisch-elektrisches Energiesystem validiert werden kann.
- Testen der Regelung einer Fernwärmeübergabestation mit Booster-Wärmepumpe mittels Controller-Hardware-in-the-loop-Simulation: Dieser Anwendungsfall demonstriert die Flexibilität des entwickelten Konzepts hinsichtlich der Einbindung von digitalen Zwillingen

5 Use case 1: Hardware-in-the-loop für Fernwärme-Übergabestationen

5.1 Einführung

Im ersten Anwendungsfall wird die Kopplung zwischen AIT Fernwärmeübergabestationsprüfstand mit integrierter Fernwärmeübergabestation und einem Gebäudemodell realisiert, siehe Abbildung 5-1. In Abbildung 5-2 ist der schematische Datenfluss zwischen virtuellem Gebäudemodell (links), realem Prüfstand (rechts) über das Automatisierungssystem von B&R (Mitte) abgebildet.

Von Seiten des Gebäudemodells werden die durch eine Heizkurve berechnete Vorlauftemperatur ($T_{\text{flow,SP}}$), die durch das Modell errechnete Rücklauftemperatur ($T_{\text{return,SP}}$) und der durch Heizungsregler vorgegebene Massenstrom (m_{SP}) an den Prüfstand übermittelt. Die dort verbauten Regler erhalten diese Werte als Sollwerte, die sich zu erreichen versuchen. Das Gebäudemodell erhält vom Prüfstand die tatsächliche Vorlauftemperatur ($T_{\text{flow,act}}$) als Rückgabewert.

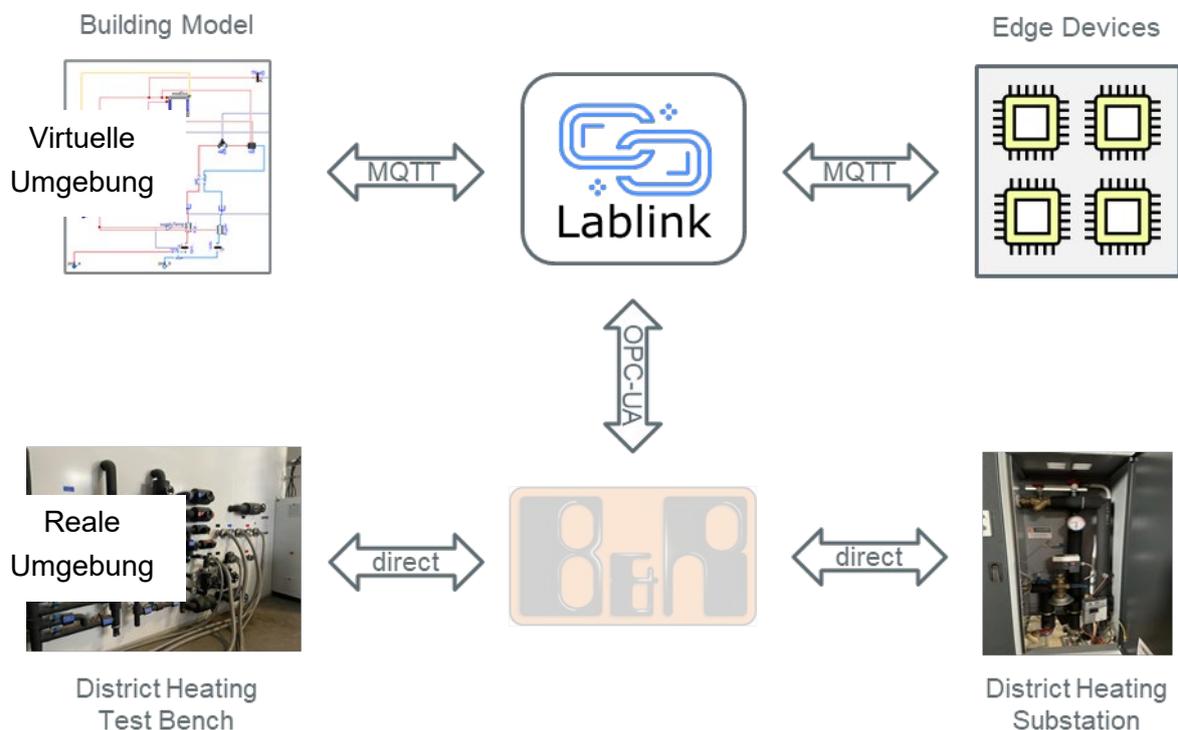


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung der Anbindung thermischer Komponenten über Lablink

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

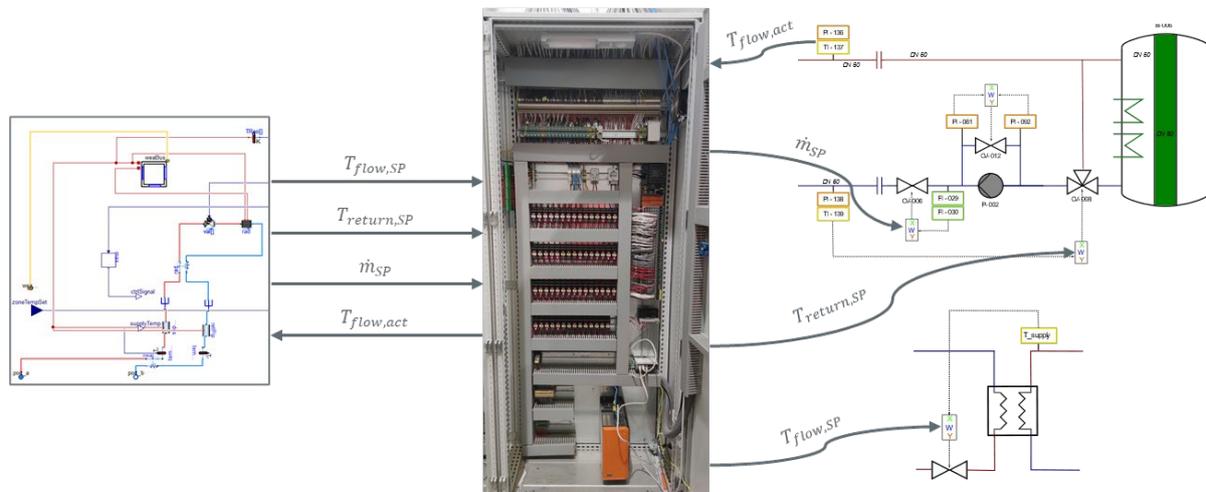


Abbildung 5-2: Schematische Darstellung der zwischen Gebäudemodell und realem Prüfstand ausgetauschten Daten

5.1.1 Laborprüfstand für Fernwärmeübergabestationen

Grundsätzlich ist der gesamte Prüfstand über ein Mess-, Regel- und Automatisierungssystem von B&R Automation an das firmeninterne Netzwerk angebunden. Die Kommunikation erfolgt über OPC-UA¹⁹ bzw. werden Messdaten in einer SQL-Datenbank gespeichert. Für den Einsatz des Prüfstandes im DigitalEnergyTestbed mussten jedoch einige vorbereitende Maßnahmen getroffen werden: Einerseits musste die Kommunikation zwischen realem Prüfstand und virtueller Software sichergestellt werden, andererseits mussten diverse Änderungen an der Regelung durchgeführt werden, da der Prüfstand für Normierungen geplant und gebaut wurde. Weiteres musste der Fernwärmeprüfstand für den Fernzugriff über OPC-UA kommissioniert werden, um eine Kopplung mit dem Gebäudemodell zu ermöglichen. Im Zuge dieser Kommissionierung wurden erste Prüfungen durchgeführt, um die Reaktion des Prüfstandes auf sich dynamisch ändernde Randbedingungen zu testen. Details sind in Anhang 1 beschrieben.

Der Prüfstand besitzt einen Primär- und einen Sekundärkreis. Der Primärkreis dient dazu, das Verhalten eines Fernwärmenetzes zu simulieren und bietet die Möglichkeit Massenströme, Drücke und Temperaturen in einem für Fernwärmenetze realistischen Rahmen direkt vorzugeben. Der Sekundärkreis wird zur Abbildung der Abnahmeseite genutzt, wobei dieselben Messwerte wie bei der Primärseite, jedoch in für Abnahmeseiten realistische Rahmen, gesetzt werden können.

¹⁹ <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

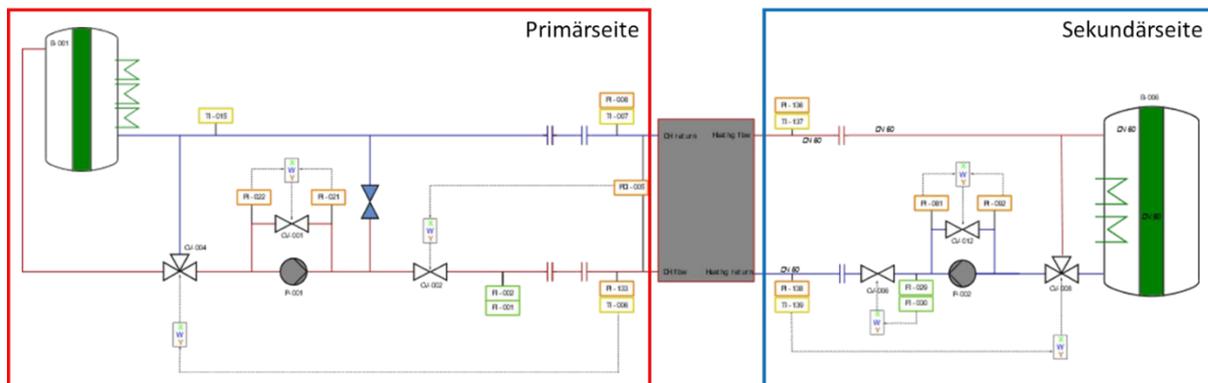


Abbildung 5-3: Schematische Darstellung der Laborinfrastruktur mit eingebundener Fernwärmeübergabestation

Zu beachten ist, dass alle für die Regelung relevanten Komponenten abgebildet, nicht relevante Komponenten, wie z.B. Filter

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Das **3-Wege-Ventil** mischt das vom Speicher bereitgestellte Medium mit jenem aus dem Rücklauf der Fernwärmeübergabestation, um den gewünschten Sollwert am Vorlauf der Fernwärmeübergabestation zu erreichen. Innerhalb dieses Projektes wurden dabei Temperaturbereiche von 40°C – 95°C getestet, wobei natürlich zu beachten ist, dass bei höheren Abnahmeleistungen der Speicher zügiger entladen und somit die Anzahl der Versuche reduziert wird.

Das **2-Wege-Ventil** dient in diesem Aufbau der Regelung des Differenzdrucks zwischen Ein- und Austritt an der Fernwärmeübergabestation. Dabei können Differenzdrücke von 1bar – 6bar erreicht werden, was für Fernwärmenetze typischen Druckdifferenzen entspricht. Durch eine Änderung der Druckdifferenz wird ebenfalls der Massenstrom beeinflusst, wobei Werte von 0,1 – 6,25 kg/s erreicht werden können.

Zusätzlich sind in der Abbildung eine Umwälzpumpe und ein parallel zu dieser Pumpe geschaltetes Ventil ersichtlich. Beide Komponenten werden jedoch auf einen fixen Wert (Drehzahl, Druckdifferenz) gesetzt. Filter, Rückschlagklappen, Sicherheitsventile, udgl. wurden im Schema nicht berücksichtigt, da sich dadurch die Regeldynamik nicht wesentlich ändert. Die gewünschte Vorlauftemperatur wird durch die Nutzung eines thermischen Speichers und eines 3-Wege-Ventils erreicht. Dabei wird mit dem 3-Wege-Ventil die quasi-konstante Speichertemperatur mit dem Rücklauf aus der Fernwärmeübergabestation gemischt

5.1.1.2 Sekundärseite

Über die Sekundärseite des AIT Fernwärmeübergabestationsprüfstandes wird das Fernwärmenetz abgebildet. In Abbildung 5-5 ist eine vereinfachte Darstellung der Sekundärseite ersichtlich.

Die Anforderungen an die Sekundärseite bestehen darin, für die Fernwärmeübergabestation eine definierte Rücklauftemperatur und einen definierten Massenstrom sicherzustellen. Die gewünschte Vorlauftemperatur am Austritt der Fernwärmeübergabestation wird über ebendiese und nicht über den Prüfstand an sich geregelt. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind erneut drei Komponenten(gruppen) verbaut:

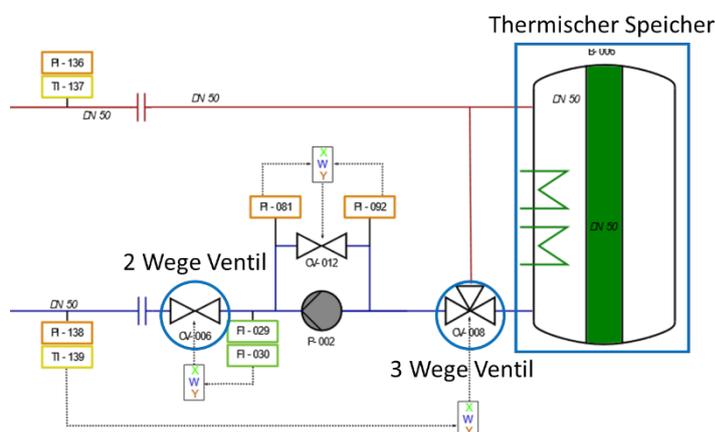


Abbildung 5-5: Vereinfachte Darstellung der Sekundärseite des AIT Fernwärmeprüfstandes

Der **thermische Speicher** wurde im Zuge dieses Projektes auf bis zu 10°C abgekühlt. Die Abkühlung erfolgt hierbei über ein Kälteverteilnetz. Über eine separate Solepumpe und einen Wärmetauscher wird dabei die Speichertemperatur kontinuierlich auf dem gewünschten Sollwert gehalten. Der Puffertank dient zur Stabilisierung des Systems und zur Speicherung der während eines Versuchslaufes notwendigen Energie. Durch eine entsprechende Positionierung und Ausführung der Ein- und Auslassstutzen wird eine Temperaturschichtung erreicht. Das Gesamtvolumen des Speichers beträgt 5000L.

Das **3-Wege-Ventil** mischt das vom Speicher bereitgestellte Medium mit jenem aus dem Rücklauf der Fernwärmeübergabestation, um den gewünschten Sollwert am Rücklauf der Fernwärmeübergabestation zu erreichen. Dieser Sollwert wird vom Gebäudemodell berechnet und an den AIT Fernwärmeübergabestationsprüfstand übergeben. Innerhalb dieses Projektes wurden dabei Temperaturbereiche von 15°C – 60°C getestet. Dies entspricht für Gebäude üblichen Rücklauftemperaturen, wobei natürlich auf das Heizungsverteilsystem, den Gebäudestandard, etc. geachtet werden muss.

Das **2-Wege-Ventil** dient in diesem Aufbau der Regelung des durch das Gebäudemodell vorgegebenen Massenstromes, wobei das verwendete Messequipment für Werte von 0,1 – 6,25 kg/s mit einer hinreichenden Genauigkeit geeignet ist. Zu beachten ist, dass das dargestellte einzelne Ventil repräsentativ für die parallele Schaltung mehrerer Ventile ist. Im vorliegenden Projekt wurde jedoch nur das Ventil zur Feinregelung genutzt, da die eingestellten Massenströme bei unter 0,5kg/s lagen.

Wie bereits auf der Primärseite sind auch auf der Sekundärseite eine Pumpe und ein parallel geschaltetes Ventil verbaut, die auf eine fixe Drehzahl und eine fixe Druckdifferenz eingestellt werden. Filter, Rückschlagklappen, Sicherheitsventile, udgl. wurden im Schema nicht berücksichtigt, da sich dadurch die Regeldynamik nicht wesentlich ändert. Die gewünschte Rücklauftemperatur wird durch die Nutzung eines thermischen Speichers und eines 3-Wege-Ventils erreicht. Dabei wird mit dem 3-Wege-Ventil die quasi-konstante Speichertemperatur mit dem Vorlauf aus der Fernwärmeübergabestation gemischt.

5.1.1.3 Fernwärmeübergabestation

Die Fernwärmeübergabestation dient zur Entkopplung des Fernwärme- und des Abnehmerkreislaufes sowie zur Messung der übertragenen Leistung und der leistungsbezogenen Regelung. In Abbildung 5-6 ist eine vereinfachte Darstellung der Fernwärmeübergabestation ersichtlich.

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

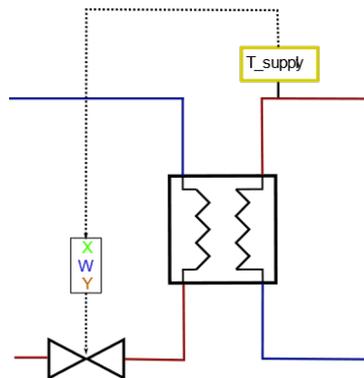


Abbildung 5-6: Vereinfachte Darstellung der Fernwärmeübergabestation des AIT Fernwärmepfandes

Die Anforderungen an die Fernwärmeübergabestation bestehen darin, in einigen Fällen das Fernwärme- vom Abnahmenetz über einen Wärmetauscher zu trennen und eine definierte Vorlauftemperatur für die Abnahmeseite sicherzustellen.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wird auf der Primärseite des Wärmetauschers ein **2-Wege-Ventil** genutzt. Dieses reguliert den Durchfluss durch den Wärmetauscher und regelt somit die Austrittstemperatur sekundärseitig. Weitere Komponenten, wie Rückschlagventile oder Wärmemengenzähler, sind in der vereinfachten Abbildung nicht dargestellt.

Der Auslegungspunkt für den verbauten **Gegenstromwärmetauscher** liegt primärseitig bei 90°C / 60°C, sekundärseitig bei 55°C / 75°C bei einer übertragenen Leistung von 42kW.

5.1.2 Gebäudemodell

Das zweite wesentliche Element im use case 1 ist das virtuelle Gebäudemodell, das mit dem Prüfstand gekoppelt wird. Bei dem gewählten Gebäude handelt es sich um ein 4-stöckiges Wohngebäude mit 860 m² Brutto-Geschossfläche. Das Gebäude wurde so parametrisiert, dass die Nenn-Heizleistung mit 30 kW der maximal für den Prüfstand möglichen Dauerleistung entspricht. Die wichtigsten Kennzahlen sind in Tabelle 6-1 zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Wichtigste Kennzahlen und Informationen zum Gebäudemodell.

Nenn-Heizleistung	30 kW
Brutto-Geschossfläche	860 m ²
Nenn-Durchfluss	0,50 kg/s
Anzahl Stockwerke	4
Stockwerkshöhe	3,0 m
Anzahl Zonen	8
Übergabekomponenten	Heizkörper
Hydraulische Schaltung	Beimischschaltung
Modell	
Modellersprache	Modelica
Modellierungsumgebung	Dymola
Komponentenbibliothek	Modelica Buildings Library + eigens entwickelte Komponenten
Inputs	- Sekundärseitige Vorlauftemperatur (aus der Übergabestation) in °C
Outputs	- Sekundärseitige Rücklauftemperatur (zur Übergabestation) in °C - Sekundärer Massenstrom in kg/s

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

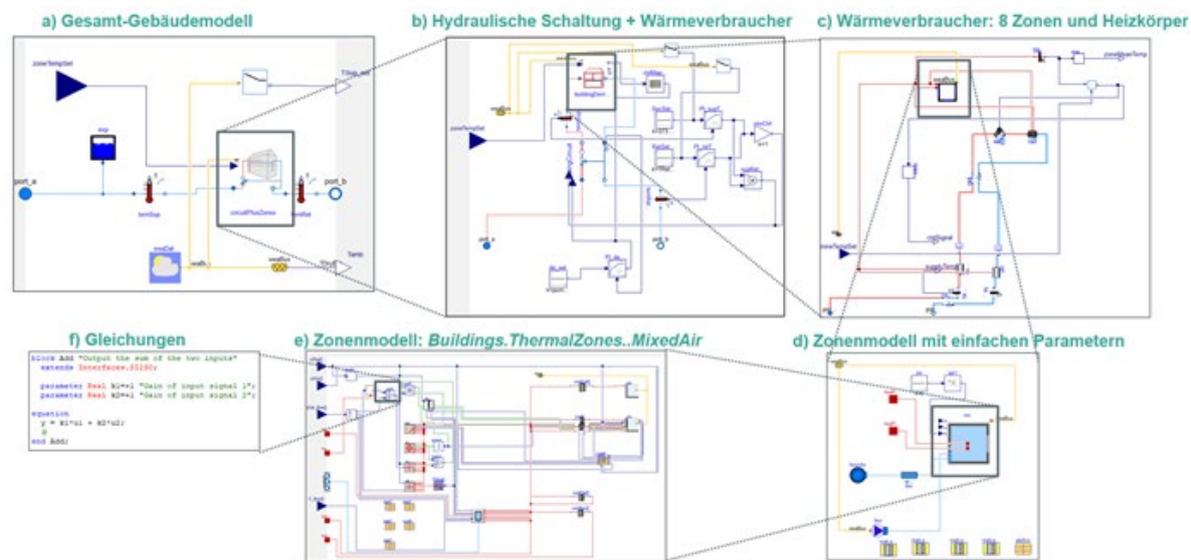


Abbildung 5-7: Überblick Modellstruktur

Es wurden für das Gebäudemodell sowohl Komponenten aus der Modelica Buildings Library, als auch eigens für dieses Projekt entwickelte Modelle eingesetzt. Die hierarchische Modellstruktur ist in Abbildung 5-7 veranschaulicht: das Gesamt-Gebäudemodell (a) beinhaltet neben Schnittstellen (u.a. zu einem Wetterdatensatz), Temperatursensoren und Ausdehnungsgefäß das Hauptmodell von Gebäude und Heizungsanlage (b). Dieses Hauptmodell ist zusammengesetzt aus einer hydraulischen Schaltung (Beimischschaltung), einem Modell (c) für die Wärmeverbraucher und entsprechender Regelungslogik. Das Modell für die Wärmeverbraucher (c) besteht aus mehreren Zonen mit den jeweiligen Heizkörpern, die als „Arrays“ abgebildet sind. Für jede Zone wird das Zonenmodell mit vereinfachter Parametrierung (d) verwendet, das das eigentliche Zonenmodell (e: Buildings.ThermalZones.Detailed.MixedAir) beinhaltet. Am unteren Ende der Hierarchie werden einfache Modelle mit Gleichungen (f) abgebildet.

Der Modelieransatz wurde so festgelegt, dass das Modell den Anforderungen von Use Case 1 (Kopplung mit einer realen Übergabestation) und anderen HIL Anwendungsfällen entspricht. Es wurden dabei möglichst offene, bewährte Standards und Tools ausgewählt. In Anhang 4 werden die Details der Modellentwicklung beschrieben.

5.1.3 Schnittstelle für die Kopplung

Export als FMU: Die Gebäudesimulationsmodelle werden als Functional Mockup Units (FMUs) exportiert. Die Verwendung der Functional Mockup Interface (FMI) entspricht einer standardisierten Schnittstelle, die den Austausch mit zahlreichen Tools unterstützt. Zu Testzwecken kann auch die exportierte FMU in Dymola wieder geladen werden und – mit unterschiedlichen Modellen verknüpft – simuliert werden.

Lablink: Die exportierten FMUs können mit dem Lablink FMU-Client in Lablink eingebunden werden. Ein praktischer Weg für die Ableitung von Lablink-Client-Konfigurationen aus Simulationsmodellen ergibt sich, wenn die relevanten Inputs und Outputs in jedem Modell als

Modelica-Inputs (*Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput*) und Outputs (*Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput*) definiert sind. Diese Inputs und Outputs können (z. B. mit der Bibliothek *pyfmi*²⁰) programmatisch identifiziert werden und für die Konfiguration der Lablink FMU Clients und Lablink Plotter Clients, z. B. unter der Annahme, dass alle Outputs geplottet werden. Die entsprechenden „datapoint bridges“ können automatisch konfiguriert werden. Im Falle, dass mehrere als FMU exportierte Simulationsmodelle verknüpft werden, kann auch die Annahme getroffen werden, dass die zu verbindenden Variablen – Output aus einem Modell und Input in ein anderes Modell – gleich benannt werden. Mit dieser Annahme können auch die entsprechenden Verknüpfungen (*datapoint bridges*) automatisch vorbereitet werden. Eine solche automatisierte Konfiguration ist umso nützlicher, wenn die Zahl der zu verknüpfenden Variablen höher ist, z. B. wenn mehrere Zonen einzeln betrachtet werden.

5.2 Implementierung im DigitalEnergyTestbed

Die Kopplung der realen und virtuellen Umgebung mit Lablink erfolgt wie in 4.1 beschrieben. Es kommen folgende Clients zum Einsatz:

- FMU-Client für die Einbindung des Gebäudemodells
- OPC-UA-Client zur Anbindung der Leittechnik des Fernwärmeübergabestation-Prüfstands
- Plotter-Clients zur Darstellung von Soll- und Messwerten zur Funktionsüberwachung

Abbildung 5-8 zeigt schematisch, wie die Systemkonfiguration aus Abbildung 5-2 in ein tatsächliches Lablink-Setup für einen Prüfstand überführt wurde.

²⁰ <https://github.com/modelon-community/PyFMI>

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

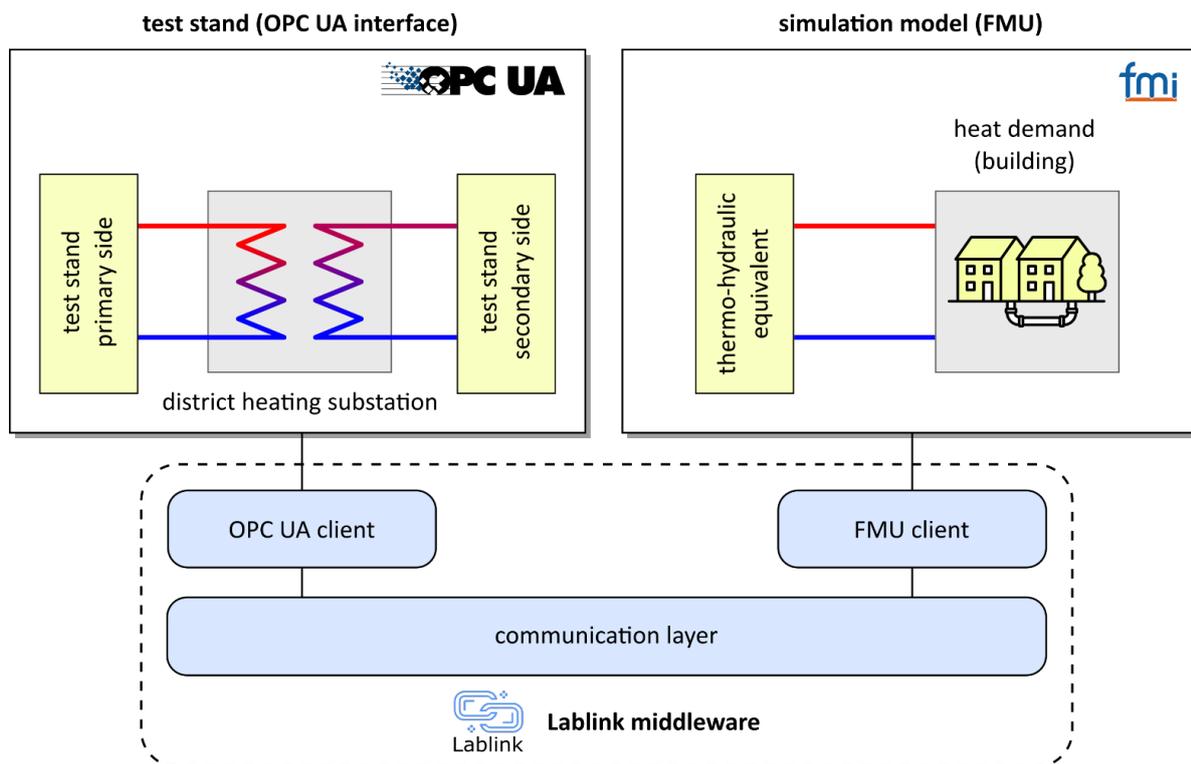


Abbildung 5-8: Implementierung von Anwendungsfall 1 für den Prüfstand.

5.3 Ergebnisse

Die Simulations- und Messergebnisse der getesteten Anwendung von use case 1 sind in Abbildung 5-9 bis Abbildung 5-11 ersichtlich. Abhängig von den Eigenschaften (z.B. Orientierung im Gebäude, interne Wärmegewinne) der jeweiligen im Simulationsmodell definierten Gebäudezone ergibt sich für jede Gebäudezone ein unterschiedlicher Verlauf der Zonenheizlast (siehe Abbildung 5-9). Diese liegt dabei zwischen 1100 W (Zone 1) und 3300 W (Zone 2). Die gesamte Gebäudeheizlast erreicht bis zu 23 kW.

Bei der zur Anwendung gekommenen Regelstrategie (PI-Regelung des Zonentemperaturen) wird der Sollwert des Massenstroms im Heizungskreislaufs (Sekundärkreis der Fernwärmeübergabestation) kontinuierlich an die Heizlasten der Gebäudezonen angepasst (siehe Abbildung 5-10). Die Kurve des gemessenen sekundärseitigen Massenstroms (m_{flow_sense}) weist eine geringfügige Abweichung vom aus der Gebäudesimulation vorgegebenen Sollwert (m_{flow_set}) auf. Diese ist auf die Trägheit der Regelstrecke zurückzuführen und wurde für hinreichend klein befunden. Der im linken Abschnitt der Grafik ersichtliche Ausschlag ist auf eine Optimierung der Einstellungen am Prüfstand während der aufrechten Kopplung von Prüfstand und Gebäudesimulation und somit während der Aufzeichnung der Soll- und Messwerte zurückzuführen.

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

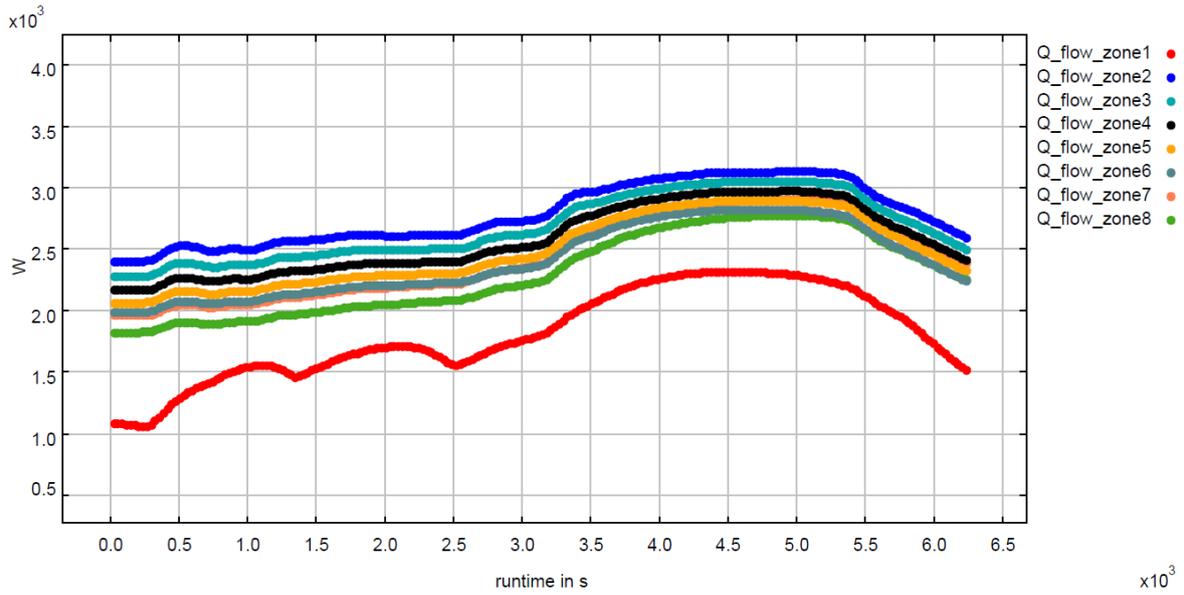


Abbildung 5-9: Heizlasten aller acht Gebäudezonen (Q_flow_zone1 bis Q_flow_zone8) des dynamisch simulierten Mehrfamilienhauses

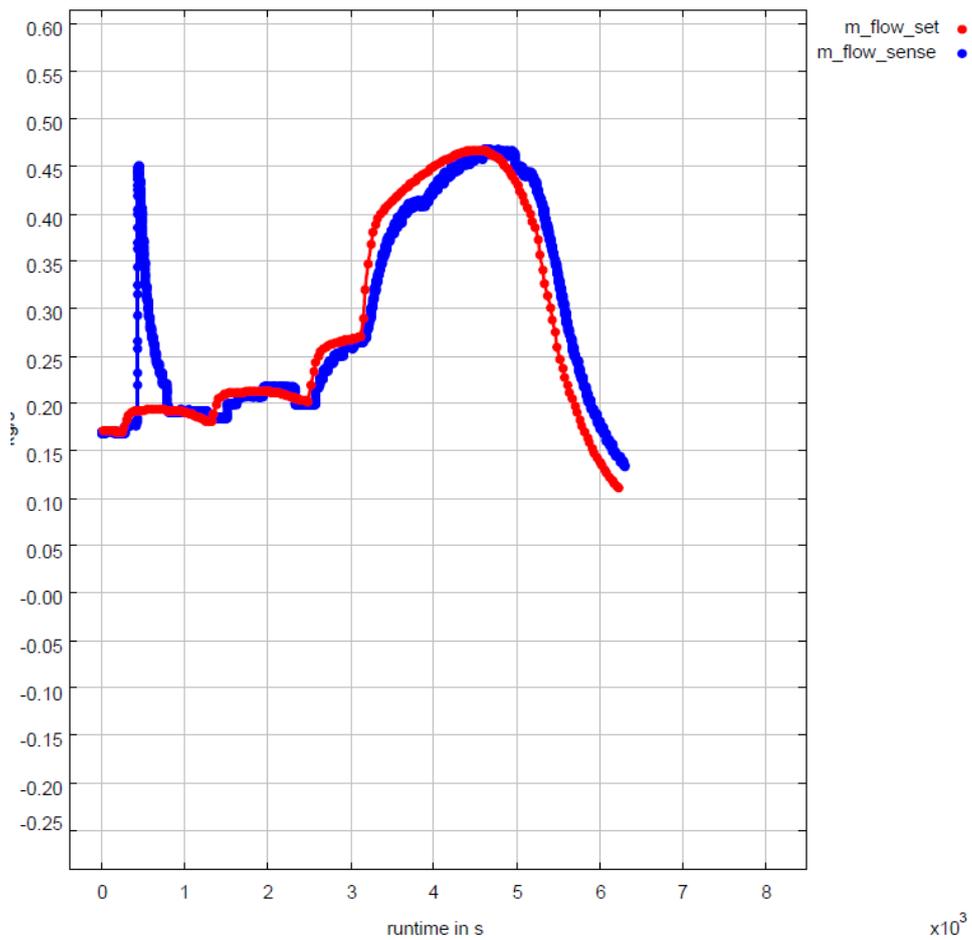


Abbildung 5-10: Gemessener sekundärseitiger Massenstrom (m_flow_sense) und Sollwert aus Gebäudesimulation (m_flow_set)

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Die Verläufe der gemessenen Vor- und Rücklauftemperaturen ($T_{\text{supply_sense}}$ und $T_{\text{return_sense}}$) sowie der aus der Gebäudesimulation übernommene Sollwert der Rücklauftemperatur ($T_{\text{return_set}}$) im Heizungskreislauf sind in Abbildung 5-11 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Messwertkurve der Sollwertkurve hinreichend exakt folgt. Die Abweichungen sind auch hier auf die Trägheit der Regelstrecke zurückzuführen und wurden für diesen Anwendungsfall für zulässig befunden. Die gemessene Vorlauftemperatur wird, wie in Abbildung 5-2 dargestellt, an die Gebäudesimulation übergeben und wirkt sich entsprechend auf die Berechnung der Sollwerte für Massenstrom und Rücklauftemperatur aus. Das Schwingungsverhalten zu Beginn der Kopplung ist ebenfalls auf die oben genannte Optimierung zurückzuführen.

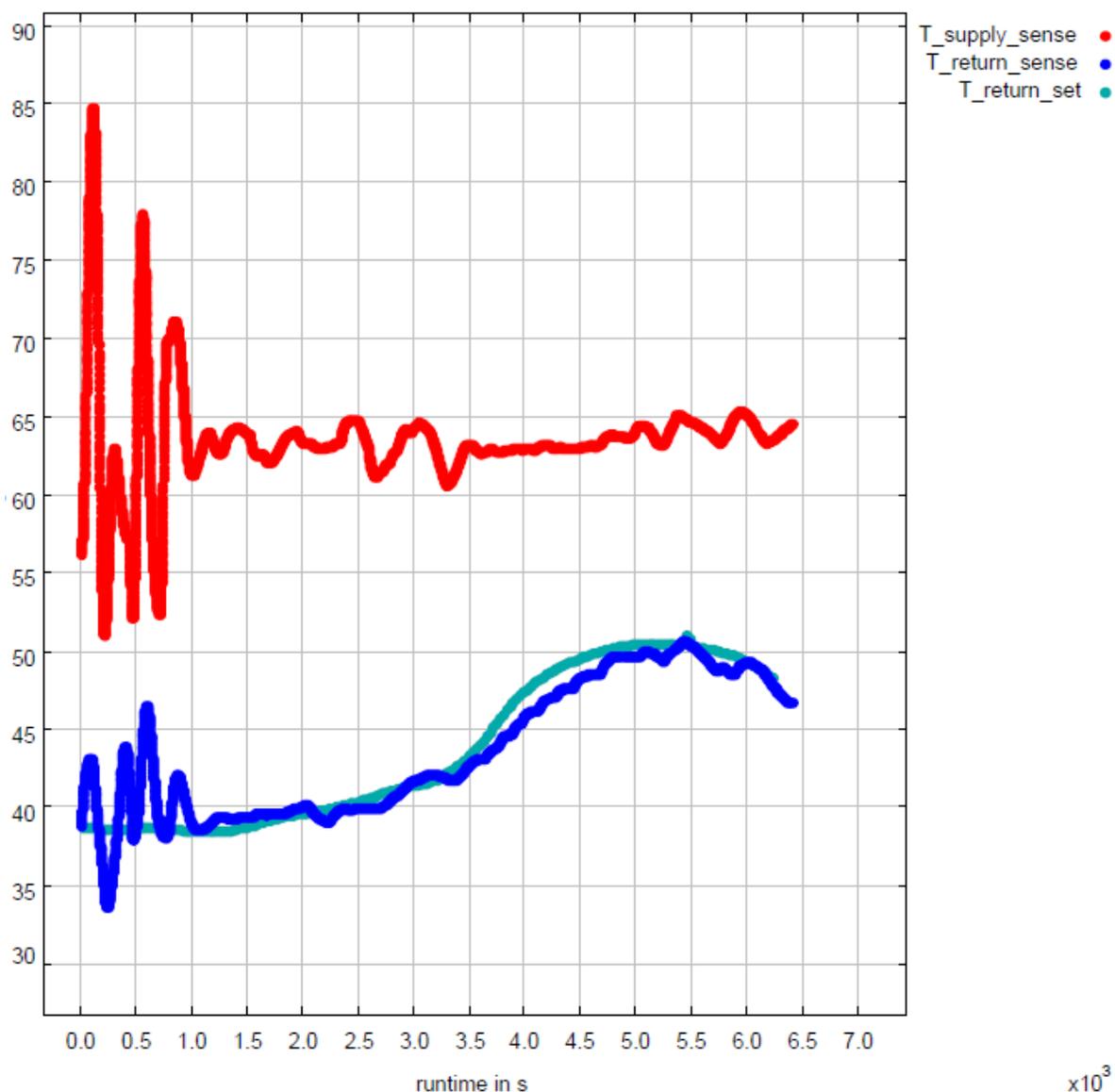


Abbildung 5-11: Gemessene Vorlauftemperatur ($T_{\text{supply_sense}}$) und Sollwert aus Gebäudesimulation ($T_{\text{return_set}}$) sowie gemessene Rücklauftemperatur im Sekundärkreis ($T_{\text{return_sense}}$)

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

Anhand der Tatsache, dass die Abweichungen zwischen Mess- und Sollwerten hinreichend klein sind und dass auch keine sonstigen unerwarteten Ereignisse beobachtet wurden, kann abgeleitet werden, dass im dargestellten Anwendungsfall (Use case 1) unter den in diesem Versuch gegebenen Rahmenbedingungen (z.B. hinsichtlich der Regelstrategie) die Kopplung von Prüfstand und Gebäudesimulation hinreichend gut funktioniert. Von einem gewissen Optimierungspotenzial bei der Regelung des Prüfstands ist grundsätzlich auszugehen. Des Weiteren kann festgehalten werden, dass die Heizleistung der Fernwärmeübergabestation und die Gebäudeheizlast im durchgeführten Versuch gut aufeinander abgestimmt waren, die Gebäudeheizlast war also zu jedem Zeitpunkt von der Fernwärmeübergabestation gedeckt.

6 Use case 2: Untersuchung der koordinierten Spannungsregelung für gekoppelte thermisch-elektrische Verteilungssysteme mit Power-to-Heat-Anlagen

6.1 Einführung

Use case 2 befasst sich mit einer Anwendung im Bereich der Sektorkopplung, bei der eine Power-to-Heat-Anlage als Kopplungspunkt zwischen einem Niederspannungsverteilungsnetz und dem lokalen Zweig eines Wärmenetzes dient. Durch den Verbrauch überschüssiger Energie von einer lokalen PV-Anlage kann die Power-to-Heat-Anlage gleichzeitig zur Verbesserung der Stabilität des Stromnetzes und zur Unterstützung der Versorgung des thermischen Netzes genutzt werden.

Das für diesen Anwendungsfall ausgewählte System ähnelt einem suburbanen Gebiet mit relativ vielen PV-Anlagen, in dem eine Energiegemeinschaft (*local energy community*, LEC) betrieben wird, um überschüssige PV-Erzeugung lokal für den Betrieb einer Power-to-Heat-Anlage zu nutzen, also den Eigenverbrauch zu maximieren. Allerdings kann eine hohe Stromerzeugung aus der PV-Anlage ohne entsprechend hohen Verbrauch auf der Verbraucherseite zu einem deutlichen Spannungsanstieg in Teilen des Stromnetzes führen. Daher ist eine Synchronisierung des Verbrauchs mit der Erzeugung notwendig, um die Netzqualität sicherzustellen und Störungen durch Überspannung zu vermeiden.

Das im Anwendungsfall betrachtete Gesamtsystem umfasst folgende Subsysteme und Komponenten (siehe auch Abbildung 7-1):

- Elektrisches Verteilnetz („ext power grid“), angeschlossen an ein externes Stromnetz
- Wärmenetz („ext. Heat grid“), verbunden mit einem externen Fernwärmenetz
- Verbrauch („consumer 1 und consumer 2“): 2 Verbraucher, die jeweils die aggregierten Lasten (elektrisch und thermisch) eines Stadtquartiers repräsentieren und an beide Netze angeschlossen sind
- Erzeugung: 2 PV-Anlagen (eine mit $150 \text{ kW}_{\text{el, peak}}$ und eine mit $50 \text{ kW}_{\text{el, peak}}$)
- Power-to-Heat-Anlage („heat pump“): Wärmepumpe (max. $100 \text{ kW}_{\text{el}}$) verbunden mit einem thermischen Tank (100 m^3), der in das Wärmenetz einspeist

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

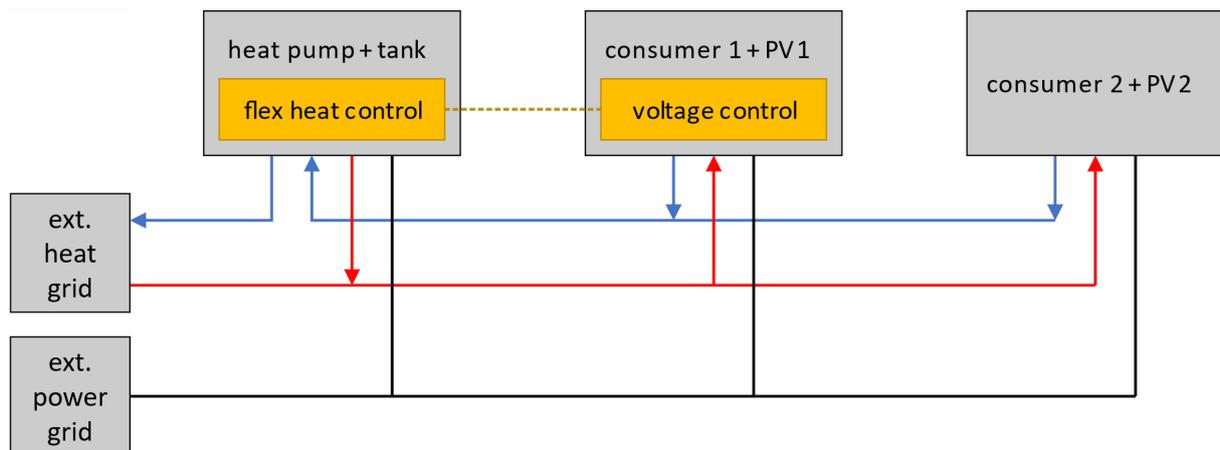


Abbildung 6-1: Übersicht des Gesamtsystems von Anwendungsfall 2.

Dieser Anwendungsfall basiert auf einem Benchmark-Szenario, das ursprünglich im Forschungsprojekt ERIGrid 2.0 entwickelt wurde, mit dem Ziel die Forschung und Entwicklung von Sektorkopplungsanwendungen für thermisch-elektrische Systeme zu beschleunigen (Widl, Wild, et al., 2022). Dabei war beabsichtigt, die Verwendung von Simulationskopplung (Co-Simulation) für die Analyse dieser Art von technischen Systemen anzuregen. Im Projekt DigitalEnergyTestbed wird dieser Ansatz weitergeführt und mithilfe eines Lablink-Setups in Echtzeit implementiert, mit Fokus auf die Validierung eines Regelungskonzepts für den gekoppelten Betrieb des elektrischen Verteilnetzes und des Fernwärmenetzes.

6.1.1 Regelungskonzept

Zur Synchronisierung des Verbrauchs mit der Erzeugung wird ein einfaches Regelungskonzept angewendet. Die Spannung an einem der elektrischen Netzknoten wird überwacht und die Leistung der Wärmepumpe wird entsprechend angepasst (steuerbare/flexible Last), um die Spannung innerhalb akzeptabler Grenzen zu halten. Der entsprechende Algorithmus für die Spannungsregelung ist in Abbildung 7-2 dargestellt.

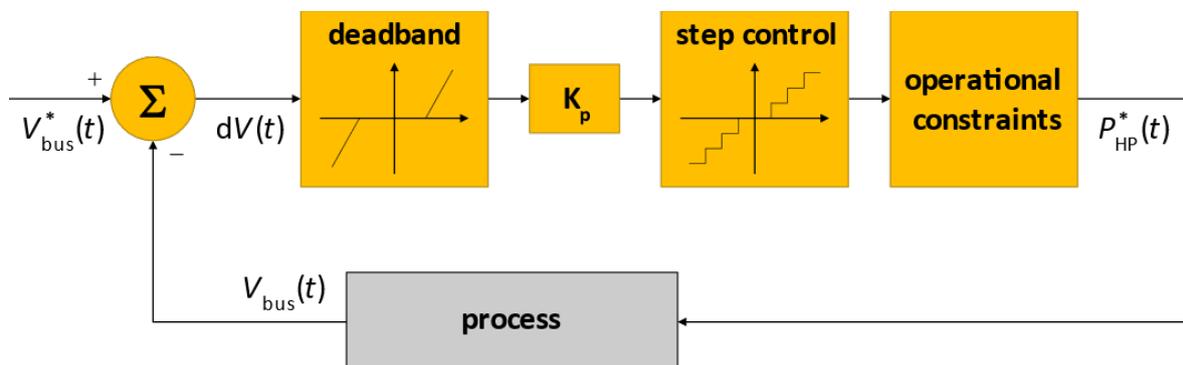


Abbildung 6-2: Algorithmus für die Spannungsregelung in Anwendungsfall 2.

Das thermische Teilsystem verwendet ebenfalls ein spezielles Regelungskonzept – das als „Flex Heat Controller“ bezeichnet wird – um das Wärmenetz und die Power-to-Heat-Anlage zu betreiben. Der in Abbildung 6-3 dargestellte Algorithmus entscheidet, ob die Wärmeversorgung vollständig über das externe Wärmenetz gedeckt wird oder ob die Power-to-Heat-Anlage durch Entladen des Speichers unterstützt. Bei Bedarf wird die Wärmepumpe

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

zum Laden des thermischen Speichers verwendet, wobei immer die Leistungsaufnahmeschwelle des Spannungsreglers eingehalten wird (d. h. die Leistungsaufnahme überschreitet nie den Sollwert, kann aber geringer sein).

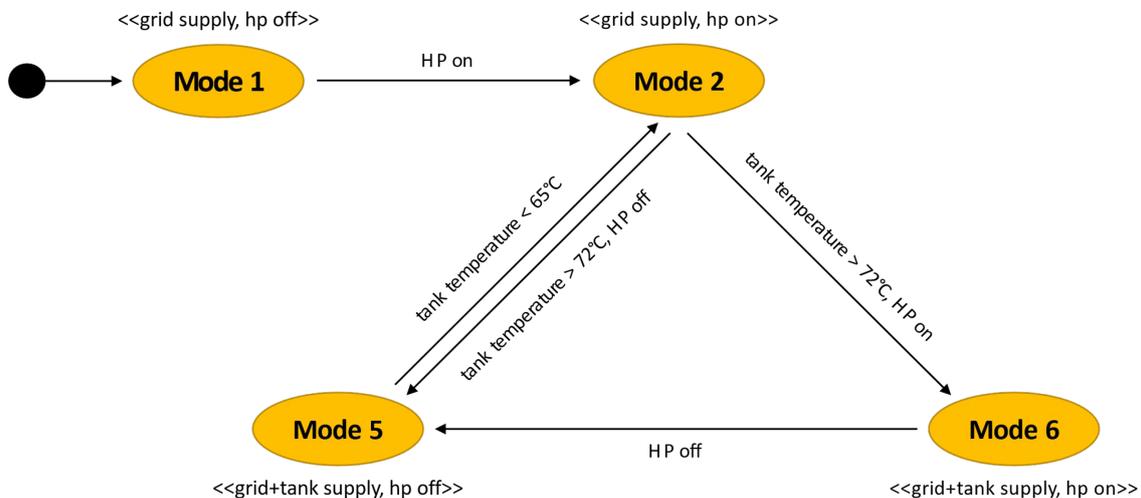


Abbildung 6-3: Algorithmus für die Regelung des thermischen Systems in Anwendungsfall 2.

Diese beiden Regelungskonzepte wurden als eigenständiges Programm implementiert (Python). Das beinhaltet einen einfachen Server, der über eine REST-kompatible Schnittstelle in regelmäßigen Zeitabständen (alle 3 Sekunden) aktuelle Messwerte ließt und neue Sollwerte vorgibt. Dieser digitale Regler kann mithilfe der REST-kompatiblen Schnittstelle von Lablink (Universal API-Client) ganz einfach an einen Prüfstand angebunden werden.

6.2 Implementierung im DigitalEnergyTestbed

6.2.1 Elektrisches Verteilnetz

Das elektrische Verteilnetz wird mit Hilfe eines Echtzeitsimulators (OPAL-RT) emuliert. Dabei handelt es sich um eine spezialisierte Hardware-Software-Lösung für die Berechnung elektromagnetischer Transienten und elektromechanische Simulationen großer und komplexer elektrischer Verteilnetze, sowie die Emulation von hochfrequenten Leistungselektronikschaltungen und anderer elektrischer Komponenten. Dieser Echtzeitsimulator wird mit einer gewöhnlichen Datenbank (Redis) synchronisiert, deren Synchronisationsrate für diesen Anwendungsfall angepasst ist (1 Sekunde). Die Anbindung an den Prüfstand erfolgt mithilfe von Lablink über einen Redis-Client.

6.2.2 Fernwärmenetz und Power-to-Heat-Anlage

Zur Modellierung des Fernwärmenetzes und der Power-to-Heat-Anlage wurde die quelloffene und öffentlich verfügbare Modelica-Bibliothek DisHeatLib verwendet. Die kritische Komponente dieses Modells ist die Wärmepumpe und deren Schnittstelle zum elektrischen Verteilnetz und dem Regler. Der Flex Heat Controller regelt den Betrieb der Wärmepumpe, indem er eine Hydraulikpumpe im Kondensatorkreislauf ansteuert. Diese Pumpe saugt kaltes Wasser vom Boden des Speichers an, das dann im Kondensator der Wärmepumpe erwärmt

und oben in den Speicher zurückgeführt wird. Der Massenstrom durch den Kondensatorkreislauf bestimmt den elektrischen Energieverbrauch der Wärmepumpe, und ihr Betrieb wird von einem PID-Regler geregelt. Das Modell implementiert diesen PID-Regler als Teil des thermischen Teilsystemmodells. Daher interagiert der PID-Regler kontinuierlich mit dem physikalischen Systemmodell, während nur der Sollwert des Reglers an Synchronisationspunkten mit Lablink aktualisiert wird. An diesen Synchronisationspunkten wird ebenfalls der aktuelle elektrische Verbrauch der Wärmepumpe von Lablink gelesen und an den OPAL-RT Echtzeitsimulator übermittelt. Das resultierende Modell wurde mit Dymola kompiliert und als FMU exportiert, die Anbindung an den Prüfstand erfolgt mithilfe von Lablink über einen FMU-Client.

6.3 Ergebnisse

Wie oben erläutert, ist Lablink so konfiguriert, dass es sich über den FMU-Client mit dem Simulationsmodell des thermischen Systems verbindet. Der Echtzeitsimulator wird mithilfe eines Redis-Clients eingebunden, der digitale Regler über eine REST-konforme Schnittstelle (Universal API-Client). Die Simulationen tauschen jede Sekunde miteinander Daten aus, der Regler bekommt alle 3 Sekunden aktuelle Messwerte (Spannung, Temperatur im thermischen Speicher) und ermittelt darauf basierend neue Sollwerte für die Wärmepumpe (elektrischer Energieverbrauch).

Die Echtzeitsimulation des elektrischen Verteilnetzes kann über eine grafische Oberfläche per Browser gesteuert werden, siehe Abbildung 6-4. Dort kann direkt Einfluss genommen werden auf den aktuellen Zustand des Verteilnetzes, z.B. durch Setzen von aktuellen Werten für den Verbrauch der elektrischen Lasten oder der Erzeugung der PV Systeme (siehe horizontale Schieberegler in Abbildung 6-4). Gleichzeitig ermöglicht Lablink die Visualisierung der aktuellen Messwerte im thermischen System und der Sollwertvorgaben durch den digitalen Regler, siehe Abbildung 7-5.

Dieser Prüfstand ermöglicht insgesamt eine intuitive Interaktion von BenutzerInnen mit dem simulierten System und dem digitalen Regler. Auch wenn das traditionelle Validierungsmethoden nicht ersetzen kann, bietet es EntwicklerInnen trotzdem eine wertvolle Möglichkeit das Gesamtsystem besser zu verstehen und Regelungsansätze zu verbessern.

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

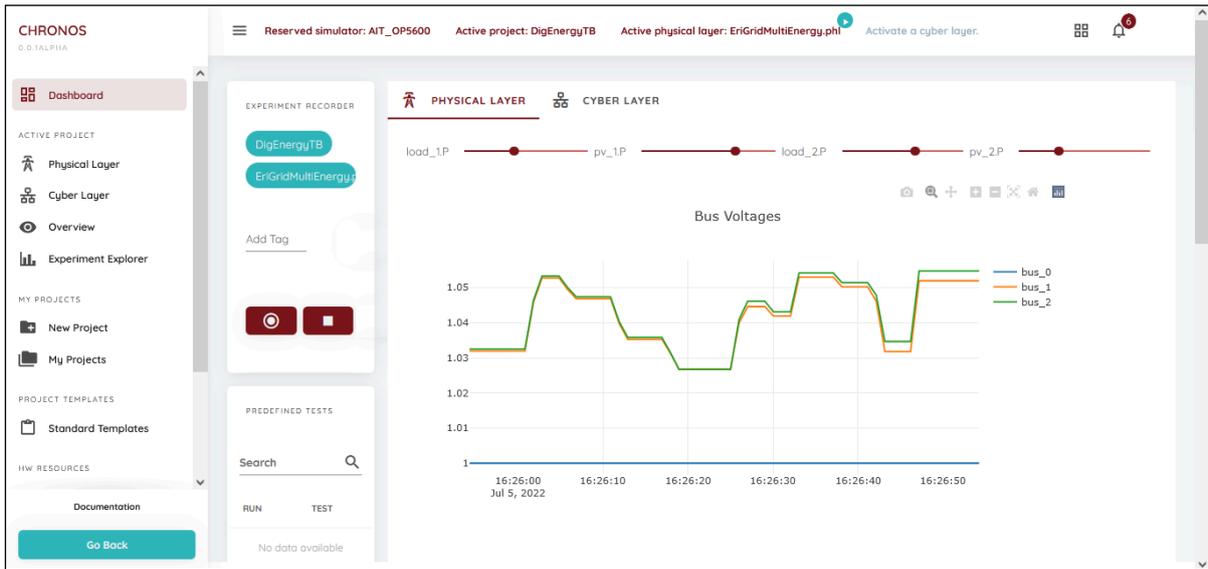


Abbildung 6-4: Grafische Oberfläche (Browser-Screenshot) für die Interaktion mit dem Echtzeitsimulator.

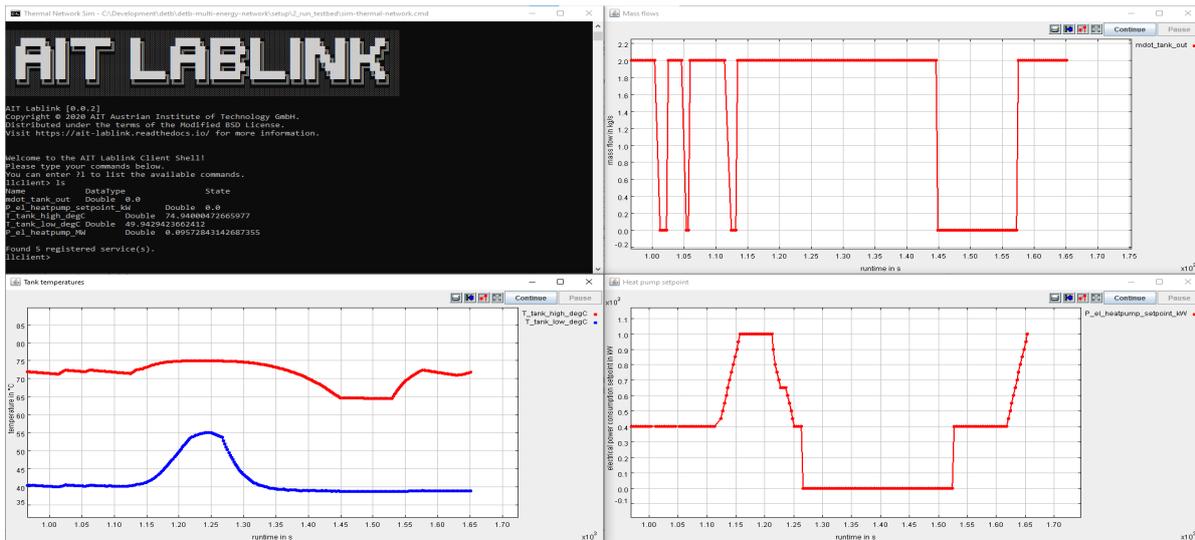


Abbildung 6-5: Screenshot des Betriebs von Lablink für Anwendungsfall 2, mit einer Lablink-Konsole (I.o.) und drei Plottern für die Visualisierung der aktuellen Betriebsbedingungen.

7 Use case 3: Testen der Regelung einer Fernwärmeübergabestation mit Booster-Wärmepumpe mittels Controller-Hardware-in-the-loop-Simulation

7.1 Einführung

Dieser Anwendungsfall bewertet die Auswirkungen eines Demand-Response-Betriebskonzepts (DR) auf ein Fernwärmesystem (Widl, Sporr, et al., 2022), gleichzeitig wird die Einbindung eines digitalen Zwillings für intelligente Fernwärmeanwendungen getestet.

In Zeiten eines hohen Wärmebedarfs kann der Energiefluss vom Fernwärmenetz zu den Verbrauchern reduziert werden, indem die Sekundärvorlauftemperatur der Übergabestationen um 5 °C abgesenkt wird. Die resultierende Temperaturdifferenz im Vergleich zur nominalen Vorlauftemperatur wird durch lokale Booster-Wärmepumpen kompensiert. Dieses DR-Betriebskonzept wird mithilfe eines einfachen Reglers implementiert, der ein (boolesches) Signal an die Übergabestationen sendet, um die Temperaturreduktion auszulösen. Abbildung 7-1 zeigt eine schematische Ansicht dieser Systemkonfiguration (wobei der Großteil des Fernwärmenetzes aus Platzgründen nicht dargestellt ist).

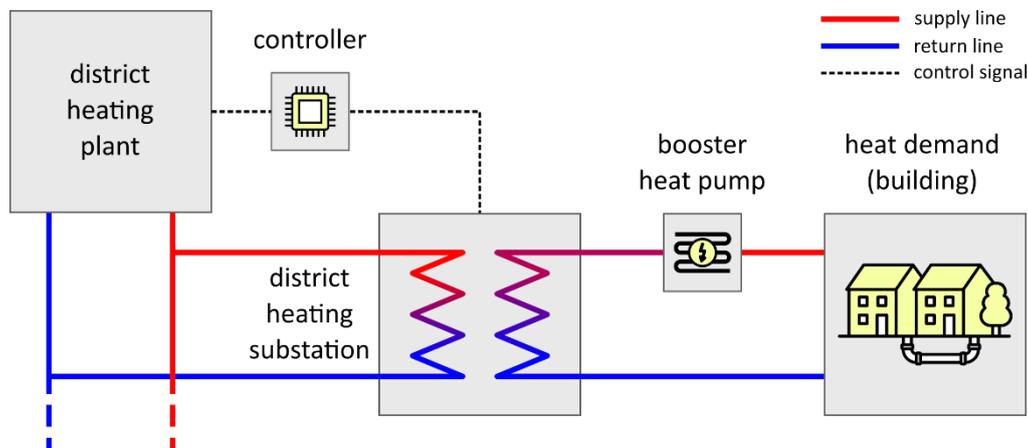


Abbildung 7-1: Schematische Übersicht der Systemkonfiguration von Anwendungsfall 3.

7.2 Implementierung im DigitalEnergyTestbed

Abbildung 7-2 zeigt, wie die Systemkonfiguration aus Abbildung 7-1 in ein tatsächliches Lablink-Setup für einen Prüfstand überführt wurde. Enthalten ist die Fernwärmeübergabestation als Prüfling im Prüfstand, die in Echtzeit mit detaillierten Simulationen ihrer Erzeugungsseite (Fernwärmenetz) und Verbrauchsseite (Booster-Wärmepumpe und Gebäude) verbunden ist.

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

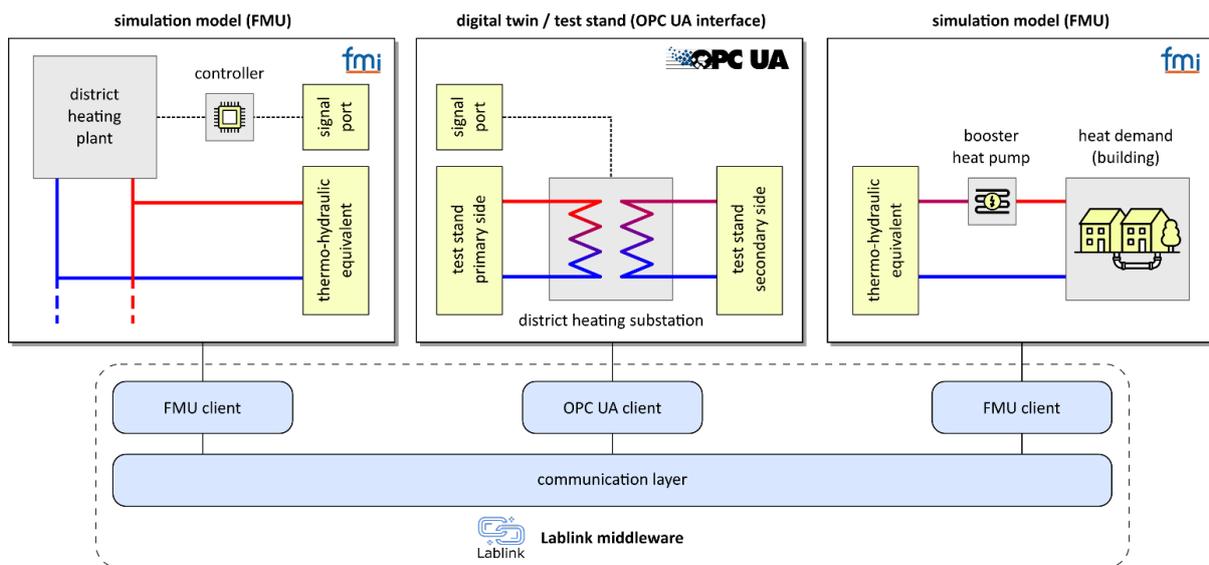


Abbildung 7-2: Implementierung von Anwendungsfall 3 für den Prüfstand.

7.2.1 Fernwärmenetz

Zur Modellierung des Fernwärmenetzes wurde die quelloffene und öffentlich verfügbare Modelica-Bibliothek DisHeatLib verwendet. Das resultierende Modell wurde mit Dymola kompiliert und als FMU exportiert. Eine kritische Komponente dieses Modells ist die Schnittstelle zur Primärseite der Fernwärmeübergabestation. Realisiert wurde dies durch ein sogenanntes *thermo-hydraulisches Äquivalent*, das analog zu einem elektrischen Ersatzschaltbild funktioniert (siehe Abbildung 7-2). Intern verwendet das thermohydraulische Äquivalent ein ideales Ventil- und Kühlermodell, um die Auswirkungen der (in diesem Modell nicht explizit modellierten) Übergabestation zu emulieren.²¹ Die aktuelle Vorlauftemperatur und die Druckdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf werden als Signale an sein Gegenstück (d. h. die Primärseite des Prüfstands) weitergegeben und die daraus resultierenden Massendurchfluss- und Rücklauftemperaturen als Sollwerte empfangen.

7.2.2 Booster-Wärmepumpe und Gebäude

Die IBPSA Modelica-Bibliothek wurde verwendet, um Modelle der Booster-Wärmepumpe und des Wärmebedarfs des Gebäudes (hier als Zeitreihe hinterlegt) zu implementieren. Das resultierende Modell wurde mit Dymola kompiliert und als FMU exportiert. Ähnlich wie beim Fernwärmenetzmodell wurde ein thermo-hydraulisches Äquivalent hinzugefügt, um das Modell mit der Sekundärseite der Fernwärmeübergabestation zu verbinden (siehe Abbildung 7-2).

7.2.3 Digitaler Zwilling

Zum Zeitpunkt der Implementierung dieses Anwendungsfalles war die Inbetriebnahme des Teststands für Fernwärmeübergabestationen für einen vollautomatisierten und

²¹ Die Komponentenmodelle für das thermo-hydraulische Äquivalent wurden im Paket *DisHeatLib.Utilities.ThermoHydraulicEquivalent* veröffentlicht.

unbeaufsichtigten Betrieb über längere Zeiträume noch nicht abgeschlossen. Daher wurde ein voll funktionsfähiger digitaler Zwilling des Prüfstands als Ersatz für die Durchführung einer vorläufigen Validierung verwendet.

Der digitale Zwilling besteht aus einem OPC-UA-Server, dessen Endpunkte den Sollwerten für den Prüfstand (primäre Vorlauftemperatur, sekundäre Rücklauftemperatur, sekundärer Massendurchfluss etc.) und Messwerten vom Prüfstand (primäre Rücklauftemperatur, sekundäre Vorlauftemperatur, primärer Massenstrom) entsprechen. Anstatt diese Endpunkte jedoch mit realer Hardware zu verknüpfen, wird intern ein thermo-hydraulisches Modell des Prüfstands ausgeführt, synchronisiert zur Echtzeit mit einer festen Kommunikationsschrittweite (10 Sekunden).

Auch hier wurde die IBPSA Modelica-Bibliothek verwendet, um das Modell zu implementieren, das dann mit Dymola als FMU exportiert wurde. Im Gegensatz zu den anderen, oben beschriebenen Modellen für diesen Anwendungsfall wurde für das digitale Zwillingmodell kein thermo-hydraulisches Äquivalent verwendet (siehe Abbildung 7-2). Stattdessen wird ein detailliertes Modell der Primär- und Sekundärseite verwendet, das die Dynamik des Prüfstands repliziert, die von seinen PID-Reglern, Ventilen, Zeitverzögerungen aufgrund von Rohrleitungstransport usw. stammt. Das digitale Zwillingmodell repliziert auch das Verhalten der Übergabestation als Reaktion auf das DR-Signal, bei dem ein PID-Regler den Massenstrom durch die Primärseite regelt, um eine konstante Vorlauftemperatur auf der Sekundärseite zu halten (entsprechend dem aktuellen Sollwert vom DR-Regler).

7.3 Ergebnisse

Wie oben erläutert, ist Lablink so konfiguriert, dass es sich über den FMU-Client mit den Simulationsmodellen sowie den OPC-UA-Client mit dem (digitalen Zwilling des) Prüfstand(s) verbindet. Die Clients tauschen alle 10 Sekunden Daten aus, was angesichts der Zeitkonstanten der betrachteten thermischen Prozesse ausreichend ist. Außerdem entspricht das in etwa der Totzeit der Automatisierungsschnittstelle des (realen) Prüfstands für Fernwärmeübergabestationen. Für Lablink entspricht der Aufbau mit dem digitalen Zwilling exakt einem Aufbau mit dem realen Prüfstand, da beide eine OPC-UA-konforme Kommunikationsschnittstelle verwenden.

Da die Implementierung dieses Anwendungsfalls vollständig virtuell ist (d. h. nur Simulationsmodelle und einen digitalen Zwilling umfasst), können die Ergebnisse des Prüfstands mit einem Referenzmodell verglichen werden. Das Referenzmodell vereint die Modelle des Fernwärmenetzes, der Booster-Wärmepumpe und des Gebäudes sowie der Fernwärmeübergabestation in einem monolithischen Modelica-Modell. Ein wichtiger Unterschied zwischen diesem Referenzmodell und der Implementierung des Prüfstands besteht darin, dass die Fernwärmeübergabestation direkt mit dem Rest des Systems verbunden ist (wie in Abbildung 7-1 dargestellt) und nicht mit der Sekundär- und Primärseite des Prüfstands (wie in Abbildung 7-2 dargestellt).

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Der Anwendungsfall wurde 48 Stunden lang getestet, wobei alle Komponenten parallel ausgeführt und alle 10 Sekunden asynchron Daten ausgetauscht wurden. Der Echtzeitbetrieb dieses rein virtuellen Prüfstands funktionierte problemlos, sowohl im Hinblick auf die Performance der Middleware als auch auf die Ausführung der Simulationsmodelle und des digitalen Zwillings. Abbildung 7-3 zeigt einen Screenshot des Betriebs von Lablink für Anwendungsfall 3. Abbildung 7-4, Abbildung 7-5 und Abbildung 7-6 zeigen Ergebnisse für den resultierenden Massenstrom auf der Vorlaufseite (Primärseite) der Übergabestation ab dem zweiten Tag der Testdauer.

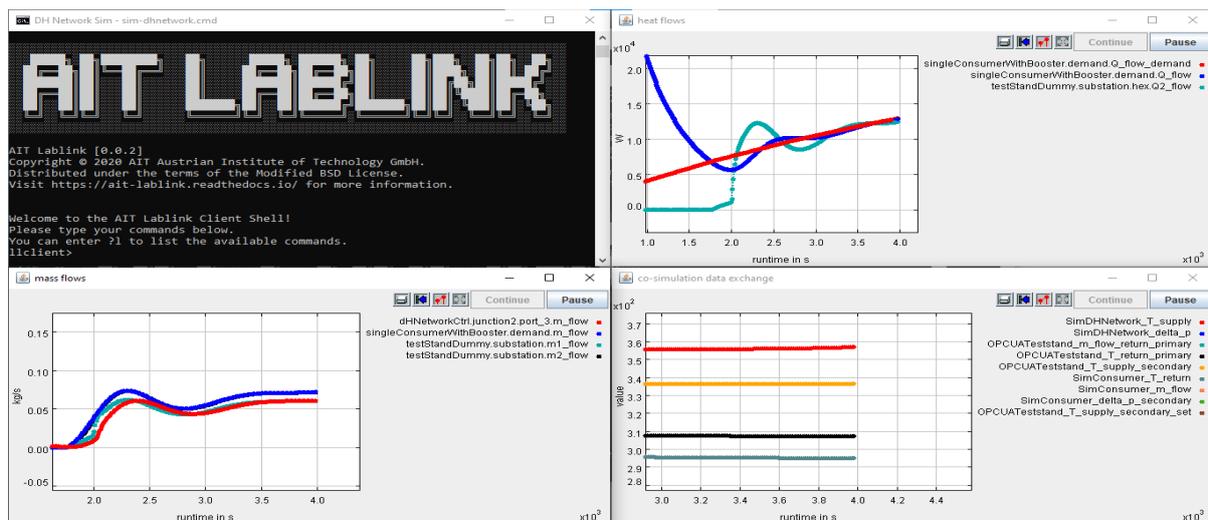


Abbildung 7-3: Screenshot des Betriebs von Lablink für Anwendungsfall 3, mit einer Lablink-Konsole (l.o.) und drei Plottern für die Visualisierung der aktuellen Betriebsbedingungen.

Abbildung 7-4 zeigt die gemessenen Massenströme der Vorlaufseite der Übergabestation (blaue Linie) als Reaktion auf das DR-Signal. Zum Vergleich ist auch der Massedurchfluss für den Fall ohne aktivierten DR-Regler dargestellt (gestrichelte schwarze Linie). Das Einschaltmuster zeigt, dass die Übergabestation den Massenstrom auf der Vorlaufseite – und anschließend den Wärmestrom durch den Wärmetauscher – reduziert, um die Versorgungstemperatur auf der Nachfrageseite zu senken. Diese beobachtete Systemantwort entspricht dem erwarteten Verhalten. Abbildung 7-5 vergleicht die Ergebnisse aus Abbildung 7-4 mit den entsprechenden Ergebnissen aus der Referenzsimulation. Dargestellt ist der Absolutwert des relativen Fehlers des vorlaufseitigen Massenstroms der Übergabestation als Funktion der Zeit. Der relative Fehler im Bereich von nur wenigen Zehntelprozent ist gering, was auf eine gute Auslegung des Prüfstands hindeutet. Die Spitzen resultieren aus einer Aktualisierung des sekundärseitigen Sollwerts der Vorlaufstemperatur durch den DR-Regler. Beide Ergebnisse stimmen insgesamt sehr gut überein und weisen nur einen kleinen relativen Fehler im Bereich weniger Zehntelprozent auf. Eine Ausnahme bilden die Zeiträume nach einer Aktualisierung des sekundärseitigen Sollwerts der Vorlaufstemperatur durch den DR-Regler, wo der Fehler um eine Größenordnung ansteigt.

Abbildung 7-6 zeigt einen Ausschnitt aus Abbildung 7-4 (bei einer Laufzeit von ca. 29,5 h) im Vergleich zu den entsprechenden Ergebnissen aus der Referenzsimulation. Dieses Beispiel zeigt, dass die Sprungantwort des (digitalen Zwillings des) Prüfstands nicht mit der

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Sprungantwort (des Modells) der Übergabestation übereinstimmt. Diese Abweichung ist hauptsächlich auf das dynamische Verhalten der Primärseite des Prüfstands (d.h. das hydraulische Verhalten seiner internen Druck- und Massenstromsteuerung) zurückzuführen, das nicht Teil des Referenzmodells ist. Dieser Verhaltensunterschied verursacht die relativ hohen kurzfristigen Abweichungen, die in Abbildung 7-5 beobachtet werden.

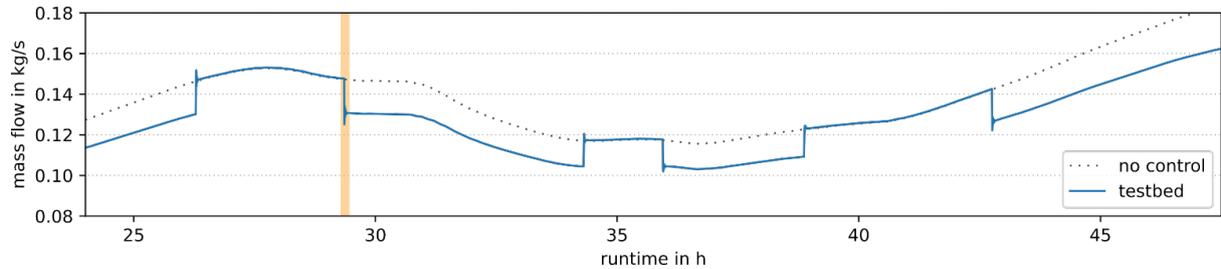


Abbildung 7-4: Massenstrom durch die Primärseite der Übergabestation. Der in der Abbildung unten gezeigte Zeitraum ist hervorgehoben.

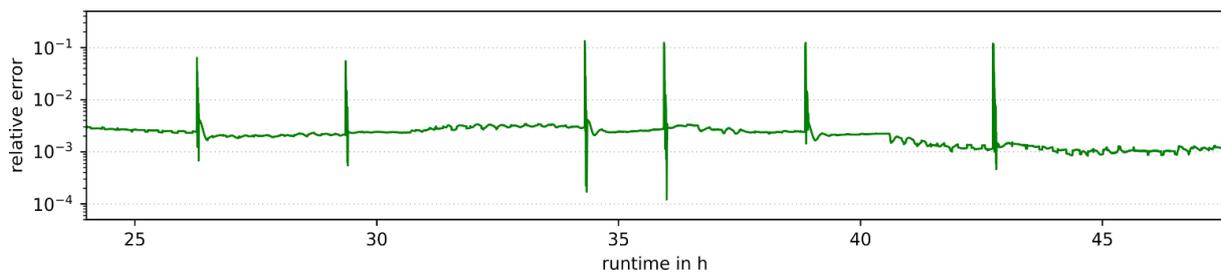


Abbildung 7-5: Genauigkeit des Massedurchflusses durch die Primärseite der Übergabestation.

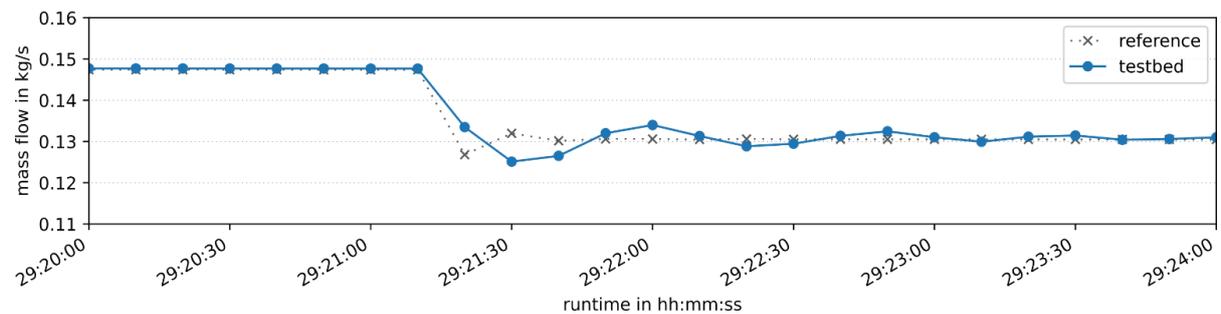


Abbildung 7-6: Detail des Massenflusses durch die Primärseite der Übergabestation.

8 Review des DigitalEnergyTestbed

Im Rahmen des Projektes wurden diverser Stakeholder (Betreiber von Wärmenetzen, Komponentenlieferanten, Herstellern von Digitalisierungslösungen und Forschungslaboren) einbezogen, um mit Ihnen das Konzept des DigitalEnergyTestbeds, dessen Anwendungsfälle, Schnittstellen zu bestehenden Lösungen, Kooperationsmöglichkeiten und mögliche Folgeprojekte zu diskutieren.

Dieses inkludiert die Durchführung

- a) diverser Experteninterviews mit relevanten Stakeholdern, in denen bilateral die Chancen und Barrieren des DigitalEnergyTestbed diskutiert wurde.
- b) eines internationalen Stakeholder-Workshops zusammen mit dem IEA DHC Annex TS4

8.1 Experteninterviews

Folgende Experteninterviews wurden telefonisch/ per Videokonferenz mit Hilfe eines offenen Fragebogens durchgeführt:

- Wärmenetzbetreiber: Ein Wärmenetzbetreiber in Österreich, der zunehmend Digitalisierungslösungen in seinem Fernwärmenetz implementiert.
- ectocloud/ectogrid – E.ON²²: Die E.ON ectocloud ist eine IoT Plattform, die verschiedenen Komponenten im E.ON ectogrid integriert und optimiert.
- CoSES Research Center – TU München²³: Das CoSES Lab (Combined Smart Energy Systems) ist Teil des Zentrums für gekoppelte Energiesysteme an der TU München.
- District LAB – Fraunhofer IEE²⁴: Das District LAB wird als Versuchs- und Testzentrum für Netzbetreiber, Energieversorger, Systemplaner und Komponentenhersteller im Wärmebereich aufgebaut.
- Danfoss A/S²⁵: Das dänische Unternehmen Danfoss A/S (ab hier Danfoss) ist im Bereich Wärme- und Kältetechnik und in Hydraulik- und Elektromotoren tätig, bietet aber auch diverse Digitalisierungslösungen für Wärmesysteme an.
- utilifeed²⁶: Utilifeed ist eine schwedische Firma, welche sich auf die Digitalisierung von Fernwärmenetzen spezialisiert hat

²² [E.ON ectocloud™ | Intelligent control - eon.se](#)

²³ [CoSES Research Center - Munich Institute of Integrated Materials, Energy and Process Engineering \(MEP\) \(tum.de\)](#)

²⁴ [District LAB \(fraunhofer.de\)](#)

²⁵ [Danfoss - Engineering Tomorrow | Danfoss](#)

²⁶ [Utilifeed](#)

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

- Gradyent²⁷: Gradyent ist eine niederländische Firma, die sich auf die digitale Optimierung von Fernwärmesystemen spezialisiert hat.

Aus der Sicht des Wärmenetzbetreibers gäbe es grundsätzlich im Wärmebereich mehrere Anlagen, welche modernisiert bzw. digitalisiert werden müssten, wo das DigitalEnergyTestbed prinzipiell einen Beitrag zu leisten kann. Da es sich bei dem Fernwärmenetz um eine historisch gewachsene Infrastruktur handelt, kann sich die Projektkoordination und Planung für die Integration dezentraler Wärmequellen oft als schwierig gestalten. Gleichzeitig wäre es wahrscheinlich leichter alte Übergabestationen direkt zu ersetzen anstelle sie im DigitalEnergyTestbed bzgl. ihres Systemverhaltens testen zu lassen. Ein weiteres Beispiel ist die neu zu entwickelnde bidirektionale Übergabestation, für die der Einsatz des DigitalEnergyTestbeds grundsätzlich relevant wäre. Diese ist allerdings wesentlich größer als die Kapazität der aktuellen Implementierung des DigitalEnergyTestbed. Ein weiterer möglicher Anwendungsfall sind Response Test im Wärmenetz. Hier sind jedoch Livetests grundsätzlich einfacher durchzuführen als einen digitalen Zwilling des Netzes zu bauen. Dennoch arbeitet man bereits mit Lösungsanbietern zusammen, um die Möglichkeiten eines digitalen Zwillings zu testen. Ein mögliches Anwendungsgebiet des DigitalEnergyTestbed wären Hersteller, die eine standardisierte Datenbasis des Produkts zu erstellen und damit als Service an den Netzbetreiber die Grundlage für einen digitalen Zwilling liefern.

Die Sicht der Lösungsanbieter:

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Konzept des DigitalEnergyTestbeds vor allem unter Lösungsanbietern im Bereich Fernwärme großes Interesse findet. Forschungslabore, wie etwa das District LAB des Fraunhofer Instituts oder das CoSES Lab der TU München sehen darin vor allem die Möglichkeit ihre eigene Laborinfrastruktur mit Hilfe der Software des DigitalEnergyTestbeds, dem LabLink, zu verbinden, um so gemeinsam größere Bereiche abdecken zu können. Des Weiteren können durch den Austausch die entwickelten Softwarelösungen voneinander lernen. Man könnte sich vorstellen gemeinsame Projekte im Rahmen eines internationalen Förder-Calls (z.B: Horizon Europe) bzw. bilaterale Projekte im zu starten.

Danfoss, als Komponentenhersteller, könnte sich vorstellen mit Hilfe des DigitalEnergyTestbeds Leistungsnachweise, sowie weitere relevante Daten seiner Systeme liefern zu können. Des Weiteren könnte man dadurch beim Test neuer Komponenten gleiche Startbedingungen erzeugen ohne lange Einschwingvorgänge abwarten zu müssen. Kunden könnte man gleich einen Bauplan für einen digitalen Zwilling des Produkts, basierend auf Daten des DigitalEnergyTestbeds, mitliefern.

Softwareanbieter wie Utilifeed, Gradyent oder E.ON mit dem ectogrid können sich vorstellen mit dem DigitalEnergyTestbed, als Link zwischen Hardware und Software, Systemzusammenhänge besser verstehen zu können und ihre eigenen Softwarelösungen trainieren zu können. Es könnten etwa an Hardware absichtlich Fehler herbeigeführt werden,

²⁷ <https://www.gradyent.ai/>

um die Systeme darauf trainieren zu können diese Fehler erkennen und identifizieren zu können. Die geringe Datenlage bei neuartigen Systemen und Systemzusammenschlüssen kann durch digitale Zwillinge ausgeglichen werden. Mit dem DigitalEnergyTestbed könnte man sich einen Wettbewerbsvorteil bei Kunden ermöglichen.

8.2 Internationaler Stakeholder-Workshop

In Zusammenarbeit mit dem IEA DHC Annex TS4 „Digitalisation of District Heating and Cooling“²⁸ fand am 27.04.2022 ein online Workshop statt, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Das Ziel dieses Workshops war

- die aktuellen Entwicklungen von digitalen Lösungen und Testbeds im Bereich Fernwärme und integrierte Energiesysteme vorzustellen
- das AIT DigitalEnergyTestbed vorzustellen, einschließlich einer Life-Demonstration der Funktionalitäten (use case 1)
- die Rolle der verschiedenen Testbeds zur Unterstützung der Digitalisierung von Fernwärmenetzen zu diskutieren.

Bei dem Workshop waren neben Vortragenden seitens des AITs zum DigitalEnergyTestbed auch Gasvorträge inkludiert, um einen größeren Rahmen zu der gegenständlichen Thematik zu bilden:

- *Introduction to the IEA DHC Annex TS4* (Dietrich Schmidt, Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE)
- *Ectocloud for ectogrid: The role of cloud and IoT-based control for highly decentralized energy systems* (Daniel Stenberg, EON)
- *The CoSES Lab: A Laboratory Environment for Combined Smart Energy Systems* (Daniel Zinsmeister, TU München)
- *The data-driven energy company - Tear down system boundaries & optimize the whole value chain* (Johan Kensby, utilifeed)
- *DistrictLAB test center for innovative heating network solutions* (Anna Maria Kallert, Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE)

Insgesamt haben bis zu 50 Teilnehmer aus ganz Europa und international teilgenommen. Eine Aufnahme des Webinars ist hier verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=uddnn7QkHac>
Die „Proceedings“ des Webinars inkl. der gesamten Vortragunterlagen auf der Webseite des IEA DHC Annex TS4 zu finden²⁹.

Im Rahmen des interaktiven Teils des Workshops wurden von den TeilnehmerInnen diverse Aspekte thematisiert, inkl. Fragen zur Gebäude- und Anlagensimulation (Diskussion von gleichungsbasierter (z.B. Modelica) gegen monolitische (z.B. EnergyPlus) Simulationstools;

²⁸ <https://www.iea-dhc.org/the-research/annexes/2018-2024-annex-ts4>

²⁹ ebenda

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

der Vergleich von Modelica-Bibliotheken: Modelica Buildings Library, AixLib, SimulationX sowie die Verknüpfung von Simulationen mit höheren Programmiersprachen (Python) für modellprädiktive Regelung und andere Anwendungsfälle); und die mögliche zukünftige Zusammenarbeit bzgl. der Verknüpfung von Laborinfrastruktur in unterschiedlichen Instituten und dafür in Frage kommende Horizon Calls.

9 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Als Proof-of-Concept wurde der Prototyp des DigitalEnergyTestbeds um einen bestehenden Fernwärmeübergabestations-Prüfstand herum implementiert und in einem use case getestet. Dieser Anwendungsfall demonstriert die Echtzeit-Einbindung von Simulationsmodellen für Gebäude in den Laborbetrieb eines Prüfstands für thermische Komponenten. Es zeigte sich jedoch, dass es an der Übergabestation es noch Optimierungspotenzial bzgl. des z.B. Ansprechverhalten und des dynamischen Betriebs gibt, statische Tests sind jedoch bereits möglich. Weitere Implementierungen des DigitalEnergyTestbeds erfolgten softwareseitig inkl. des Test zwei weiterer use cases:

- Die Untersuchung der koordinierten Spannungsregelung für gekoppelte thermisch-elektrische Verteilungssysteme mit Power-to-Heat-Anlagen demonstrierte wie eine Digitalisierungslösung für eine integriertes thermisch-elektrisches Energiesystem validiert werden kann.
- Das Testen der Regelung einer Fernwärmeübergabestation mit Booster-Wärmepumpe mittels Controller-Hardware-in-the-loop-Simulation zeigte die Flexibilität des entwickelten Konzepts hinsichtlich der Einbindung von digitalen Zwillingen.

Die im Rahmen des DigitalEnergyTestbed genutzten und weiterentwickelten Schlüsseltechnologien sind die Lablink-Middleware zusammen mit hardwarespezifischen Clients, Automatisierungstools (PSAL-IDE) sowie einem verteilten und sicheren „deployment layer“ (RlasC). Diese Technologien werden derzeit im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte entwickelt und getestet und haben einen Reifegrad von etwa TRL 5/6. Bisher wurde diese fast ausschließlich im Zusammenhang mit elektrischen Systemen eingesetzt. Mit geringen Modifikationen (hauptsächlich in der von PSAL-IDE verwendeten domänenspezifischen Sprache) können diese jedoch auch auf thermische Systeme angewendet werden. Im Rahmen des Projekts DigitalEnergyTestbed konnte ein Proof-of-Concept für die Verwendung von Lablink mit thermischer Laborhardware und thermischen Simulationsmodellen (Gebäude, Fernwärmenetz) durchgeführt werden. Die größeren Zeitkonstanten und langsameren Transienten von thermischen Systemen machen die Implementierung als verteiltes System einfacher.

Die Labor Middleware LabLink steht grundsätzlich als open source Lizenz zur Verfügung³⁰, ebenso wie eine Dazzu Adaption der DisHeatLib³¹. Bede Tools wurden von den involvierten Stakeholdern begrüßt, ebenso wie die Möglichkeit einer Zusammenarbeit insbesondere unter Lösungsanbietern, die die Möglichkeit sehen, ihre Systeme mit dem DigitalEnergyTesbed zu koppeln und für diverse Fragestellungen in Verbindung mit der Digitalisierung des Energiesystems anzuwenden.

³⁰ <https://ait-lablink.readthedocs.io/en/latest/>

³¹ <https://github.com/AIT-IES/DisHeatLib>

Fraglich ist jedoch, inwieweit diese Lösungen kurzfristig von Wärmenetzbetreibern aufgenommen werden, hier herrscht immer noch „trial-and-error“ vor, bzw. sind die Systeme noch in einem Stadium, wo zentrale Hochtemperatur-Erzeuger vorherrschen. Insofern ist eine kommerzielle Verwertung eher mittel- bis langfristig wahrscheinlich und der kurzfristige Einsatz des DigitalEnergyTestbeds wird sich auf Forschungsprojekte fokussieren.

10 Ausblick und Empfehlungen

Folgende wesentliche Schritte sind zur Weiterentwicklung und Verbreitung des DigitalEnergyTestbed geplant:

- a) **Eine engere Kooperation mit dem H2020-Projekt ERIGrid 2.0³².** Hier wird Laborinfrastruktur für die Entwicklung und Validierung von intelligenten Stromnetzen und integrierten Energiesystemen zur Verfügung gestellt (Rodríguez, J. Emilio et al., 2021). Zusätzlich werden neue Werkzeuge und Methoden für die Laborvalidierung entwickelt und verbessert, beispielsweise für Simulationskopplung oder die Verknüpfung von räumlich getrennter Laborinfrastruktur in gemeinsame Hardware-in-the-Loop-Setups.
- b) **Eine Zusammenarbeit und Disseminierung der Ergebnisse im Rahmen des IEA DHC Annex TS4,** in diesem Zusammenhang ist bereits eine „Industry Session“ zu dem Thema auf der 8th International Conference on Smart Energy Systems, vom 13-14 September 2022 in Aalborg, Dänemark geplant. <https://smartenergysystems.eu/>
- c) **Die Schaffung eines institutionellen Rahmens für Partnerübergreifende Laborinfrastrukturen.** Hierbei geht es darum, einen Rahmen für den gemeinsamen Betrieb einer Laborinfrastruktur von zwei oder mehr RTOs für die akademische und kommerzielle Nutzung zu schaffen. Dieses inkludiert die Felder Finanzierung, Auftragsvergabe, Personalschulung, Kommerzialisierung usw. Hierfür sind folgende Schritte notwendig:
 - a. **Auswahl der „Pilot-Partner“,** inkl. Identifizierung und Kontaktaufnahme. Mögliche Partner-RTOs sind die EURAC (Energy Exchange Lab), das Fraunhofer IEE (District LAB), die Universität Luzern (NODES-Lab) oder die DTU (SYSLAB) (siehe Abschnitt 3.2).
 - b. **Aufbau der Zusammenarbeit:** Ausarbeitung und Formalisierung einer detaillierten Strategie für die Umsetzung und Kommerzialisierung (einschließlich eines Geschäftsmodells), Inkl. Planungen für eine Finanzierung.
- d) **Erweiterung:** Das DigitalEnergyTestbed ist grundsätzlich erweiterbar und ermöglicht die Einbeziehung weiterer Partner, die potenziell eine europaweite oder internationale eine Gemeinschaft von Laboratorien bilden können. So kann der Anwendungsbereich

³² <https://erigrd2.eu>

von den elektrischen und thermischen Bereichen auf Labore erweitert werden, die sich beispielsweise mit Gas, Wasserstoff oder E-Mobilität befassen.

10.1 Verwertung und Folgeprojekte

Hier sind im Wesentlichen folgende Aspekte zu nennen:

- a) **Die Weiterentwicklung und Anwendung des DigitalEnergyTestbed in Forschungsprojekten.** Die Weiterentwicklung des DigitalEnergyTestbed und der damit verbundenen Technologien auf TRL 8/9 erfolgt im Idealfall im Rahmen eines F&E-Projekts. Dieses inkludiert auch die Optimierung bestehender Hardware. Grundsätzlich ist die Weiterentwicklung eines großen Teils der Technologien als Open-Source-Projekt geplant, was sich mit dem Charakter eines ko-finanzierten Forschungsprojektes gut vereinbaren lässt. Hierfür ist es wichtig, in der Kooperation mit anderen Forschungslaboren und neuen Hard- und Software-Komponenten Schnittstellen und Software spezifisch anzupassen (z. B. spezielle Lablink-Clients) als auch mögliche Erweiterungen der Hardwareaufbauten (z. B. zusätzliche thermohydraulische Geräte). Weiters ist die Anwendung anhand konkreter Anwendungsfälle in den Fokus zu stellen, um schnellstmöglich den positiven Impact gegenüber herkömmlichen Ansätzen aufzuzeigen.
- a) **Die kommerzielle Verwertung des DigitalEnergyTestbed:** Mit zunehmendem Reifegrad der dem DigitalEnergyTestbed zugrundeliegenden Technologien sowie der immer steigenden Integration der Sektoren Strom und Wärme und der Verfügbarkeit relevanter Produkte und Dienstleistungen ist jedoch auch eine kommerzielle Nutzung des DigitalEnergyTestbed wahrscheinlich. Zu den möglichen Anwendungsfällen/Kunden gehören im Allgemeinen:
 - Unterstützung der Planung und des Betriebs integrierter Energiesysteme auf lokaler/städtischer Ebene, einschließlich der Steuerung, Überwachung und Visualisierung innovativer Systeme, die z. B. Wärmepumpen, Batterien, elektrische Heizungen, thermische Speicher und fluktuierende erneuerbare Energien (z. B. Wind oder PV über direkte Stromleitungen) kombinieren. Mögliche Kunden sind Planer und Betreiber von integrierten Energiesystemen, einschließlich Versorgungsunternehmen auf nationaler und internationaler Ebene.
 - Unterstützung der Entwicklung und Validierung von Software auf Systemebene, wie z. B. IoT-Plattformen und deren Anwendungen für den optimierten Betrieb von städtischen Energiesystemen und Stadtteilen. Dies umfasst die Entwicklung und Validierung digitaler Zwillinge (auf der Grundlage analytischer und/oder datengesteuerter Modelle) für die prädiktive Simulation und Steuerung in integrierten Energiesystemen. Mögliche Kunden sind die Entwickler kommerzieller und vorkommerzieller Produkte wie die E.ON ectocloud, Utilifeed, NODA oder Gradyen (siehe auch Abschnitt 3.1)

11 Literaturverzeichnis

- Benedikt Leitner. (2020). *Sector Integration of District Heating and Electrical Networks: Methods for Simulation, Control and Design*. TU Wien, Faculty of Mechanical and Industrial Engineering. https://publik.tuwien.ac.at/files/publik_295422.pdf
- Blochwitz, T., Otter, M., Arnold, M., Bausch, C., Clauss, C., Elmqvist, H., Junghanns, A., Mauss, J., Monteiro, M., Neidhold, T., Neumerkel, D., Olsson, H., Peetz, J.-V., & Wolf, S. (2011). *The Functional Mockup Interface for Tool independent Exchange of Simulation Models*. 105–114. <https://doi.org/10.3384/ecp11063105>
- Drauz, S. R., Spalthoff, C., Wurtenberg, M., Kneikse, T. M., & Braun, M. (2018a). A modular approach for co-simulations of integrated multi-energy systems: Coupling multi-energy grids in existing environments of grid planning & operation tools. *2018 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/MSCPES.2018.8405395>
- Drauz, S. R., Spalthoff, C., Wurtenberg, M., Kneikse, T. M., & Braun, M. (2018b). A modular approach for co-simulations of integrated multi-energy systems: Coupling multi-energy grids in existing environments of grid planning & operation tools. *2018 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/MSCPES.2018.8405395>
- Duic, N., & Krajacic, G. (2018, 14.11). *District Heating and 4DH in Central and Eastern Europe*.
- Elmqvist, H., Mattsson, S. E., & Otter, M. (1998). Modelica—The new object-oriented modeling language. *The 12th European Simulation Multiconference*.
- Gavriluta, C., Lauss, G., Strasser, T. I., Montoya, J., Brandl, R., & Kotsampopoulos, P. (2019). Asynchronous Integration of Real-Time Simulators for HIL-based Validation of Smart Grids. *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 6425–6431. <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927131>

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

International Electrotechnical Commission. (2020). *OPC Unified Architecture—Part 1: Overview and concepts.*

Kallert, A., Lottis, D., Shan, M., & Schmidt, D. (2021). New experimental facility for innovative district heating systems—District LAB. *Energy Reports*, 7, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.039>

Messmer, C., Ackermann, C., Spoerri, R., Dahinden, C., Afjei, T., & Sulzer, M. (2017). *Virtual test bench by linking the “FHNW – Energy Research Lab” and the “HSLU – NODES Lab.”*

Modelica IBPSA library. (2020). <https://github.com/ibpsa/modelica-ibpsa>

Nouidui, T. S. & M. Wetter. (n.d.). Linking simulation programs, advanced control and FDD algorithms with a building management system based on the Functional Mock-Up Interface and the building automation Java architecture standards. *ASHRAE/IBPSA-USA Building Simulation Conference, Atlanta, GA*, 49-55.

Nouidui, T. S., & Wetter, M. (2014). *Linking simulation programs, advanced control and FDD algorithms with a building management system based on the functional mock-up interface and the Building Automation Java Architecture standards.*

Nouidui, T. S., Wetter, M., Li, Z., Pang, X., Bhattacharya, P., & Haves, P. (2011, November). BacNet and Analog/Digital Interfaces of the Building Controls Virtual Testbed. *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of IBPSA.* <https://www.osti.gov/biblio/1168733>

Otte, M., Leimgruber, F., Brundlinger, R., Rohjans, S., Latif, A., & Strasser, T. I. (2018a). Hardware-in-the-Loop Co-Simulation Based Validation of Power System Control Applications. *2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 1229–1234. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2018.8433761>

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

- Otte, M., Leimgruber, F., Brundlinger, R., Rohjans, S., Latif, A., & Strasser, T. I. (2018b). Hardware-in-the-Loop Co-Simulation Based Validation of Power System Control Applications. *2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 1229–1234. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2018.8433761>
- Pipiciello, M., Caldera, M., Cozzini, M., Ancona, M. A., Melino, F., & Di Pietra, B. (2021). Experimental characterization of a prototype of bidirectional substation for district heating with thermal prosumers. *Energy*, 223, 120036. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120036>
- Rodríguez, J. Emilio, Vogel, Steffen, & Strasser, Thomas I. (2021). *D-NA5.1 Specification of the Trans-national Access and Virtual Access Programmes*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4450833>
- Schmidt, R.-R., & Leitner, B. (2021). A collection of SWOT factors (strength, weaknesses, opportunities and threats) for hybrid energy networks. *Energy Reports*, 7, 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.040>
- Schneider, G. F., Oppermann, J., Constantin, A., Streblov, R., & Müller, D. (2015). *Hardware-in-the-Loop-Simulation of a Building Energy and Control System to Investigate Circulating Pump Control Using Modelica*. 225–233. <https://doi.org/10.3384/ecp15118225>
- Stahleder, D., Reihs, D., & Lehfuss, F. (2018). *LabLink – A novel co-simulation tool for the evaluation of large scale EV penetration focusing on local energy communities*. <https://doi.org/10.34890/180>
- Steinbrink, C., Lehnhoff, S., Rohjans, S., Strasser, T. I., Widl, E., Moyo, C., Lauss, G., Lehfuss, F., Faschang, M., Palensky, P., van der Meer, A. A., Heussen, K., Gehrke, O., Guillo-Sansano, E., Syed, M. H., Emhemed, A., Brandl, R., Nguyen, V. H., Khavari, A., ... Degefa, M. Z. (2017). Simulation-Based Validation of Smart Grids – Status Quo and Future Research Trends. In V. Mařík, W. Wahlster, T. Strasser, & P. Kadera (Eds.),

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

- Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems* (Vol. 10444, pp. 171–185). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64635-0_13
- Strasser, T., Pröbstl Andrén, F., Lauss, G., Bründlinger, R., Brunner, H., Moyo, C., Seitzl, C., Rohjans, S., Lehnhoff, S., Palensky, P., Kotsampopoulos, P., Hatziargyriou, N., Arnold, G., Heckmann, W., Jong, E., Verga, M., Franchioni, G., Martini, L., Kosek, A., ... Rodriguez-Seco, E. (2017). Towards holistic power distribution system validation and testing—An overview and discussion of different possibilities. *E & i Elektrotechnik Und Informationstechnik*, 134(1), 71–77. <https://doi.org/10.1007/s00502-016-0453-3>
- Trčka, M., & Hensen, J. L. M. (2010). Overview of HVAC system simulation. *Automation in Construction*, 19(2), 93–99.
- Wetter, M. (2011). Co-simulation of building energy and control systems with the Building Controls Virtual Test Bed. *Journal of Building Performance Simulation*, 4(3), 185–203.
- Wetter, M., Benne, K., Gautier, A., Nouidui, T. S., Ramle, A., Roth, A., Tummescheit, H., Mentzer, S., & Winther, C. (2021). *Lifting the garage door on Spawn, an open-source BEM-controls engine*. Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA (United States).
- Wetter, M., Zuo, W., Nouidui, T. S., & Pang, X. (2014). Modelica buildings library. *Journal of Building Performance Simulation*, 7(4), 253–270.
- Widl, E., Sporr, A., Mairhofer, M., Natiesta, T., Marx, N., & Schmidt, R.-R. (2022). Prototype of an open testbed for the lab validation of smart applications of district heating substations. *2022 10th Workshop on Modelling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/MSCPES55116.2022.9770173>
- Widl, E., Wild, C., Heussen, K., Rikos, E., & Hoang, T.-T. (2022). Comparison of two approaches for modeling the thermal domain of multi-energy networks. *2022 Open*

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

Source Modelling and Simulation of Energy Systems (OSMSES), 1–6.

<https://doi.org/10.1109/OSMSES54027.2022.9769129>

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

12 Kontaktdaten

Dr.-Ing. Ralf-Roman Schmidt

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Giefinggasse 4, 1210 Wien, Österreich

+43 664 2351901

ralf-roman.schmidt@ait.ac.at

www.ait.ac.at

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

Anhang 1: Übersicht bestehender Testumgebungen

Anhang 2: use cases für das DigitalEnergyTestbed

Anhang 3: Kommissionierung des Fernwärmepfandes für den Fernzugriff

Anhang 4: Details der Modellentwicklung