

Verbundvorhaben OSkit

Optimierte Sektorkopplung in Quartieren durch intelligente thermische Prosumernetze

Teilvorhaben TUM

Modellierung, Laborevaluation und Rückwirkungen auf das Stromsystem

FKZ: 03EN3032A

Teilvorhaben Triowatt

Technische Machbarkeit und Verwertungspotenzial

FKZ: 03EN3032B

Abschlussbericht

Technische Universität München (TUM EMT)

Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (bis 30.09.2022)

(komm. Leitung Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher)

Professur für Energiemanagement-Technologien (ab 1.10.2022)

(Prof. Dr. Christoph Goebel)

Munich Institute of Integrated Materials, Energy and Process Engineering

Combined Smart Energy System Laboratory (CoSES) (TUM MEP)

(Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher)

Triowatt GmbH

(Dr.-Ing. Franz Christange)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

München, Stephanskirchen im November 2024

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Autoren:

Thomas Lickleder (TUM MEP)

Franz Christange (Triowatt)

Daniel Zinsmeister (TUM EMT)

Peter Tzscheuschler (TUM EMT)

Ulrich Ganslmeier (TUM MEP)

Sebastian Eichhorn (TUM EMT)

Marcus Frey (Triowatt)

Saltanat Kuntuarova (TUM MEP)

Elgin Knollig (TUM EMT)

Inhalt

1	Einleitung	5
1.1	Aufgabenstellung	5
1.2	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	5
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn.....	6
1.5	Zusammenarbeit.....	8
2	Erzielte Ergebnisse	9
2.1	E1 Konzept	10
2.1.1	Netzkonzept.....	11
2.1.2	Bidirektionale Prosumer-Wärmeübergabestation.....	14
2.1.3	Prosumerkonfiguration.....	16
2.1.4	Betriebsarchitektur.....	17
2.1.5	Konzeption Wärmemarkt	20
2.1.6	Standortanalyse.....	20
2.2	E2 Systemregelung	22
2.2.1	District Energy Management.....	22
2.2.2	Regelung auf Feldebene.....	27
2.3	E3 Simulationsbibliotheken und Modellierungsanalysen	40
2.3.1	Wärmetauschermodellierung	41
2.3.2	Bibliothek zur Simulation von Prosumer-Wärmenetzen - Prosnet	42
2.3.3	Bibliothek zur Simulation von Prosumern - ProHMo.....	43
2.3.4	Benchmarking Framework für verschiedene EMS-Ansätze	45
2.3.5	Kombination von Prosumer- und Netzsimulationen.....	47
2.3.6	Wärmespeicher-Simulationsmodelle.....	49
2.3.7	Auslegung von Komponenten für Prosumer-Wärmenetze	50
2.3.8	Simulative Untersuchungen	51
2.4	E4 Praktische Umsetzung.....	59
2.4.1	Labor und Experimente	59
2.4.2	Feldtestprototyp der bidirektionale Wärmeübergabestation	70
2.5	E5 Rückwirkungen Stromsystem	78
2.5.1	Analyse der Entlastung des Stromverteilnetzes durch Sektorkopplung.....	78
2.5.2	Bereitstellung von Flexibilität im Stromnetz durch Power-to-Heat Anwendungen	82
2.5.3	Analyse des Systemeinflusses auf die Spannungsqualität.....	86
2.6	E6 Energiewirtschaftliche Einordnung.....	89
2.6.1	Machbarkeit.....	89
2.6.2	Wirtschaftlichkeit.....	90

2.6.3	Marktsituation	91
2.6.4	Markthemmnisse	92
2.6.5	Fazit	93
2.7	Verwertung und Verbreitung	94
2.8	Weiterführende Arbeiten	95
3	Verwendung der Zuwendung	96
3.1	TUM.....	96
3.2	Triowatt.....	96
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	97
5	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	98
5.1	Publikationen	98
5.2	Dissertationen.....	100
5.3	Studentische Arbeiten.....	100
5.4	Veröffentlichte Modelle	101
5.5	Öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen.....	102
6	References.....	105

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Das Projekt zielt darauf ab, ein zukunftsfähiges intelligentes thermisches Netz zu entwickeln, das die Kopplung von Strom, Wärme und Kälte in einem dezentralen Verbund optimiert. Eine der zentralen Aufgaben besteht darin, ein thermisches Netz mit mehreren dezentralen Einspeisern zu entwerfen, das auch eine Nachrüstung im Bestand ermöglicht. Dazu müssen effiziente Betriebsstrategien entwickelt werden, um den Netzbetrieb zu steuern und die Nutzung von dezentralen Energiequellen, wie Wärmepumpen zu optimieren.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Analyse der Auswirkungen auf das elektrische Versorgungsnetz. Es gilt zu untersuchen, wie die Kopplung von Strom und Wärme das Netz beeinflusst, insbesondere hinsichtlich Lastspitzen, Netzintegration und Netzstabilität. Parallel dazu wird eine techno-ökonomische Bewertung durchgeführt, um die Machbarkeit der Lösungen in einem realen Umfeld zu beurteilen, wobei Netze mit einer Größe von 2 bis 50 Teilnehmern betrachtet werden.

Darüber hinaus wird ein Feldversuch konzipiert, um die entwickelten Ansätze und Technologien unter realen Bedingungen zu testen. Es werden Anforderungen an geeignete Standorte definiert. Die Sektorkopplung soll auf Erzeuger- und Verbraucherseite implementiert werden, um durch bidirektionale Steuerung eine optimale Nutzung der Energieflüsse zu ermöglichen.

1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt konnte aufgrund folgender Voraussetzungen erfolgreich durchgeführt werden:

Die Projektbearbeiter von TUM und Triowatt konnten auf bereits frühere Zusammenarbeit aufbauen. Eine wesentliche Grundlage bildeten die umfangreichen Erfahrungen aus früheren Projekten, insbesondere im Bereich der Modellierung und Simulation von Energiesystemen. Diese Expertise ermöglichte es, vorhandene Tools und Modelle effektiv einzusetzen und weiterzuentwickeln, um die spezifischen Herausforderungen des Projekts zu bewältigen.

Ein weiterer entscheidender Faktor war das Projektteam, das zum Teil aus erfahrenen Mitarbeiter*innen bestand, die bereits an einschlägigen Projekten gearbeitet hatten. Viele der Teammitglieder der TUM verfolgten zudem das Ziel, Inhalte des Projekts zum Gegenstand ihrer Promotion zu machen, was nicht nur zu einer hohen Motivation, sondern auch zu einer kontinuierlichen wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit den relevanten Themen führte. Die praktische Erfahrung der Triowatt, insbesondere die langjährige Erfahrung mit unterschiedlichen Energiesystemen und deren Hardwarekompetenz bildeten eine gelungene Synergie.

Darüber hinaus stand dem Team ein modernes Labor für gebäudetechnische Energiesysteme zur Verfügung (CoSES). Dieses Labor ist mit aktueller Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (MSR-Technik) ausgestattet, was die Durchführung von Experimenten und Tests unter realen Bedingungen ermöglichte. Die Triowatt konnte mit Ihrem realen Teststandort eine zusätzliche praxisrelevante Komponente mit einbringen. Diese technische Infrastruktur ermöglichte es, die entwickelten Konzepte und Technologien praxisnah zu evaluieren und wichtige Erkenntnisse für die Weiterentwicklung des Projekts zu gewinnen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Projektplan beginnt in AP 1 mit der **Konzeptentwicklung**, in der eine Anforderungsanalyse und Szenariendefinition durchgeführt wurde. Die Funktionalität der Übergabestation sowie die Betriebsstrategien wurden entwickelt und die Referenzdatenakquise abgeschlossen (M1).

Im AP 2, der **Modellierung und Simulation**, wurde die Simulationsumgebung angepasst und Übergabestationen sowie Netztopologien modelliert. Nach der Inbetriebnahme der Simulationsumgebung (M2) wurden Regelsysteme und Betriebsstrategien modelliert. Nach Abschluss der Simulationen (M3) folgte deren Auswertung.

Die **experimentelle Untersuchung** (AP 3) umfasste die Erweiterung des CoSES Labors sowie die Durchführung und Auswertung von Laborversuchen.

Parallel wurden **Komponententests und die Vorbereitung eines Feldversuchs** (AP 4) durchgeführt. Hierbei wurde eine Standortanalyse für den Feldversuch abgeschlossen (M4) und die Komponenten wie Steuerungssysteme und Übergabestationen getestet (M5).

Im fünften Schritt wurden in AP 5 die **Rückwirkungen auf das Stromsystem** analysiert. Dabei stand die Entlastung des Stromnetzes durch Sektorkopplung sowie die Bereitstellung von Flexibilität im Fokus. Die Ergebnisse wurden hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Spannungsqualität bewertet (M6).

Zum Abschluss erfolgte die **Analyse und Bewertung der Ergebnisse** in AP 6, wobei die technischen und wirtschaftlichen Aspekte sowie das Einbindungspotenzial für erneuerbare Energien analysiert wurden. Handlungsempfehlungen wurden abgeleitet und die Projektziele erreicht (M7).

Für die Durchführung des Projektes war ein Zeitraum von drei Jahren geplant, von Dezember 2020 bis November 2023. Durch Nachwirkungen der Coronapandemie und personellen Engpässen wurde die Projektlaufzeit bis Mai 2023 verlängert. Das Projekt konnte erfolgreich abgeschlossen werden.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn

Zu Projektbeginn waren die dominierenden Trends im Bereich thermischer Netze die Dekarbonisierung, Dezentralisierung und Digitalisierung, sowie die Sektorenkopplung. Die Dekarbonisierung zielt darauf ab, CO₂-neutrale Technologien zu integrieren, während die Dezentralisierung die lokale Einspeisung durch Prosumer in den Mittelpunkt rückt. Digitalisierung ermöglicht dabei die intelligente Steuerung und Optimierung der Netze, indem Daten in Echtzeit verarbeitet und genutzt werden. Durch die Sektorkopplung zwischen Strom- und Wärmesystemen sollen Technologien wie Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und Power-to-Heat dazu befähigt werden, Flexibilität für das Stromnetz bereitzustellen. Dies ermöglicht die Entlastung des Stromsystems, indem Lastspitzen vermieden und Überlastungen reduziert wurden. Vor allem die Lastverschiebungspotenziale dieser Technologien sollen zu Stabilisierung des Stromnetzes beitragen, während gleichzeitig die Effizienz der Wärmeerzeugung maximiert werden soll

Ein bedeutender Widerspruch bestand jedoch zwischen der abstrakten Optimierung dezentraler Energieflüsse und der konkreten technischen Umsetzung auf Feldebene. Während in der Modellierung oft von idealisierten Bedingungen ausgegangen wurde, erwies sich die praktische Implementierung als weitaus komplexer. Diese Diskrepanz zwischen dem Management auf Systemebene und der Detailsteuerung auf Feldebene führte zu Herausforderungen bei der Koordination von Akteuren und der Ausnutzung der systemischen Synergien in Smart Thermal Grids. Dies war besonders bei der Integration erneuerbarer Energien und dezentraler Speicher relevant, wo Optimierungsverfahren wie das Unit Commitment oder das Economic Dispatch angewendet wurden, die jedoch die technische Komplexität auf der Feldebene nur unzureichend abbilden konnten.

Zu Projektbeginn beschränkte sich die Betrachtung von Prosumern in Wärmenetzen hauptsächlich auf die Solarthermie als dezentrale Einspeisung. Diese Einspeisungen wurden isoliert vom restlichen Netz betrachtet, und es gab keine Modelle, die ein echtes Prosumerverhalten simulierten. Stattdessen wurde entweder die Rolle eines dezentralen Erzeugers oder Verbrauchers angenommen, ohne dass die Interaktionen zwischen Netz und Haus oder die wechselseitigen Auswirkungen der Prosumer auf das thermohydraulische Verhalten des gesamten Netzes einbezogen wurden.

Bisherige Forschungsprojekte, darunter z.B. an der HAW Hamburg, wie NEW 4.0 [1], Smart Heat Grid Hamburg [2, 3] und SmartProHeaT [4], konzentrieren sich auf die Kopplung von Strom und Wärme. Diese Projekte zielen darauf ab, Flexibilitäts- und Effizienzpotenziale in Wärmenetzen zu nutzen, indem z. B. Power-to-Heat-Lösungen implementiert werden. Die Kopplung von Strom und Wärme wird in Projekten wie FlexKWK [5] durch die Kombination von Speichern, Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und Power-to-Heat-Anlagen untersucht, um eine flexible Nahwärmeversorgung zu gewährleisten. Im Bereich der thermischen Netze unterstützt das Förderprogramm Wärmenetze 4.0 [6] Projekte, Machbarkeitsstudien, die CO₂-neutrale Erzeuger und effiziente Abwärmennutzung in Wärmenetzen bei deutlich niedrigeren Temperaturniveaus implementieren [7]. Im Bereich der Kältenetze gibt es bislang nur wenige Projekte, wie Berlin Adlershof [8], das eine Vernetzung von Strom, Wärme und Kälte demonstriert.

Das MEMAP-Projekt (Multi-Energy Management and Aggregation Platform) an dem das Team der TUM beteiligt war, war ein wichtiges Vorläuferprojekt, das unabhängige Energiemanagementsysteme über eine Softwareplattform miteinander vernetzte, um Synergieeffekte zu erzielen und die Effizienz von dezentralen Energiesystemen zu optimieren. In MEMAP wurde das Potenzial von bidirektionalen Energieströmen und dezentraler Einspeisung erforscht, was ein Kernthema für das vorliegende Projekt darstellt. Mit der Modelica Bibliothek „ProsNet“ wurde der Prototyp einer Simulationsbibliothek entwickelt, die speziell auf Prosumer-Netze und bidirektionale Wärmeübergabestationen ausgelegt ist.

Zusammengefasst war der Stand der Technik zu Projektbeginn von der Herausforderung geprägt, die Dezentralisierung und Optimierung der Wärmenetze mit den technischen Anforderungen auf Feldebene in Einklang zu bringen. Eine weitere zentrale Herausforderung

war die Untersuchung der Rückkopplungen von Prosumernetzen auf das Stromsystem, insbesondere hinsichtlich der Netzstabilität und der Bereitstellung von Flexibilität. Das Projekt strebte daher an, diese Diskrepanzen zu überwinden, indem es neue Ansätze zur Kopplung von System- und Feldebene sowie zur Einbindung dezentraler Prosumer und bidirektionaler Wärmeströme erforschte und weiterentwickelte.

Im Verlauf der Projektbearbeitung wurde die einschlägige Fachliteratur mithilfe von Portalen und Datenbanken, wie sciencedirect.com, researchgate.net oder scopus.com recherchiert und berücksichtigt. An dieser Stelle wird jeweils auf die Literaturübersicht in den veröffentlichten Beiträgen (siehe Abschnitt 5) verwiesen.

1.5 Zusammenarbeit

Das Forschungsprojekt zeichnete sich durch eine enge Zusammenarbeit verschiedener Institutionen und Personen aus. Die internen Projektbeteiligten organisierten alle zwei Wochen gemeinsame Arbeitstreffen, um den Fortschritt zu besprechen und die nächsten Schritte zu planen. Zwischen diesen Treffen fand ein intensiver bilateraler Austausch zu spezifischen Themen statt, um die kontinuierliche Abstimmung und Zusammenarbeit zu gewährleisten.

Ebenso ergaben sich Kooperationen auf nationaler und internationaler Ebene. Besonders hervorzuheben ist die Zusammenarbeit mit der University of Glasgow, die durch den Forschungsaufenthalt eines Wissenschaftlers im CoSES-Labor geprägt war. Dieser trug wesentlich zur Implementierung von Wärme- und Kältenetzen der 5. Generation in das Simulationstool bei. Außerdem wurden erste Experimente zu 5GDH-Netzen im CoSES-Labor durchgeführt. Daraus entstanden zwei Veröffentlichungen:

- 5th Generation District Heating and Cooling Modelica Models for Prosumer Interaction Analysis [9]
- Development and experimental validation of a hydraulic design and control philosophies for 5th generation district heating and cooling networks [10]

Darüber hinaus gab es eine erfolgreiche Zusammenarbeit mit der Cardiff University, die sich auf die experimentelle Validierung von Speichermodellen konzentrierte. Auch hieraus resultierte eine Veröffentlichung „Experimental validation of a hybrid 1-D multi-node model of a hot water thermal energy storage tank“ [11].

Das Projekt war zudem in den internationalen Rahmen der IEA DHC Annex TS8 eingebunden, bei dem CoSES die Leitung des Subtasks A übernahm. Dieser Subtask befasste sich mit der experimentellen Bewertung zukünftiger Fernwärmesysteme.

Die erfolgreiche Zusammenarbeit in diesem Projekt legte den Grundstein für weitere gemeinsame Vorhaben, und eine Fortsetzung der Kooperationen ist bereits in Planung.

2 Erzielte Ergebnisse

Eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende erfordert auch die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung. Einen Beitrag dazu soll durch den Ausbau von Wärmenetzen geleistet werden. Neben den vorhandenen großen zentral gespeisten Fernwärmesystemen in Städten könnten dabei auch Nahwärmesysteme in kleineren Siedlungsstrukturen aufgebaut werden, in denen dezentral von mehreren Wärmeerzeugern wechselweise Wärme bereitgestellt wird.

Aktuelle Entwicklungen in der Technologie von Wärmenetzen lassen sich in drei zentrale Trends unterteilen:

- **Temperaturabsenkung:** Die zunehmende Integration erneuerbarer Energiequellen und industrieller Abwärme erfordert eine Reduktion der Vorlauftemperaturen in Wärmenetzen. Diese Anpassung ermöglicht eine effizientere Nutzung regenerativer und lokal verfügbarer thermischer Energiequellen, was zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen führt.
- **Dezentralisierung:** Der Übergang von zentralisierten Großkraftwerken hin zu einer dezentralen Struktur ermöglicht die Nutzung einer Vielzahl kleinerer, lokal verfügbarer Energiequellen. Dies fördert die Flexibilität und Effizienz der Energieerzeugung und bietet gleichzeitig Synergiepotenziale durch die Kopplung von Strom- und Wärmesystemen.
- **Digitalisierung:** Die Einführung digitaler Technologien in Wärmenetze optimiert die Koordination der Energieflüsse und erschließt zusätzliche Effizienzpotenziale. Durch den Einsatz intelligenter Steuerungssysteme und Datenanalysen können Netzbetreiber Lastspitzen besser managen und den Energieverbrauch effizienter gestalten.

Prosumernetze sind idealer Untersuchungsgegenstand um diese Trends und offene Perspektive zukünftiger Wärmenetzen zu untersuchen und Erkenntnisse, sowie Lösungen auf Wärmenetze im Insgesamt zu übertragen.

Das Projekt OSkit folgt daher dem Ansatz, Prosumer auch im Wärmebereich zu etablieren. Dazu wurden hochflexible Wärmenetze untersucht, in denen mehrere Einspeiser Wärme zur Deckung des Bedarfs liefern können, d.h. thermische Energie richtungsunabhängig übertragen können. Konzepte und Regelungsansätze hierfür wurden entwickelt und neben Modellierung und Simulation auch im Labormaßstab getestet. Ebenso wurde der Prototyp einer bidirektionalen Wärmeübergabestation realisiert.

Nachfolgend werden die Ergebnisse des Projekts beschrieben. Abweichend von der Strukturierung nach Arbeitspaketen, wie im Antrag enthalten, wurde eine Darstellung nach Ergebnisfeldern gewählt. Tabelle 1 zeigt die Zuordnung der nachfolgend beschriebenen Ergebnisfelder zu den im Antrag gegliederten Arbeitspaketen.

Tabelle 1: Zuordnung der thematischen Ergebnisfelder zu den durchgeführten Arbeitspaketen

		Arbeitspaket laut Antrag					
		AP1 Konzept	AP2 Modellierung und Simulation	AP3 Experimentelle Untersuchung	AP4 Komponententest und Feldtestvorbereitung	AP5 Rückwirkung auf das Stromsystem	AP6 Analyse und Bewertung der Ergebnisse
Zuordnung zu den Ergebnissen	E1 Konzept	■			■		■
	E2 Systemregelung	■	■				■
	E3 Simulationsbibliotheken und Modellierung		■				■
	E4 Praktische Umsetzung			■	■		■
	E5 Rückwirkungen Stromsystem					■	■
	E6 Energiewirtschaftliche Einordnung	■	■	■	■	■	■

Die dunkelblauen Quadrate zeigen einen direkten Bezug, die hellblauen Quadrate repräsentieren einen Bezug aus Synergieeffekten

2.1 E1 Konzept

Thermische Netze werden typischerweise in Generationen klassifiziert. Die gängigsten Klassifikationen für Wärmenetze basieren auf Lund et al. [12] und für Kältenetze auf Werner et al. [13]. In diesem Projekt konzentrierten wir uns auf Wärmenetze, da grundlegende Erkenntnisse aufgrund der physikalisch ähnlichen Funktionsprinzipien auch auf Kältenetze übertragbar sind. Der Fokus des Forschungsprojekts lag auf speziellen Wärmenetzen, den sogenannten Prosumernetzen.

Prosumer sind Netzteilnehmer, die Energie sowohl aus dem Netz beziehen als auch in dieses einspeisen können und dabei zwischen diesen Modi wechseln können.

Prosumernetze: Im Rahmen des Projekts wurden Prosumernetze definiert durch die Prägung über das Prosumerverhalten und die daraus resultierende Bidirektionalität. Dies umfasst sowohl den bidirektionalen Energieaustausch zwischen Prosumer und Netz als auch bidirektionale Wärme- und Volumenströme in einzelnen Netzabschnitten. Damit das flexible Prosumerverhalten prägend für das Netz ist, wird angenommen, dass die Prosumer einen signifikanten Anteil im Vergleich zu zentralen Einheiten ausmachen, insbesondere im Hinblick auf dominante Großkraftwerke oder zentrale Pumpstationen. Das Netz dient primär als verbindende Infrastruktur zwischen verschiedenen Netzteilnehmern, die flexibel Energie

austauschen und sich so optimal versorgen können. Im Extremfall gibt es keine dominierenden Kraftwerke oder zentrale Pumpstationen.

Zur Einordnung von Prosumernetzen in das Vokabular der Branche, sind eigene Festlegungen notwendig, da die Terminologien im wachsenden Bereich der Heiz- und Kühlnetze noch nicht standardisiert sind. Entsprechend der nachfolgenden Festlegungen sind Prosumernetze eine spezielle Form von smart thermal grids. Sie können sowohl als 4GDH- als auch als 5GDH-Netze ausgeprägt sein, abhängig vom Temperaturniveau und davon, ob Kühl- und Heizbedarfe gleichzeitig mit Wärmepumpen gedeckt werden.

DHC: Spricht man allgemein von thermischen Netzen und meint damit sowohl Wärme- als auch Kältenetze, so ist oftmals von District Heating and Cooling (DHC) die Rede.

4GDH: Wärmenetze der vierten Generation (4GDH) werden derzeit implementiert, mit einem Fokus auf Energieeffizienz, intelligente integrierte Energiesysteme und die Nutzung lokal verfügbarer erneuerbarer Energiequellen [12].

5GDH(C): Aufbauend auf den Generationen von Wärmenetzen nach Lund et al., wird häufig eine fünfte Generation (5GDHC) kombinierter Wärme- und Kältenetze behandelt. Bei Fokus auf die Wärmeseite spricht man von 5GDH. Das Unterscheidungsmerkmal von 5GDHC zu 4GDH ist die gleichzeitige Bereitstellung von Heizung und Kühlung durch dasselbe Netz unter Nutzung von Power-to-Heat-Technologien. Die Netztemperaturen sind sehr niedrig, typischerweise um -5°C bis 20°C . Verteilte Booster-Wärmepumpen (BHP) in den Wärmeübergabestationen nutzen diese Temperaturbereiche als Quelle oder Senke. Für Wärmekonsumenten, die gleichzeitig Kälte produzieren, ist das Netz warm genug, um den Verdampfungsprozess der BHP im Heizbetrieb anzutreiben und den Wärmebedarf zu decken. Für Kältekonsumenten, die gleichzeitig Wärme produzieren, ist das Netz kalt genug, um ihren Kältebedarf über einen direkten Wärmetauscher zu decken oder den Kondensator einer Wärmepumpe in der Übergabestation nachzukühlen.

Smart thermal grids: Smart thermal grids konzentrieren sich auf die Nutzung von Synergien und Effizienzpotenzialen zwischen verschiedenen Netzteilnehmern durch fortschrittliche Kommunikations- und Informationstechnik, inspiriert durch die elektrische Versorgungstechnik. Connolly und Lund et al. [14] definieren smart thermal grids als „ein Netzwerk von Rohren, das die Gebäude in einem Viertel, Stadtzentrum oder einer ganzen Stadt verbindet, sodass sie sowohl von zentralen Anlagen als auch von einer Reihe dezentraler Heiz- oder Kühlproduktionseinheiten einschließlich individueller Beiträge der angeschlossenen Gebäude versorgt werden können.“

2.1.1 Netzkonzept

Um das Konzept von thermischen Prosumernetzen technisch umzusetzen, ist ein Referenz-Netzkonzept erforderlich. Dies umfasst eine hydraulische Infrastruktur und die damit verbundenen Betriebsprinzipien. Nach bestem Wissen der Autoren existierte zum Zeitpunkt des Forschungsprojektes in der Literatur keine Beschreibung eines umfassenden Referenznetzwerk-Konzeptes für Prosumernetze, da diese Art von Netzen noch nicht tiefgreifend untersucht wurde. Es gab jedoch Vorschläge für Infrastrukturkonzepte von Netzen, die bestimmte Aspekte von Prosumernetzen einbeziehen. Daher wurden durch Literaturrecherche zu verwandten Konzepten und umfassende Überlegungen ein konzeptioneller gemeinsamer Nenner abgeleitet und zu einem Referenznetzwerk-Konzept für Prosumernetze verdichtet.

Dies bildete die Grundlage für weitere Untersuchungen im Kontext dieses Forschungsprojektes. Der Stand der Technik zu Planung, Auslegung und Betrieb von heutigen Wärmenetzen findet sich in Standardwerken wieder, wie dem „Planungshandbuch Fernwärme“ [15] oder dem Werk von Frederiksen und Werner [16].

Netzkonfiguration

Das Zweirohrsystem mit einer heißen Versorgungsleitung und einer kalten Rücklaufleitung wird als Standard aus Bestandsnetzen übernommen. Gemäß der zugrundeliegenden Idee von Prosumernetzen sind diese dezentral organisiert. Um kurze Transportwege zwischen den verteilten Prosumern zu ermöglichen, die ihre Modi dynamisch ändern können, kommen zusätzlich zu den traditionellen radialen Topologien auch vermaschte Topologien sowie Kombinationen beider in Frage.

Die Netzseite von thermischen Netzen wird als **Primärseite** bezeichnet, die Seite an der Verbraucher und Erzeuger angeschlossen sind als **Sekundärseite**. Die warme Leitung von Wärmenetzen wird als **Vorlaufleitung** bezeichnet und die kalte Leitung als **Rücklaufleitung**. In Kältenetzen ist dies entsprechend umgekehrt. Bei DHC-Netzen wird je nach primärer Nutzung eine der beiden Leitungen als Vorlaufleitung definiert.

In herkömmlichen Wärmenetzen wird die Vorlaufleitung durch Pumpstationen im Netz mit Druck beaufschlagt, welcher das Trägermedium Wasser entlang des Druckgefälles zu den Verbrauchern und in die Rücklaufleitungen presst. Mit der dezentralisierten Perspektive von Prosumernetzen gibt es zwei hydraulische Funktionsvarianten, welche im Projekt berücksichtigt wurden:

- a) **druckbehaftete** Vorlaufleitung und
- b) **drucklose** Vorlaufleitung.

Die verteilten Prosumer-Wärmeübergabestationen sind die Kernkomponenten, welche für die Implementierung und Steuerung des bidirektionalen Wärmeaustauschs zwischen der Primär- und Sekundärseite sowie innerhalb des Netzwerks verantwortlich sind. Sie müssen dementsprechend auch die treibenden Druckdifferenzen für die Volumenströme erzeugen. Hierfür bedarf es entsprechender dezentraler Pumpen auf der Netzseite der Wärmeübergabestationen (siehe Abschnitt „Bidirektionale Prosumer-Wärmeübergabestation“). Im Fall des druckbehafteten Vorlaufs sind die dezentralen Pumpen lediglich für die Einspeisung von Wärme vonnöten. Bei einer drucklosen Vorlaufleitung wird auch für den Wärmebezug aus dem Netz eine dezentrale Pumpe in der Wärmeübergabestation benötigt.

Vorteil druckbehaftet:

- Verbraucher benötigt keine eigene Netzpumpe, lediglich Regelventil zur Wärmeentnahme
 - ⇒ es müssen keine zwei in Reihe geschalteten Pumpen koordiniert werden
- Integration in bestehende Wärmenetze möglich

Vorteil drucklose Vorlaufleitung:

- Produzent und Verbraucher teilen sich die Druckverluste auf
=> kleinere, günstigere Pumpen möglich
=> wahrscheinlich effizienterer Arbeitspunkt möglich
- Verbraucher kann beziehen, ohne dass ein Erzeuger einspeist

Für 4GDH Prosumer wird eine druckbehaftete Vorlaufleitung verwendet, da die Vorteile der einfacheren Integration in bestehende Wärmenetze und die einfache Integration reiner Verbraucher vereinfacht.

Bei 5GDHC muss unterschieden werden, ob ein gleichzeitiger Wärme- und Kälteverbrauch vorliegt oder es sich um reine / saisonal dominierte Wärme- und Kältenetze handelt. Bei gleichzeitigem Wärme- und Kälteverbrauch wird eine drucklose Wärmeleitung präferiert. Da in diesem Fall alle Teilnehmer Prosumer sind (Kälteentnehmer = Wärmeeinspeiser und umgekehrt), ist es sinnvoll, die Pumpenarbeit auf alle Teilnehmer aufzuteilen und so von kleineren Pumpen und höherer Effizienz zu profitieren.

Ausgleichseinheit

Liegt (saisonal) dominierend Wärme- oder Kälteverbrauch vor, so kann ein unidirektionales Wärme- und Kältenetz sinnvoll sein. Hierbei gibt es eine zentrale Ausgleichseinheit (z.B. einen saisonalen Speicher oder eine Niedertemperaturabwärmequelle) mit einer zentralen Pumpeneinheit, welche die Vorlaufleitung unter Druck setzt (druckbehaftete Vorlaufleitung). Verbraucher entnehmen Wärme oder Kälte mit Hilfe des Regelventils. Verbraucher, welche gegen den Zyklus entnehmen (Wärme im Kältenetz oder umgekehrt) werden nur mit Pumpen ausgestattet, wenn sich der zusätzliche Aufwand lohnt. Abbildung 1 zeigt beispielhaft ein wärmedominiertes, unidirektionales 5GDHC Netz. Der Vorteil bei diesem Konzept ist, dass beispielsweise bei dominierendem Kälteverbrauch im Sommer die warme und kalte Leitung umgedreht werden können und somit die kalte Leitung zur druckbehafteten Vorlaufleitung wird.

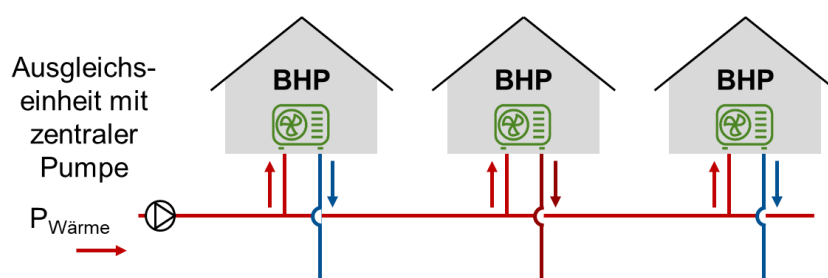


Abbildung 1: Unidirektionales 5GDHC Netz mit druckbehafter Vorlaufleitung [10][17]

Wenn bei prosumerbasierten Wärme- und Kältenetzen die ein- und ausgespeiste Energie der Prosumer nicht übereinstimmt, wird eine Ausgleichseinheit benötigt. Bei Wärmenetzen mit druckbehafter Vorlaufleitung ist hierzu ein zentraler Einspeiser, bzw. eine Ausgleichseinheit notwendig, welche meist aktiv über einen Wärmetauscher an das Netz angeschlossen ist. Bei drucklosen Vorlaufleitungen ist auch eine passive Ausgleichseinheit möglich, z.B. ein direkt an das Netz angeschlossener Wärmespeicher wie in Abbildung 2 dargestellt.

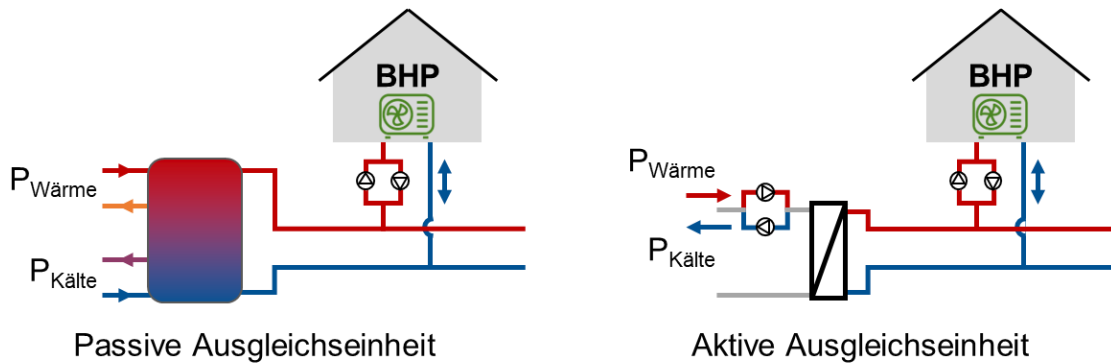


Abbildung 2: Passive und aktive Ausgleichseinheit (basierend auf [17])

Der Vorteil der passiven Ausgleichseinheit mit Wärmespeicher ist, dass der Wärmespeicher einen geringeren Druckwiderstand aufweist als ein Wärmetauscher und somit die notwendige Pumpenergie verringert. Der Wärmespeicher kann kurzfristigen Wärme- oder Kälteüberschuss ausgleichen, ohne sofort aktive Erzeugung oder Verbrauch zu benötigen, was die Effizienz erhöht. Dadurch wird außerdem die Regelung der Ausgleichsenergie einfacher, da diese nicht so schnell wechseln muss, sondern lediglich die Schichtung im Wärmespeicher aufrechterhalten muss.

2.1.2 Bidirektionale Prosumer-Wärmeübergabestation

Der Aufbau der bidirektionalen Wärmeübergabestation, wie sie im Rahmen des Projektes untersucht wird, ist in Abbildung 3 dargestellt.

Herzstück ist der Wärmetauscher. Hierbei wird als Best-Practice aus herkömmlichen Wärmenetzen ein Plattenwärmetauscher mit Gegenstromprinzip übernommen. Damit das Gegenstromprinzip eingehalten werden kann, muss beim Wechsel des Betriebsmodus zwischen Verbraucher- und Erzeugermodus auch die Flussrichtung durch den Wärmetauscher auf beiden Seiten umgekehrt werden.

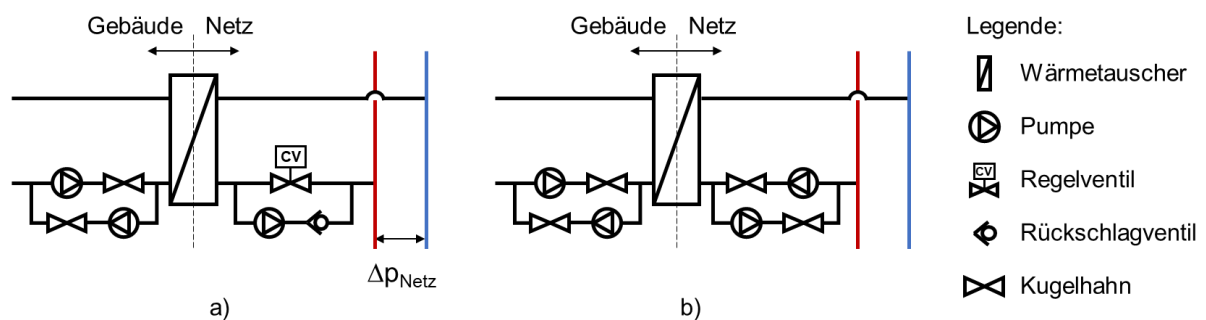


Abbildung 3: Aufbau der bidirektionalen Prosumer-Wärmeübergabestation bei druckbehafteter (a) vs. druckloser (b) Vorlaufleitung (basierend auf [17])

Abbildung 4 und Tabelle 2 illustrieren die verwendete Nomenklatur zur Beschreibung der netzseitigen und hausseitigen Größen im Prosumernetz.

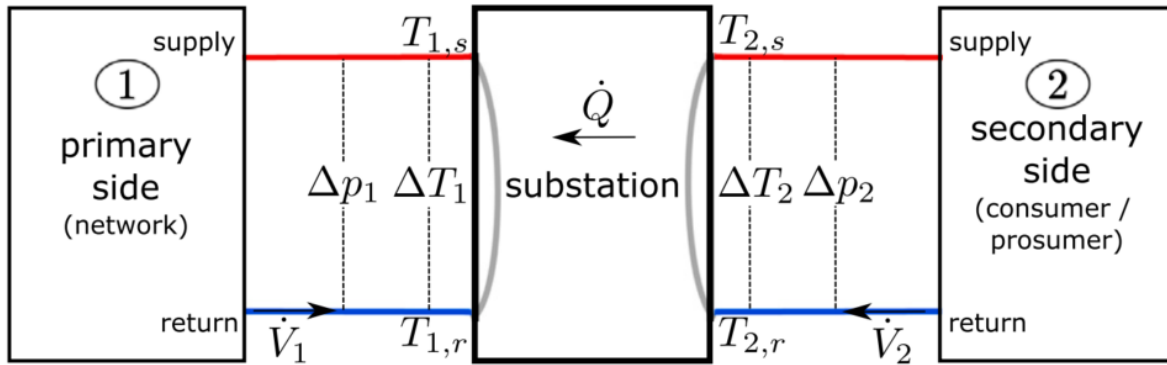


Abbildung 4: Englische Nomenklatur zur Beschreibung der netzseitigen und hausseitigen Größen im Prosumernetz [18].

Tabelle 2: Beschreibung der Nomenklatur

Variablen		
Symbol	Beschreibung	Einheit
T	Temperatur	[K]
ΔT	Temperaturdifferenz	[K]
p	Druck	[Pa]
\dot{V}	Volumenstrom	[m ³ /s]
Indizes		
Symbol	Beschreibung	Einheit
1	primärseitig (netzseitig)	
2	sekundärseitig (prosumerseitig)	
r	im Rücklauf (niederdruck, kalt)	
s	im Vorlauf (hochdruck, warm)	

Netzanschluss und Aktuatoren

Für den Anschluss der Wärmeübergabestationen an das Netz werden in der Literatur vier Prinzipien unterschieden: Vorlauf zu Rücklauf (SR), Vorlauf zu Vorlauf (SS), Rücklauf zu Rücklauf (RR), Rücklauf zu Vorlauf (RS). Für den Verbraucher- und den Erzeugermodus muss jeweils eines dieser Prinzipien angewandt werden.

Von herkömmlichen Netzen wird für den Verbrauchermodus das SR-Prinzip übernommen: Warmes Wasser wird aus der Versorgungsleitung entnommen, Wärme wird durch die Übergabestation auf die Sekundärseite übertragen und das abgekühlte Wasser wird in die Rücklaufleitung abgegeben. Zusammen mit dem SR-Prinzip werden auch die zugehörigen Aktuatoren übernommen: ein Regelventil (CV) auf der Primärseite und eine Verbrauchspumpe (CP) auf der Sekundärseite, die den Prosumer-Heizkreis antreibt. Das Regelventil eignet sich für den Fall der druckbehafteten Vorlaufleitung. Im Fall einer drucklosen Vorlaufleitung bedarf es auch für die Wärmeentnahme einer Entnahmepumpe (EP) auf der Primärseite.

Für den Erzeugermodus wird das RS-Prinzip als Umkehrung des SR-Prinzip im Verbrauchermodus gewählt. Gegenüber dem RR-Prinzip hat es den Vorteil, dass die Spreizung zwischen Rück- und Vorlauf nicht gemindert wird, was einen effizienteren Netzbetrieb ermöglicht. Gegenüber dem SS-Prinzip hat das RS-Einspeiseprinzip den Vorteil, dass prinzipiell auch solche Quellen effizient einspeisen können, deren Temperatur unter der aktuellen Vorlauftemperatur liegt. Um bei druckbehafteter Vorlaufleitung einspeisen zu können, braucht es eine Einspeisepumpe (FP) auf der Primärseite. Auf der Sekundärseite muss entsprechend der Volumenstrom umgekehrt werden, z.B. mit einer Produktionspumpe (PP).

Aufbau

Da es keine Pumpen gibt, welche in beide Richtungen pumpen können, muss die Strömungsumkehr in der Wärmeübergabestation anders erfolgen. Im gezeigten Aufbau in Abbildung 3 werden hierfür zwei parallele Pumpen entgegengesetzt gerichtet. Ein Kreisfluss zwischen den beiden Pumpen wird mit Hilfe zweier Ventile (z.B. elektrische Kugelhähne) verhindert, welche den Strang blockieren, wenn die jeweilige Pumpe inaktiv ist. Abbildung 5 zeigt diese Konfiguration (a) und eine alternative Variante (b) dazu, welche lediglich mit einer Pumpe auskommt, die immer in derselben Richtung durchflossen wird. Der Fluss zwischen Vor- und Rücklaufleitung wird mit Hilfe von zwei 3-Wegeventilen umgedreht. Der Vorteil dieser Konfiguration ist, dass pro Seite nur eine Pumpe benötigt wird und durch den unidirektionalen Volumenstrom durch den Wärmetauscher ein Wärme-/Kältemengenzähler verwendet werden kann, was die Abrechnung einfacher und kostengünstiger gestaltet.

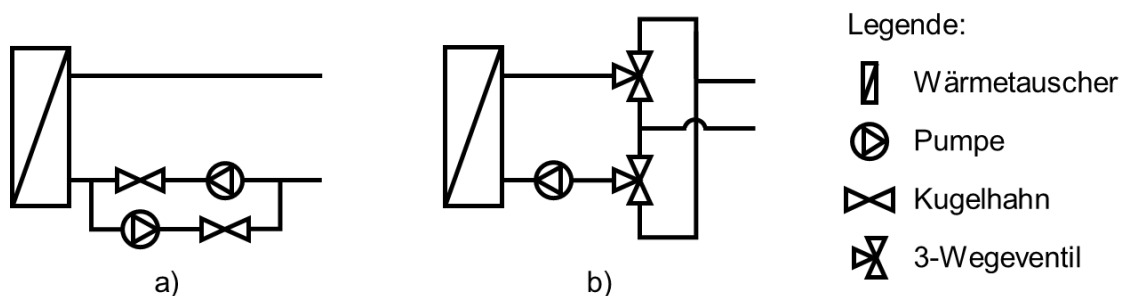


Abbildung 5: Pumpenkonfigurationen mit ein (a) und zwei (b) Pumpen pro Seite für die Flußumkehr in bidirektionalen Wärmeübergabestationen (basierend auf [17])

2.1.3 Prosumerkonfiguration

Prosumer sind Einheiten die sich gegenüber dem Wärmenetz als Erzeuger oder Verbraucher verhalten können und zwischen diesen Modi wechseln. Je nach Konfiguration setzen sich Prosumer zusammen aus Erzeugungs-, Verbrauchs- und Speichereinheiten, zwischen welchen untereinander Energie fließen kann (siehe Abbildung 6). Hierfür können die Heizungssysteme, Wärmeerzeuger und -speicher in unterschiedlichen Konfigurationen hydraulisch miteinander verschaltet werden. Im Rahmen des Projekts wurde untersucht, wie sich verschiedene Prosumerkonfigurationen verhalten, für welche Anwendungsfälle sie sich

besonders eignen und wie der Einfluss der Prosumerkonfigurationen auf die dezentrale Wärmeeinspeisung in Prosumernetzen ist – siehe hierfür auch Abschnitt 2.3.8, „Charakteristika und Herausforderungen thermischer Prosumernetze“ und die Publikation „A comparison of prosumer system configurations in district heating networks“ [19].

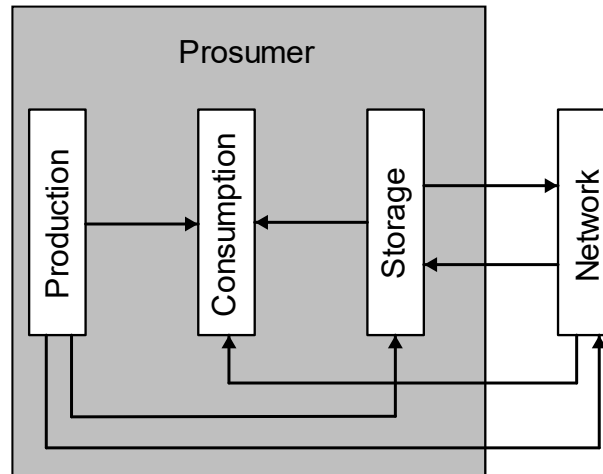


Abbildung 6: Prosumereinheit gegenüber dem Netz als Kombination aus Erzeugungs-, Verbrauchs- und Speichereinheiten mit den möglichen Energieflüssen dazwischen [20].

Als Ergebnis zeigt Abbildung 7 die hydraulische Standardkonfiguration eines Prosumers, wie sie in diesem Projekt angenommen und im CoSES-Labor umgesetzt wurde.

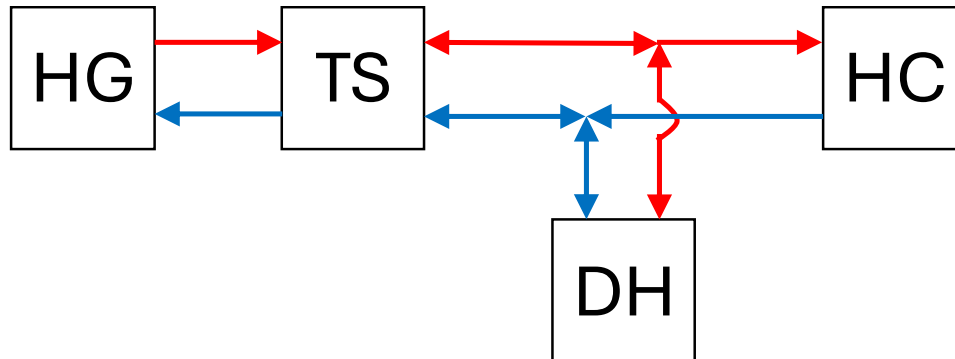


Abbildung 7: Standard-Konfiguration eines Prosumers im Rahmen dieses Projektes und im CoSES-Labor (HG: Wärmeerzeuger, TS: Thermischer Speicher, HC: Wärmeverbrauch, DH: Wärmenetzanschluss durch Übergabestation)

2.1.4 Betriebsarchitektur

Eine Motivation für Prosumerwärmenetze ist die Nutzung von Synergien zwischen den Prosumern und mit dem elektrischen Netz. Um diese Synergien heben zu können, bedarf es eines intelligenten und koordinierten Betriebs des Prosumernetzes, der die Nutzung von Netzwerkeffekten auf übergeordneter Ebene ermöglicht und andererseits die technische Regelung implementiert.

Für eine Betriebsarchitektur von Prosumernetzen wurden im Rahmen des Projektes und der Dissertation von Thomas Licklederer [20] folgende Kernaufgaben identifiziert:

1. **Netzbetriebsoptimierung:** Intelligente Koordination zur Identifizierung und Nutzung von Synergien im Wärmenetz und anderen Sektoren.
2. **Integration:** Sicherstellung einer nahtlosen Einbindung in übergeordnete Strukturen wie Abrechnungssysteme und Märkte.
3. **Prosumer-Management:** Bestimmung der Bedarfe sowie der verfügbaren Kapazitäten und Flexibilitäten der Prosumer.
4. **Technische Machbarkeit:** Sicherstellung der Umsetzbarkeit abstrakter Netz-Zustände unter Berücksichtigung technischer Einschränkungen.
5. **Systemdynamik:** Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens von Systemkomponenten für eine effektive Steuerung.
6. **Umsetzung:** Steuerung der Aktoren auf Feldebene zur Realisierung der gewünschten Systemzustände.

Diese Aufgaben beziehen sich auf verschiedene Abstraktionsebenen. Daher ist es naheliegend einen hierarchischen Ansatz zu nutzen, vergleichbar mit der klassischen Automatisierungspyramide aus der Gebäudeleittechnik: Managementebene, Automationsebene, Feldebene. Die Aufgaben können den Ebenen und spezifischen Modulen zugeordnet werden:

- Aufgaben 1 und 2 gehören zum *District Energy Management System (District EMS)* oder einem marktbasierten Ansatz.
- Aufgabe 3 erfordert ein dediziertes *Prosumer-EMS*, das die interne Situation des Prosumer-Systems kennt und relevante Informationen an das *District EMS* übermittelt.
- Aufgabe 4 wird einem detaillierten Netzmodell zugeordnet, das die technischen Einschränkungen abbildet.
- Aufgabe 5 kann je nach Bedarf sowohl auf dezentraler Feldebene als auch im Netzmodell berücksichtigt werden.
- Aufgabe 6 fällt auf die Feldebene, wo Wärmeübergabestationsregler die technische Umsetzung übernehmen.

Es wurden zwei Betriebsarchitekturen im Detail untersucht (siehe Abbildung 8).

Architektur A orientiert sich an der klassischen dreischichtigen Automatisierungspyramide. Das *District EMS* übernimmt Aufgaben 1 und 2, ein modellbasierter Netzregler auf der Automatisierungsebene übernimmt Aufgabe 4, und die Wärmeübergabestationsregler auf der Feldebene sind für die Aufgaben 5 und 6 zuständig.

- Vorteile:
 - Klar definierte Aufgabenverteilung: Ermöglicht eine strukturierte und effiziente Steuerung und modularen Austausch der einzelnen Elemente
 - Berücksichtigt technische Einschränkungen und Systemdynamiken durch einen modellbasierten Netzregler.
- Nachteile:
 - Hohe Komplexität: Erfordert umfassende Modellierung und Kommunikation zwischen den Ebenen. Die Erstellung und Berechnung des Netzmodells ist

kompliziert und reagiert nicht gut auf schnelle dynamische Veränderungen im System.

- Herausforderungen bei der Echtzeitsteuerung: Verzögerungen durch die komplexe Modellierung können auftreten. Hoher Kommunikationsaufwand zwischen den Wärmeübergabestationenkontrollern und dem Netzmodell.

Architektur B besteht aus nur zwei Ebenen: Das *District EMS* bleibt für Aufgaben 1 und 2 zuständig, während Aufgabe 4 zwischen Management- und Feldebene aufgeteilt wird. Die Aufgaben 5 und 6 verbleiben auf der Feldebene, und die mittlere Automatisierungsebene wird nicht mehr separat betrachtet.

- Vorteile:
 - Einfachheit: Kein Modellierungsaufwand für ein Netzmodell, reduzierte Rechenleistung und reduzierter Kommunikationsaufwand.
 - Schnellere Reaktionszeiten: Entscheidungen und Reaktionen auf dynamisches Verhalten werden auf der Feldebene getroffen.
- Nachteile:
 - Geringere Detailgenauigkeit: Systemische Einschränkungen müssen auf Basis der lokalen Messwerte berücksichtigt und mit den lokalen Reglern antizipiert werden.
 - Höheres Instabilitätsrisiko: Potenziell unzureichende Berücksichtigung systemischer Effekte.

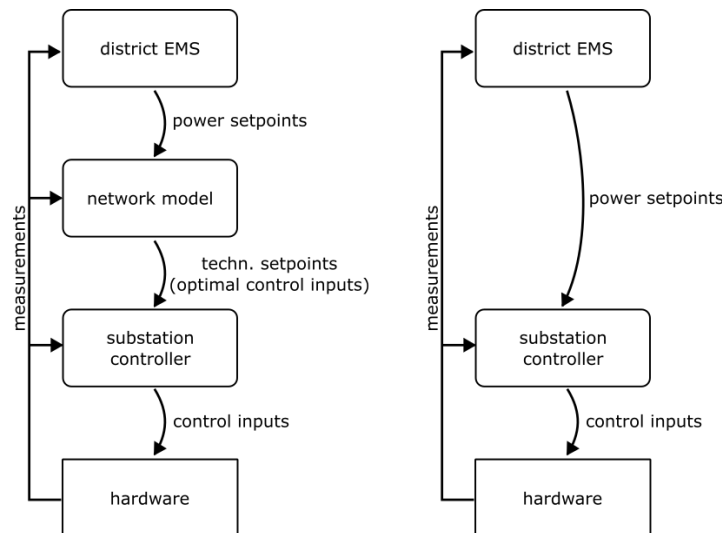


Abbildung 8: Untersuchte hierarchische Betriebsstrukturen A (links) und B (rechts).

Letztlich wurde die zweischichtige Betriebsarchitektur B gewählt. Die Entscheidung basierte auf der geringeren Komplexität, den schnelleren Reaktionszeiten und den geringeren Anforderungen an Modellierung und Kommunikation. Zusätzlich zeigte sich, dass die Erstellung und Berechnung eines komplexen Netzmodells in Architektur A nicht praktikabel war, da es die dynamischen Effekte im System nicht ausreichend berücksichtigen konnte.

Daher wurde die Einfachheit und Robustheit der Struktur B für den praktischen Netzbetrieb bevorzugt. Details zu den einzelnen Elementen finden sich in Abschnitt E2 Systemregelung.

2.1.5 Konzeption Wärmemarkt

Für den Betrieb von Prosumernetzen wurde im Rahmen des Projektes auch die Variante eines lokalen Wärmemarktes untersucht. Hierfür wurden verschiedene Ansätze und Anforderungen diskutiert:

- Allgemeine Anforderungen:
 - o Bei Überschreiten der maximalen Rücklauftemperatur (Wärmeentnahme), bzw. unterschreiten der geforderten Vorlauftemperatur (Wärmeeinspeisung) sind technische Maßnahmen und Sanktionen einzuleiten (Reduzierung des Volumenstroms, Strafkosten etc.)
- Echtzeitmarkt:
 - o Es wird in Echtzeit ein Preis für Wärme festgelegt.
 - o Für die Einspeisung oder Entnahme muss kein Plan erstellt werden.
 - o Zusätzlich kann das Temperaturniveau definiert werden.
- Peer to Peer Wärmemarkt:
 - o Angebot und Nachfrage werden vorab als diskrete Energiepakete in einer Plattform abgegeben und zugeordnet.
 - o Die zeitliche Auflösung der Energiepakete beträgt 15 Minuten.
 - o Es gibt die Möglichkeit, Wärme und Strom gleichzeitig zu handeln.
- Vorgegebene Einspeise- und Entnahmetarife:
 - o Eine zentrale Instanz gibt zeitlich abhängige Einspeise- und Entnahmetarife für einen bestimmten Zeitraum vor.
 - o Zusätzlich kann das Temperaturniveau definiert werden

2.1.6 Standortanalyse

Die Standortanalyse wurde anhand von drei Methoden durchgeführt. Zum einen wurden stichprobenartig die Anforderungen verschiedener Partner aus der Bau- und Immobilienbranche, sowie private Immobilieneigner (und Gemeinden) diskutiert. Darüber hinaus wurden diverse denkbare Standorte tiefergreifend individuell analysiert – aus Datenschutzgründen wird auf eine konkrete Benennung verzichtet.

In einer Management-Diskussion mit mehreren führenden Entscheidern aus mehreren Unternehmen aus dem Energie- bzw. Abrechnungsbereich aus dem bestehenden Netzwerk der Triowatt GmbH heraus wurden relevante Standortfaktoren herausgearbeitet und diskutiert. Die gesammelten Informationen wurden weiterführend empirisch analysiert und Ergebnisse davon abgeleitet.

Die Ergebnisse der Standortanalyse fußen auf den vier zentralen Standortfaktoren:

- Die Energienachfrage ist im Wesentlichen von der Größe der Liegenschaften vor Ort abhängig. Die meisten genauer analysierten realen Standorte sind von Wohnungs- bzw. Wohnungsähnlicher Nutzung geprägt, teils durch signifikante Gewerbliche Anteile ergänzt. So ergeben sich individuelle Energiebedarfscharakteristiken, welche sich idealerweise ergänzen. Wetter und Bausubstanz kann über Klimafaktoren bzw. ggf. Energieausweise im Bestand pragmatisch abgeschätzt werden.
- Die Energieerzeugungsmöglichkeiten sind wesentlich von den Klimabedingungen abhängig (Solare Potentiale, bzw. Temperatur für Luftwärmepumpen). Darüber hinaus

ist ein teils entscheidender Faktor der vorhandene Stromanschluss – so sind Hausanschlüsse von zahlreichen Bestandsimmobilien teils für Wärmepumpen und Elektroladestationen bei reiner ungesteuerter Netzversorgung erheblich unterdimensioniert.

- Die vorhandene Infrastruktur hat erheblichen Einfluss auf zu tätige Investitionen. Zum einen wirken sich vorhandene Bauwerke als Investitionstreiber aus, zum anderen bewirkt vorhandene Erzeuger und insbesondere vorhandene thermische Leitungen als Investitionssenkter – wobei die Qualität, insbesondere die Isolierung bestehender Leitungsnetze, von erheblicher Bedeutung für den späteren Betrieb sind.
- Die zu erwartenden Übertragungsverluste sind im Wesentlichen von der Bebauungsdichte abhängig. Eine Datenanalyse von Verbrauchsdaten bestehender Liegenschaften mit Nahwärmeleitungen (mehrere Gebäude an einer Zentralheizung) im Süd-Ost-bayerischen Raum ergab, dass bestehende Wärmeleitungen teils mit erheblichen Verlusten behaftet sind. Wobei die Auswertung nicht näher die Ursachen analysiert.

Darüber hinaus gibt es noch rechtliche und anderweitige Rahmenbedingungen, wie z.B. Grundstückseigentumsverhältnisse oder insbesondere im städtischen Umfeld bereits bestehende Fernwärmenetze.

Unter Beachtung oben genannter Standortfaktoren mit Ihren spezifischen Eigenschaften werden folgende Standortcluster mit Ihren spezifischen Besonderheiten für im Projekt untersuchte Wärmenetze unterschieden:

Standortcluster	Typische Größe	Besonderheiten	Entscheidungsträger
A Quartierslösung	10-50 Gebäude	Leitungsführung in öffentlichem Grund, z.B. unter Straßen	Verschiedene Optionen
B Stadtähnliche Wohnraumnutzung	3-6 Gebäude Jeweils mehr als 10 Parteien	Große Verbraucher, meist in enger räumlicher Nachbarschaft	1 Ansprechpartner
C Dezentral organisierte ländliche Struktur	2-6 Gebäude Jeweils meist unter 10 Parteien	Häufig mit Gewerbeeinheiten, eher kleinere Einzeleinheiten in größerem Abstand	Mehrere Ansprechpartner
D Zentral organisierte ländliche Struktur	2-6 Gebäude Jeweils grob 10 Parteien	Häufig mittlere Wohnblöcke, teils mit Gewerbe, häufig größerer räumlicher Abstand	1 Ansprechpartner
E Zentral versorgte Gebäudegruppe	2-4 Gebäude Sehr unterschiedlicher Größe	reiner Bestand, mehrere Gebäude werden mit einer zentralen Heizung mit versorgt	i.d.R. 1 Ansprechpartner, ggf. Hausverwaltung

Aus den Standortclustern ergeben sich individuelle typische Herausforderungen und Chancen. Bezugnehmend auf einen möglichen Feldtest liegen Quartierslösungen aufgrund Ihrer Größe und damit einhergehend dem nötigen Investitionsbedarf nicht im Fokus – was sich auch mit den Gesamtprojektergebnissen deckt. Der Ablauf, sowie Kosten und Nutzen eines Feldtests,

bzw. der Umsetzung eines entsprechenden Wärmenetzes wurde exemplarisch mit einem möglichen Interessenten im westlichen Raum Rosenheim konkret besprochen, mit dem Ergebnis hoher Risiken und geringer Renditen im Vergleich zu klassischen Netzen. Cluster B und D unterscheiden sich im Wesentlichen in der räumlichen Nähe und damit einhergehend der erwartbaren Übertragungseffizienz, bzw. den rechtlichen Rahmenbedingungen einer konkurrierenden Fernwärmeversorgung (B). Cluster C ist durch mehrere Herausforderungen geprägt: Größere Distanz bei gleichzeitig geringerem Einzelenergiebedarf und den typischerweise auftretendem Abstimmungsbedarf der unterschiedlichen Eigentümer bzw. verantwortlichen Ansprechpartner wie Hausverwaltung o.ä. Das Cluster E bündelt entscheidende Vorteile – von der zentralen Organisationsstruktur (teils Wohnungseigentumsverhältnisse mit einer Hausverwaltung) mit einem Entscheider, meist vorhandene Leitungssysteme die nötigen Investitionen reduzieren sowie der räumlichen Nähe. Das Cluster E beschreibt jedoch lediglich eine eingeschränkte Marktnische. Die Erfahrungen zum Cluster E beruhen auf der Analyse diverser konkreter Anlagen – in der Größenordnung 2 bis 5 Gebäude, entweder Bestand oder in Planung (zumeist in räumlicher Nähe zu Triowatt, 1 Liegenschaft als Vergleichsreferenz in Thüringen, Ilm-Kreis).

2.2 E2 Systemregelung

In diesem Kapitel werden die Projektaktivitäten und -ergebnisse zur Systemregelung von Prosumernetzen beschrieben. Hierbei liegt die im Abschnitt „Betriebsarchitektur“ diskutierte Struktur zugrunde.

2.2.1 District Energy Management

Das District Energy Management sorgt für die übergeordnete Netzbetriebsoptimierung durch intelligente Koordination der verschiedenen Prosumereinheiten im Netz zur Nutzung von Synergien. Über die technische Funktionalität hinaus hat das Management die Aufgabe der Integration mit dritten Strukturen, z.B. zur Abrechnung.

Zentrales Management

Zentrales Quartiersenergiemanagement hat den Vorteil, dass mit den akkumulierten Informationen aus dem gesamten Netz die Synergienutzung global optimiert werden kann.

Ein zentrales Quartiersenergiemanagement hat jedoch auch einige Nachteile, unter anderem:

- Datensicherheit, da sensible Daten wie Verbrauch übermittelt werden müssen;
- Eigentumsgrenze, falls die Wärmeerzeuger und -speicher in Privatbesitz sind, diese aber zentral angesteuert werden;
- trotz minimaler Systemkosten können die Kosten bei einzelnen Prosumern höher sein als wenn diese für sich optimieren;
- Komplexität des Optimierungsmodells bei steigender Prosumerzahl

Zentraler Optimierer

In einem Vorgängerprojekt wurde ein zentraler Optimierer für das Quartiersenergiemanagement untersucht und entwickelt, welches in Echtzeit thermische und elektrische Energieströme in einer Nachbarschaft optimiert. Hiefür werden automatisiert gemischt-ganzzahligen Optimierungsprobleme generiert und bzgl. eines beweglichen Horizonts gelöst. Unter der Verwendung eines OPC UA Frameworks werden die Anlagen im Quartier angesteuert. Nähere Informationen zu den Untersuchungen im Vorläuferprojekt finden sich in folgender Publikation: „A Digital Platform for Real-Time Multi-Energy Management in Districts

Using OPC UA: Conceptualization, Modeling, Software Implementation, and Laboratory Validation“ [21]. Da Arbeiten hierzu bereits in einem Vorläuferprojekt durchgeführt wurden, stand dieser Aspekt nicht im Mittelpunkt der Projektuntersuchungen von OSkit.

Thermohydraulisches Netzmodell als Regler

Im Vorgängerprojekt wurde die Verwendung eines thermohydraulischen Gesamtnetzmodells als Regler für die Aktuatoren der Wärmeübergabestationen untersucht [22]. Dabei zeigte ein Simulationsmodell, dass der thermohydraulische Netzwerkzustand sehr empfindlich und nichtlinear auf Änderungen der Steuereingaben reagiert. Zudem wurde eine gegenseitige Abhängigkeit der Betriebspunkte der Aktuatoren festgestellt. Dies führt zu einer exponentiell steigenden Modellierungskomplexität mit der Netzwerkgröße, die in der Regel proportional zur Anzahl der Teilnehmer ist.

Der gegenseitige Einfluss der Prosumern deutet auf die Notwendigkeit eines zentralen Netzregler hin. Die Invertierung des Simulationsmodells zu einem Regelungsmodell war jedoch nicht möglich, da das Optimierungsproblem aufgrund hoher Nichtlinearitäten in den Wärmeübertragungsgleichungen und a priori unbekannter Fließrichtungen nicht analytisch gelöst werden konnte. Hydraulische und thermische Teilprobleme lassen sich daher nicht mehr separat lösen, da die Volumenströme Variablen des thermischen Problems sind. Vereinfachungen, Relaxationen oder Heuristiken bieten Lösungsansätze, erfassen jedoch nicht ausreichend die Flexibilität und Komplexität der Prosumernetze für Regelungszwecke.

Um ein Netzwerkmodell als Teil der ursprünglich geplanten Betriebsarchitektur A (siehe Abschnitt „2.1.4 Betriebsarchitektur“) abzuleiten, wäre die Invertierung des Simulationsmodells erforderlich gewesen. Da dies nicht gelang, wurde im Projekt der Fokus auf die Betriebsarchitektur B verlagert. Die Aufgaben des Netzwerkmodells müssen in Betriebsarchitektur B von der Regelung auf Feldebene übernommen werden. Weitere Details hierzu finden sich im Abschnitt „Regelung auf Feldebene“.

Lokaler Wärmemarkt

Ein weiterer zentraler Ansatz, welcher viele der genannten Schwierigkeiten löst, ist ein lokaler Wärmemarkt. Im Strombereich wurden lokale Energiemärkte bereits in diversen Forschungsprojekten erforscht. Durch die höheren Energieverluste im Wärmenetz, mögliche Einspeiserestriktionen durch gegenseitige Pumpenbeeinflussung (siehe Abschnitt „Experimentelle Untersuchungen zum Pump Blocking“) und die Temperaturabhängigkeit der ausgetauschten Energie können diese Ansätze allerdings nicht direkt auf das Wärmesystem übertragen werden.

Aus diesem Grund wurde im Projekt ein Clearingmechanismus entworfen, welcher die Restriktionen des Wärmenetzes berücksichtigt. Der Marktansatz beruht wie der Strommarkt auf dem Prinzip der Double Sided Auction. Potenzielle Käufer reichen ihre Kaufangebote und potenzielle Verkäufer ihre Verkaufspreise ein. Diese werden, wie in Abbildung 9 gezeigt, aufsteigend, bzw. absteigend sortiert, wobei der Schnittpunkt den Preis bestimmt, in diesem Beispiel 0,095 €/kWh. Alle Verkäufer, die darunter liegen, und alle Käufer, die einen höheren Preis geboten haben, verkaufen bzw. kaufen zu diesem Preis.

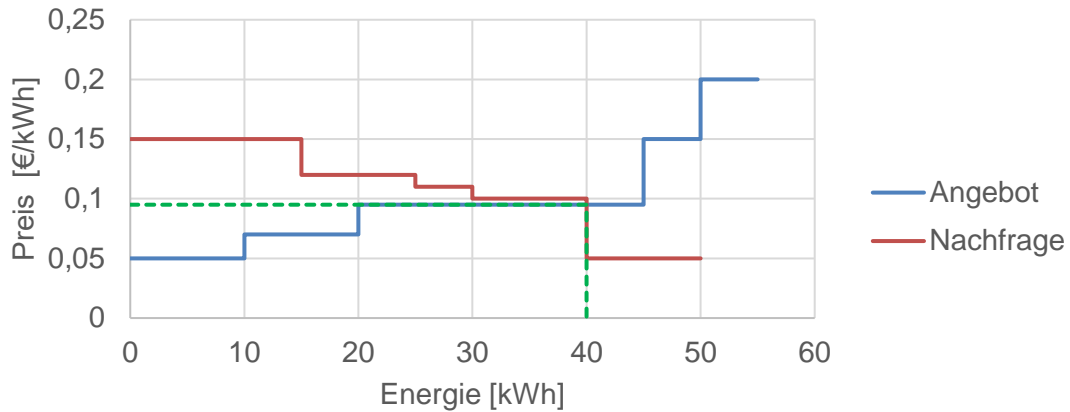


Abbildung 9: Double Sided Auction ohne Restriktionen

Die Double Sided Auction kann als Optimierungsproblem beschrieben werden, wobei der Social Welfare maximiert werden soll.

Social Welfare ist der Bereich zwischen Nachfragekurve und Angebotskurve, welcher sich aus der Summe der Werte (Preis $p_{b/s,i}$ multipliziert mit der gehandelten Energiemenge $e_{b/s,i}$) aller Teilnehmer berechnet. Die Formulierung ohne Restriktionen lautet:

$$\max \left(\sum_i p_{b,i} \cdot e_{b,i} - \sum_i p_{s,i} \cdot e_{s,i} \right) \quad (1)$$

$$\text{Nebenbedingung:} \quad 0 \leq e_{b,i} \leq e_{b,i,max} \quad (2)$$

$$0 \leq e_{s,i} \leq e_{s,i,max} \quad (3)$$

$$\sum_i e_{b,i} + e_{loss} - \sum_i e_{s,i} = 0 \quad (4)$$

In dieser Optimierung stellen Gleichung (2) und (3) sicher, dass die gehandelte Energiemenge zwischen 0 und der maximalen Energiemenge ($e_{b/s,i,max}$) liegt und Gleichung (4) stellt das Gleichgewicht zwischen Verlusten (e_{loss}), verkaufter und gekaufter Energiemenge sicher.

Eine Einschränkung im Wärmenetz ist der Druckverlust über die Leitungen ($\Delta p_{Pipe,j}$) und den Wärmetauscher (ΔP_{HX}). Mit steigendem Volumenstrom ($\dot{V}_{Pipe,i}$) steigt der Druckverlust in den Rohren, welcher geringer sein muss als der von der Pumpe maximal erbringbare Druck ($p_{Pump,i,max}$), siehe Gleichung (5).

$$\sum_{j,s.t.:j \neq i}^n (\Delta p_{Pipe,j} + \Delta P_{HX}) \leq p_{Pump,i,max} \quad (5)$$

Der Druckverlust innerhalb der Leitungen wird mit Hilfe der Darcy-Weißbach-Gleichung (6) berechnet, in welcher die Dichte (ρ), Rohrreibungszahl (λ), Leitungslänge (l) und Rohrdurchmesser (D) berücksichtigt werden. Gleichung (7) zeigt den Zusammenhang zwischen Volumenstrom, Wärmeleistung ($P_{b,i}$) und Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf, wodurch sich eine angepasste Darcy Weißbach Gleichung ergibt (8). Um ein lineares Gleichungssystem sicherzustellen, wird eine konstante Temperaturdifferenz und ein linearer Zusammenhang zwischen Leistung und Druckverlust angenommen (9).

$$\Delta p_{Pipe,i} = \frac{8 \cdot \rho \cdot \lambda \cdot l}{\pi^2 \cdot D^5} \cdot \dot{V}_{Pipe,i}^2 \quad (6)$$

$$\dot{V}_{Pipe,i} = \frac{P_{b,i}}{\rho \cdot c_p \cdot (T_{VL} - T_{RL})} \quad (7)$$

$$\Delta p_{Pipe,i} = \frac{8 \cdot \rho \cdot f \cdot l}{\pi^2 \cdot D^5 \cdot c_p \cdot (T_{VL} - T_{RL})} \cdot P_{b,i}^2 \quad (8)$$

$$\Delta p_{Pipe,i} = k_{Pipe,i} \cdot P_{b,i} \quad (9)$$

Eine weitere Nebenbedingung sind auftretende Wärmeverluste, welche in Gleichung (4) ausgeglichen werden müssen. Diese werden mit Gleichung (10) berechnet, in welcher der Übersichtlichkeit halber ein identischer Verlustfaktor für jede Leitung (f_{loss}) angenommen wird. Die Implementierung eines individuellen Verlustfaktors für jede Leitung ist einfach möglich

$$\sum_i^n (P_{s,i} - P_{b,i}) \cdot (1 - f_{loss})^{n-1} = 0 \quad (10)$$

Neben dem Clearing Algorithmus ist auch die Gebotserstellung wichtig. Ein Ansatz hierfür ist, dass mit Hilfe eines Teilnehmer-Energiemanagementsystems (z.B. auf Gebäudeebene) die Grenzkosten und die Erzeugung/leistung des optimalen Fahrplans bestimmt werden, wie in Abbildung 10 exemplarisch für einen Tag dargestellt. Das Verkaufsangebot entspricht der Differenz zwischen maximaler Erzeugungskapazität und optimalen Fahrplan zu Grenzkostenpreis zuzüglich einer geringen Gewinnmarge. Das Kaufangebot entspricht der gemäß Fahrplan zu erzeugenden Energie bei Grenzkostenpreis, ggf. wieder abzüglich einer Gewinnmarge.

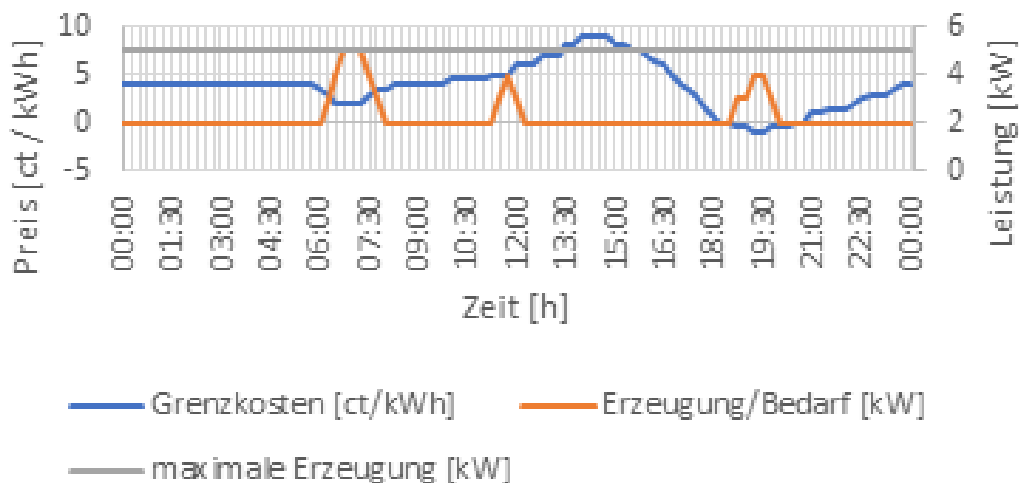


Abbildung 10: Angebotsbestimmung

Dezentrales Management

Für eine dezentrale Steuerung der Gebäude und zur Erstellung von Angeboten für einen Wärmemarkt ist ein Gebäudeenergiemanagementsystem erforderlich.

Gebäudeenergiemanagementsysteme

Ein gängiger Ansatz ist hierbei die Verwendung von MPC-basierten EMS. MPC ist eine Steuerungsstrategie, bei der mathematische Modelle zur Vorhersage des zukünftigen Verhaltens eines Systems verwendet werden. Durch Optimierungsalgorithmen bestimmt MPC die Steuergrößen, die beispielsweise die Energiekosten unter Berücksichtigung der Systemrestriktionen optimieren. Damit MPC in realistischen EMS sinnvoll genutzt werden kann, werden Energieerzeuger, -speicher und -verbraucher meist zu Energiesenken und -quellen vereinfacht, um den Berechnungsaufwand zu reduzieren.

Dies ist allerdings bei EMS für Wärmesystemen oftmals kritisch, da neben der Energiemenge auch dessen Temperaturniveau wichtig für die Nutzung ist. Insbesondere die Temperaturverteilung im Wärmespeicher hat eine große Bedeutung, wie in Abbildung 11 dargestellt ist. Der geschichtete Wärmespeicher (a) kann am oberen Anschluss Wärme bei 60 °C für Warmwasser liefern. Im Gegensatz dazu bietet der gemischte Wärmespeicher (b) nur Wärme bei 40 °C, was aufgrund von Legionellenproblemen zu niedrig ist. Der Energiegehalt beider Wärmespeicher ist allerdings identisch, weshalb die Temperaturinformation wichtiger Teil des MPC-basierten EMS ist.

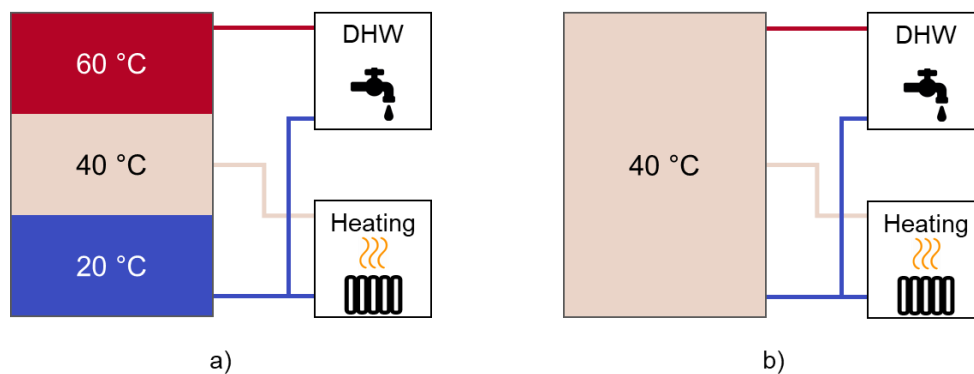


Abbildung 11: Temperaturverteilung innerhalb des Wärmespeichers: (a) geschichteter vs. (b) gemischter Wärmespeicher [17]

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein MPC-basiertes EMS entwickelt und veröffentlicht¹ [23]. Verschiedene Energiearten (z.B. solare Strahlung oder Elektrizität) können gekauft, verkauft, gespeichert, verbraucht oder mit Hilfe von Energiewandlern (z.B. PV oder Wärmepumpen) in eine andere Energie umgewandelt werden.

Der Nutzer kann mit Hilfe einer Excel Maske das Energiesystem und Informationen zur Optimierung (z.B. Zeitschrittweite oder Optimierungsdauer) vorgeben. Dabei werden Kapazität, Wirkungsgrad und laufende Kosten von Energiewandlern -und speichern definiert. Mit Hilfe von Zeitreihen werden die Vorhersagen für den Verbrauch, Einkaufs- und Verkaufspreise, sowie Umgebungszustände (z.B. solare Strahlung oder Temperatur)

¹ <https://gitlab.lrz.de/energy-management-technologies-public/strats-e>

vorgegeben. Der Wärmespeicher in verschiedenen Detailgraden abbildet, welcher ebenfalls über die Excelmaske definiert werden kann. Folgende Modelle sind implementiert:

- 1D Speichermodell mit konstanter Schichthöhe und variablen Temperaturen
Einsatzzweck: Abbildung von unterschiedlichen Temperaturverläufen im Wärmespeicher und stark temperaturabhängigen Prozessen.
- 1D Speichermodell mit konstanter Schichttemperatur und variabler Schichthöhe
Einsatzzweck: Abbildung von Abbildung von unterschiedlichen Temperaturverläufen im Wärmespeicher und Prozessen, deren Effizienz nichtlinear von der Temperatur abhängt.
- Zonen-Speichermodell (linear)
Einsatzzweck: Wärmespeicher mit Zonen, welche sich nur wenig beeinflussen und einem Wärmeerzeuger, welcher geringe Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf hat, wodurch die Zonen nur eine geringe Temperaturdifferenz aufweisen.
- „Power-only“ Speichermodell (simpler)
Einsatzzweck: Wärmesystem, wo eine starke Schichtung des Speichers sichergestellt ist, und einem Wärmeerzeuger mit konstanter Vorlauftemperatur. Dadurch ist sichergestellt, dass die vorhandene Wärmeleistung immer genutzt werden kann.

Die implementierten Speichermodelle wurden experimentell und anhand von Case Studies mit den in Abschnitt „E3 Simulationsbibliotheken und Modellierungsanalysen“ eingeführten Tools validiert. Wie in diesem Abschnitt beschrieben, zeigte sich dabei, dass die Modelle ihren jeweiligen Einsatzzweck gut erfüllen.

Neben dem Gebäudeenergiemanagement auf Basis physikalischer Modelle, arbeitete das Projektteam mit an der Entwicklung eines Gebäudeenergiemanagement-Systems auf Basis von Reinforcement-Learning. Die Ergebnisse hierzu sind veröffentlicht im Paper „Recurrent Soft Actor Critic Reinforcement Learning for Demand Response Problems“ [24]. Dieser Machine-Learning-Ansatz wurde in Untersuchungen mit dem ProHMo Benchmarking-Framework mit anderen Ansätzen verglichen, siehe Abschnitt „Performance-Vergleich verschiedener EMS mit dem ProHMo Benchmarking Framework“.

2.2.2 Regelung auf Feldebene

Mit dem Wegfall bzw. der Unterordnung zentraler Pumpenstationen in Prosumernetzen, werden die Wärmeübergabestationen und deren dezentrale Aktuatoren zu den bedeutenden Einheiten für die Regelung des Netzes auf Feldebene. Es bedarf neuer Regelungsansätze für Wärmeübergabestationen von Prosumern, da diese zusätzlich zum Wärmebezug auch Wärme ins Netz einspeisen und dabei Vorgaben des übergeordneten Managements (siehe Abschnitt „District Energy Management“) zur übertragenen Wärmeleistung erfüllen sollen.

Regelungsproblem Wärmeübergabestation

Das Regelungsproblem von Wärmeübergabestationen in bidirektionalen Prosumernetzen ergibt sich aus der dezentralen Natur der Wärmenetze und der thermohydraulischen Kopplung der Prosumer. Die Herausforderung dabei liegt in der gleichzeitigen Erfüllung mehrerer Regelziele bei begrenzten Stellgrößen. Einerseits müssen die vorgegebenen Temperaturziele auf der Gebäude- und Netzseite eingehalten werden, andererseits muss die übertragene Wärmeleistung präzise geregelt werden. Das Regelungsproblem ist näher beschrieben in der

Publikation „Control of bidirectional prosumer substations in smart thermal grids: A weighted proportional-integral control approach“ [18].

Der zu betrachtende Regelkreis ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt und wird im Folgenden näher beschrieben.

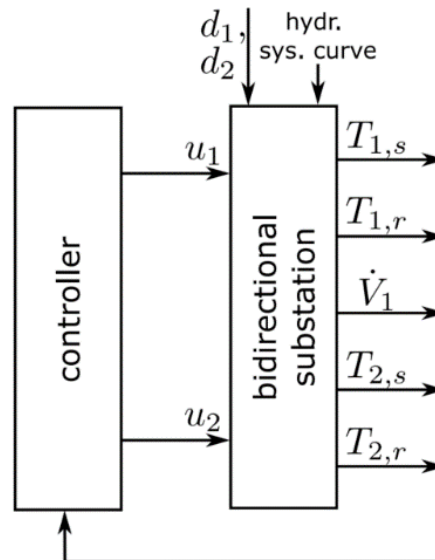


Abbildung 12: Regelkreis für bidirektionale Wärmeübergabestationen [18], Nomenklatur siehe Abbildung 4

Die Stellgrößen des Systems sind die Pumpendrehzahl und die Ventilöffnung in den Übergabestationen. In jedem Prosumermodus (con, pro) ist ein Aktor (Pumpe oder Ventil) auf jeder Seite der Übergabestation (1, 2) aktiv, siehe auch Abschnitt „Bidirektionale Prosumer-Wärmeübergabestation“. Die entsprechenden Größen werden durch die normierten Stellspannungen u_1 , u_2 der Pumpen und Ventile geregelt. Messungen werden vom Volumenstrom auf der Primärseite sowie den vier Temperaturen, die den Zu- und Rückläufen auf beiden Seiten der Übergabestation entsprechen, erfasst. Mit diesen Messungen können die Temperaturdifferenzen und der berechnet werden. Die Vorlauftemperaturen zur Übergabestation stellen Störgrößen d_1, d_2 des Regelungssystems der Übergabestation dar. Für Verbraucher wird die Rücklauftemperatur auf der Sekundärseite durch das Heizsystem des Verbrauchers bestimmt, während für Erzeuger die Vorlauftemperatur auf der Sekundärseite von der Erzeugungseinheit beeinflusst wird. Die Vorlauftemperaturen auf der Primärseite hängen vom lokalen thermo-hydraulischen Netzzustand ab.

Die einzelnen Regelungsziele lassen sich am einfachsten verstehen am Beispiel eines Erzeugers, der einen Verbraucher über das Netz versorgt. Dies wird in Abbildung 13 abstrahiert und im Folgenden erläutert.

Ein übergeordnetes Managementsystem definiert den Sollwert für den Wärmeaustausch mit dem Netz als Referenz, die von den Übergabestationen eingehalten werden muss. Die technischen Systeme der Verbraucher (z. B. Heizungssysteme) erfordern in der Regel eine bestimmte Mindesttemperatur für den ordnungsgemäßen Betrieb. Das vorrangige

Regelungsziel für Verbraucher besteht daher darin, einen vorgegebenen Sollwert für die Vorlauftemperatur auf der Sekundärseite $T_{2,s}^{ref}$ zu erreichen.

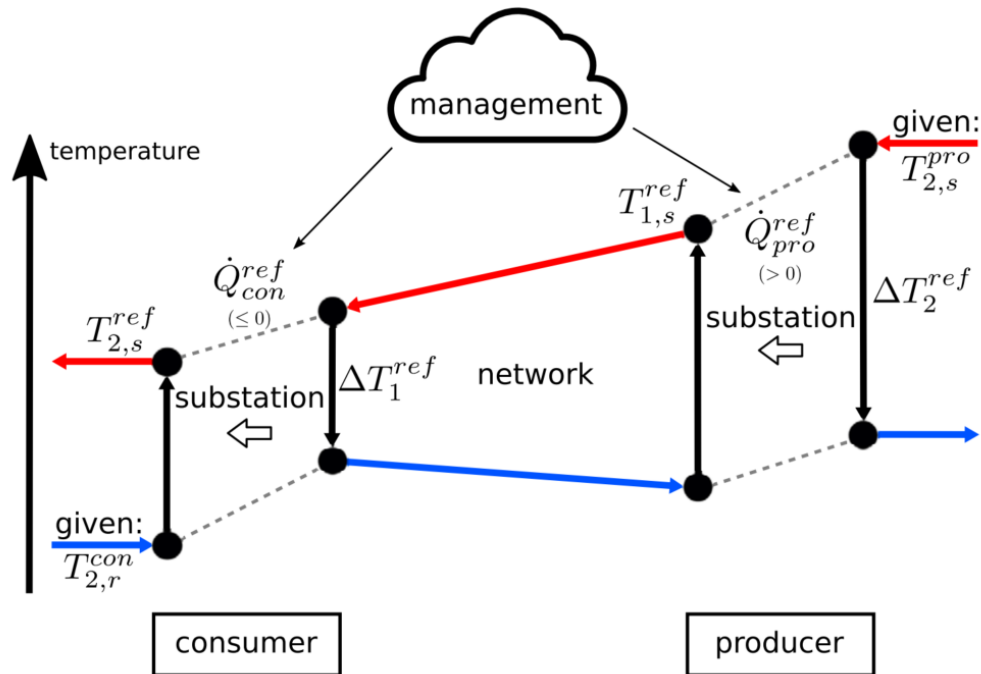


Abbildung 13: Abstrahierter Fall eines Erzeugers, der einen Verbraucher über das Netz versorgt: Darstellung der Regelungsziele und (vorgegebene) Störgrößen für den Betrieb von prosumenten-dominierten Wärmenetzen [18].

Der versorgende Erzeuger muss sicherstellen, dass die dem Netz zugeführte Temperatur hoch genug ist, um die Temperaturanforderungen des Verbrauchers zu erfüllen, wobei potenzielle Verluste an Wärmetauschern und im Netz berücksichtigt werden müssen. Das vorrangige Regelungsziel für Erzeuger besteht daher darin, einen vorgegebenen Sollwert für die Vorlauftemperatur auf der Primärseite $T_{1,s}^{ref}$ zu erreichen. Die Erzeugungseinheiten der Erzeuger arbeiten in der Regel effizienter bei höheren Temperaturdifferenzen. Da die Vorlauftemperatur auf der Sekundärseite von der Erzeugungseinheit bestimmt wird, strebt der Erzeuger an, einen bestimmten Sollwert für die Temperaturspreizung auf der Sekundärseite ΔT_2^{ref} zu erreichen. Um dies zu erreichen, muss die Rücklauftemperatur des Netzes niedrig genug sein, was vom Verbraucher beeinflusst wird.

Da die Netzvorlauftemperatur für den Verbraucher vorgegeben ist, strebt der Verbraucher an, einen bestimmten Sollwert für die Temperaturspreizung auf der Primärseite ΔT_1^{ref} zu erreichen.

Die Regelungsziele sind in Tabelle 3 entsprechend ihrer Prioritäten zusammengefasst. Es gibt drei Ziele für jeden Prosumermodus: T_{high_prio} , \dot{Q} , T_{low_prio} . In Übereinstimmung damit können in jedem Modus zwei Temperaturregelabweichungen $e_{T,1}$ und $e_{T,2}$ für die Primär- und Sekundärseite sowie eine Leistungsregelabweichung e_Q definiert werden. Das übergeordnete Regelungsziel besteht darin, diese drei Abweichungen idealerweise gleichzeitig auf Null zu bringen.

Tabelle 3: Regelungsziele für Prosumerwärmeübergabestationen [18]

Prio	Consumption		Production		gen. name
1	$T_{2,s} \stackrel{!}{=} T_{2,s}^{ref}$	(7)	$T_{1,s} \stackrel{!}{=} T_{1,s}^{ref}$	(8)	T_{high_prio}
2	$\dot{Q} \stackrel{!}{=} \dot{Q}^{ref}$	(9)	$\dot{Q} \stackrel{!}{=} \dot{Q}^{ref}$	(10)	\dot{Q}
3	$\Delta T_1 \stackrel{!}{=} \Delta T_1^{ref}$	(11)	$\Delta T_2 \stackrel{!}{=} \Delta T_2^{ref}$	(12)	T_{low_prio}

Die regelungstechnische Herausforderung besteht zum einen in der starken gegenseitigen Kopplung der verschiedenen Systemkomponenten: Die Hausseite der Wärmeübergabestation wird beeinflusst vom Heizsystem und ist thermisch gekoppelt an die Netzseite. Diese ist beeinflusst vom Gesamtzustand des Netzes und somit gekoppelt an die übrigen Prosumer im Netz. Zum anderen besteht die regelungstechnische Herausforderung darin die drei (bzw. vier) Regelziele durch Beeinflussung von zwei Stellgrößen zu erreichen.

Modellbasierter Regler Wärmeübergabestation

Basierend auf den idealen Wärmetauschergleichungen mit LMTD wurde eine modellbasierte Reglerformulierung untersucht. Aufgrund der deutlich höheren Komplexität gegenüber dem im nächsten Abschnitt beschriebenen PID-Regler mit gewichteter Fehlerfunktion und der dabei nicht wesentlich besseren Performance im simulierten Vergleich wurde der Ansatz innerhalb des Projektes nicht weiter verfolgt.

Der Ansatz beruht auf der Kostenfunktion

$$J = (U_{so} + U_{si}) + 0,5k_Q(Q - Q_d)^2 + 0,5k_{T_{so}}(T_{so} - T_{so,d})^2 + 0,5k_{T_{si}}(T_{si} - T_{si,d})^2$$

mit den Stellgrößen für Quelle U_{so} und Senke U_{si} , der quadratischen Abweichung der Leistungsvorgabe $(Q - Q_d)^2$, sowie der Quellenrücklauftemperatur $(T_{so} - T_{so,d})^2$ und der Senkenvorlauftemperatur $(T_{si} - T_{si,d})^2$. Zueinander gewichtet werden die unterschiedlichen Optimierungsfaktoren mit den Regelungsparametern k_Q , $k_{T_{so}}$ und $k_{T_{si}}$. In den Simulationen wurde letztlich $k_Q = 0,00001$ und $k_{T_{so}} = k_{T_{si}} = 1$ verwendet. Dabei wurde zwischen U und der tatsächlichen Flussmenge ein PT1-Verhalten mit Verstärkung 1 angenommen.

Die Kostenfunktion wurde mathematisch aufwändig entsprechend gelöst und in eine Regelungsalgorithmik überführt. Der Einfluss des Netzes, sowie aller anderen Prosumer koppelt über die Vorlauf-Rücklauf-Druckdifferenz ein. Der Ansatz wurde in einer Python-Simulation implementiert. Abbildung 14 zeigt ein Simulationsergebnis eines Wärmebezugs von $Q_d = 10 \text{ kW}$, wobei die Entnahme zum Zeitpunkt 0s gestartet wird. Zum Zeitpunkt 300 s wurden zusätzliche Verbraucher im Netz zugeschaltet, so dass die Leistungsentnahme kurzfristig auf $Q \approx 6 \text{ kW}$ einbricht, jedoch wieder auf den Sollwert einpendelt.

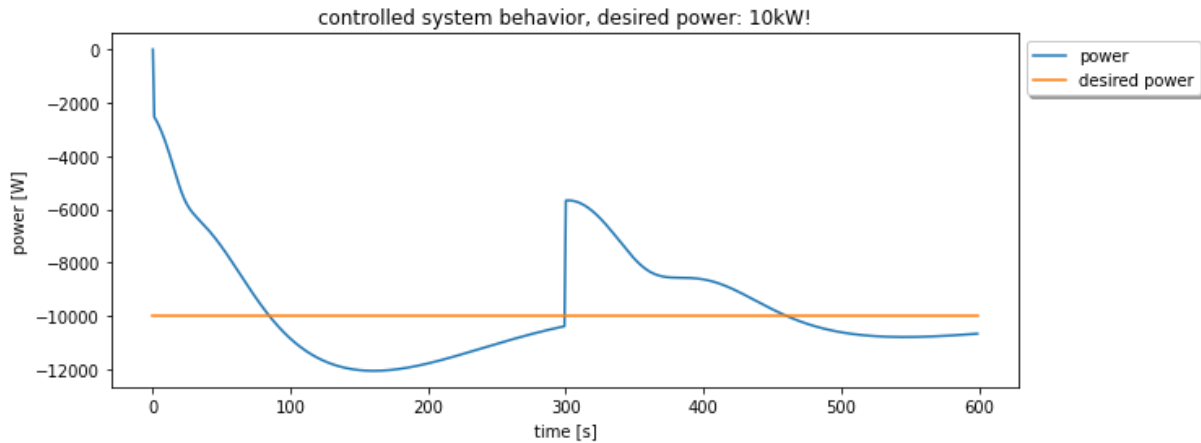


Abbildung 14: Leistungsbezug eines Gebäudes in einem simulierten Netz, wobei die Übergabestationen einem modellbasierten Regelungsansatz geregelt werden.

PID-Regler mit gewichtender Fehlerfunktion

Um die Herausforderungen der im Abschnitt „Regelungsproblem“ beschriebenen Regelung von bidirektionalen Wärmeübergabestationen in Prosumernetzen pragmatisch zu lösen, wurde ein Ansatz auf Basis von PID-Reglern vorgeschlagen. PID-Regler sind weit verbreitet in der Regelung thermischer Systeme und lassen sich systemspezifisch individuell tunen. Aus dem modellbasierten Reglerentwurf in Form eines Optimierungsproblems wurde ein neuartiger Ansatz mit gewichtender Fehlerfunktionen im Preprocessing für den Eingang in die PIDs verwendet. Der Reglerentwurf wird im Detail auch in folgendem Paper beschrieben und untersucht: „Control of bidirectional prosumer substations in smart thermal grids: A weighted proportional-integral control approach“ [18].

Ausgehend von dem identifizierten Regelungsziel, alle drei Regelabweichungen e_Q , $e_{T,1}$ und $e_{T,2}$ gleichzeitig auf Null zu reduzieren, beginnen wir die Entwicklung eines geeigneten Regelungsansatzes. Aufgabe ist die Minimierung einer Zielfunktion ε_{obj} , die mehrere Regelabweichungen kombiniert und gewichtet:

$$\min \varepsilon_{obj}(e_Q, e_{T,1}, e_{T,2})$$

Der übertragene Wärmestrom \dot{Q} ist ein gemeinsames Ziel beider Seiten der Übergabestation. Wir teilen die Regelung für dieses gemeinsame Ziel auf, was zu individuellen Regelungsproblemen für jede Seite der Übergabestation führt:

$$\min \varepsilon_1(e_{T,1}, e_Q) \wedge \min \varepsilon_2(e_Q, e_{T,2})$$

Abbildung 15: Illustration der Grundidee des Regelungskonzepts anhand von Wagen, welche die Regelziele in Balance halten. Abbildung 15 illustriert die Grundidee der Aufteilung des Regelungsproblems auf zwei getrennte Probleme, welche über den übertragenen Wärmestrom gekoppelt sind.

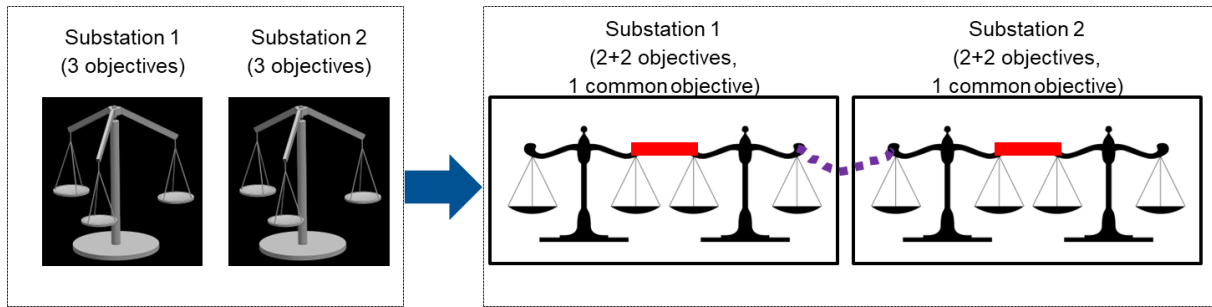


Abbildung 15: Illustration der Grundidee es Regelungskonzepts anhand von Wagen, welche die Regelziele in Balance halten

Weiterführend kombinieren wir die Idee gewichtender Zielfunktionen aus der Optimierung mit proportional-integral-differentialen (PID) Reglern, einer bewährten Methode für die einfache Echtzeitregelung, anstatt ein Optimierungsproblem mit einem zugrundeliegenden Systemmodell (wie dem nichtlinearen LMTD-Modell für Wärmetauscher) zu lösen. Wir schlagen vor, für jeden Aktor im geregelten System einen PID-Regler zu verwenden, wobei jeder PID-Regler eine gewichtete Abweichung als Eingangsgröße erhält. Das bedeutet, dass vier PID-Regler verwendet werden, von denen jeweils zwei aktiv sind, abhängig vom jeweiligen Prosumermodus.

Um die richtungsabhängige Beziehung zwischen Stellgröße und Regelgröße im Kontext von PID-Reglern zu berücksichtigen, müssen gewichtende Abweichungsfunktionen verwendet werden, die die Vorzeichen der enthaltenen Abweichungen berücksichtigen. Der Einfachheit halber entscheiden wir uns für eine lineare Gewichtung unter Verwendung der Gewichte K und G . Die gewichteten Abweichungen ε können für die jeweilige Seite der Übergabestation j und den Prosumertenmodus i nach folgendem Schema berechnet werden:

$$\varepsilon_j^i = K_j^i \cdot e_Q + G_j^i \cdot e_{T,j}^i; i \in \text{con, pro}, j \in 1,2$$

Die Regelabweichungen e werden als Differenz zwischen dem Sollwert r und dem Messwert f berechnet. Um das gleiche Verhalten im Verbraucher- und Erzeugermodus zu gewährleisten, trotz negativer Wärmestrom-Sollwerte im Verbrauchermodus, wird e_Q definiert als:

$$e_Q = r_Q - f_Q = |\dot{Q}^{ref}| - |\dot{Q}|$$

Die Gewichte K und G bestehen aus zwei Teilen: einem Normalisierungsteil und einem relativen Gewichtungsteil.

$$|K_j^i| = \frac{\alpha_j^i}{Q^{nor}}, Q^{nor} > 0, \alpha_j^i \in [0,1]$$

$$|G_j^i| = \frac{1 - \alpha_j^i}{\Delta T^{nor}}, \Delta T^{nor} > 0, \alpha_j^i \in [0,1]$$

Die Vorzeichen der Gewichte K und G hängen von der richtungsabhängigen Beziehung zwischen der Regelgröße und der Stellgröße ab – sie stehen somit in Zusammenhang mit der Zuordnung der Regelungsziele zu den Aktoren.

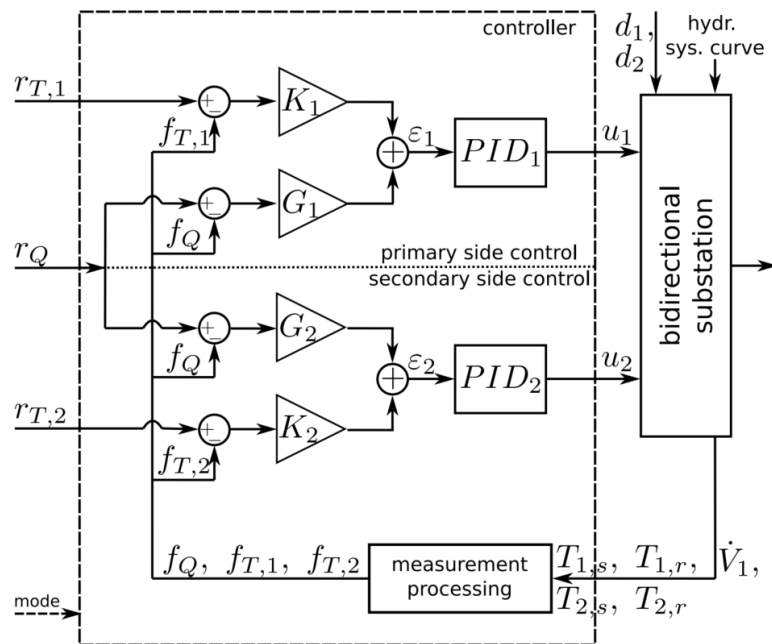


Abbildung 16: Regelkreis des PID-Reglers mit gewichtender Fehlerfunktion

Das Regelungskonzept führt die gemessenen Werte der übertragenen Wärmeleistung und der Temperaturen zurück und berechnet daraus die Abweichungen zu den angestrebten Regelzielen. Die Abweichungen werden mit den Faktoren α bzw. $(1 - \alpha)$ (mit $0 \leq \alpha \leq 1$) gewichtet und mittels nomineller Werte normiert, bevor sie zu einer totalen Abweichung e_{tot} aufaddiert werden. Dieser totale Fehler dient als Eingang für jeweils einen PID-Regler pro Seite, welcher die Geschwindigkeit der jeweiligen Pumpe oder aber die Öffnung des jeweiligen Ventils regelt und damit die Volumenströme beeinflusst.

Die Normierung ist notwendig, um den Offset zu definieren wie stark eine Abweichung in der Temperaturregelung (um 1 K) sich auswirken soll auf den Regler im Vergleich zu einer Abweichung in der Wärmeübertragung (um 1 kW). Die Normierung ist für alle vier Regelkreise einer Wärmeübergabestation (beide Seite und beide Modi) identisch, während die Gewichtung über den α – Faktor theoretisch für jeden der Regelkreise als Parameter individuell angepasst werden kann.

Über das gemeinsame Regelziel der zu übertragenden Wärmeleistung \dot{Q}_{set} wird die physikalische Kopplung der Regelkreise auf Primärseite (Netzseite) und Sekundärseite (Gebäudeseite) auch im Regelungsansatz widerspiegelt. Gleichzeitig wird durch die gewichtende Fehlerfunktion die Herausforderung mit zwei beeinflussbaren Größen auf drei Regelziele regeln zu wollen entspannt. Eine Abweichung in den Temperaturzielen kann zugunsten höherer Genauigkeit bei der übertragenen Wärmeleistung in Kauf genommen werden und umgekehrt.

Welches Regelziel welchem Aktuator zugeordnet werden soll und weshalb wurde in einer Simulationsstudie untersucht. Siehe Abschnitt "PID-Regler und Regelziel-Aktuator-Zuordnung für die Wärmeübergabestationsregelung". Die Gleichungen des entworfenen Reglers können auch folgender Publikation entnommen werden: „Control of bidirectional prosumer substations in smart thermal grids: A weighted proportional-integral control approach“ [18].

Stabilitätsanalyse für Wärmeübergabestationsregelung

Zum entworfenen PID-Regler mit gewichteter Fehlerfunktion wurden System- und Stabilitätsbetrachtungen angestellt. Ein detaillierter Forschungsbericht hierzu wurde veröffentlicht, siehe [25]. Ziel der Untersuchungen war es herauszufinden, ob beim Zusammenspiel der betrachteten bidirektionalen Wärmeübergabestationen in einem Wärmenetz ohne zentrale Regelungselemente instabile oder grenzstabile Zustände auftreten können und inwiefern die verwendete Regelung dies beeinflusst. Hierfür wurde zunächst als Minimalbeispiel das Zusammenspiel eines Erzeugers und eines Verbrauchs betrachtet. Dieses Gesamtsystem wurde thermohydraulisch modelliert und unter Zuhilfenahme plausibler Vereinfachungen in einer nichtlinearen Zustandsraumdarstellung abgebildet. Um konventionelle Methoden der Stabilitätsanalyse verwenden zu können, wurde diese Darstellung linearisiert durch Taylor-Entwicklung um jeweilige Betriebspunkte. Die Repräsentativität dieser Linearisierung wurde untersucht durch Fehleranalyse gegenüber dem nichtlinearen Modell bei gegebenen Inputs und Randbedingungen (siehe Abbildung 17). Dabei zeigte sich, dass das linearisierte Modell zwar genau ist um den Linearisierungspunkt herum, das Systemverhalten bei stark davon abweichenden Betriebspunkten jedoch nicht gut wiedergegeben wird. Das System ist also höchst nichtlinear, was insbesondere aus dem Wärmetauscherverhalten resultiert. Da für diese Art von Systemen nur sehr eingeschränkt Methoden zur Stabilitätsanalyse zur Verfügung stehen, war ein Workaround mehrere linearisierte Systeme zu analysieren, deren Linearisierungspunkte Zustandsraum des nichtlinearen Modells ausreichend abdecken.

Für die Stabilitätsanalyse selbst wurden folgende Methoden betrachtet und aus den nachfolgenden Gründen nicht weiterverfolgt:

- Direkte Methode von Ljapunow: Aufgrund der Komplexität des betrachteten thermohydraulischen Systems konnte keine geeignete Ljapunow-Funktion gefunden werden.
- Indirekte Methode von Ljapunow: erlaubt lediglich die Analyse des linearisierten Systems um einen Linearisierungspunkt, erlaubt lediglich die Analyse des Systems selbst, ohne den verwendeten Regler
- Stabilitätskriterium von Nyquist: benötigt eine Transferfunktion eines linearen Systems, wir betrachten die linearisierten Modelle aber nicht als repräsentativ über den gesamten Betriebsbereich.

Ganz allgemein kann festgehalten werden, dass das System aufgrund der begrenzten Eingänge maximal grenzstabil (z.B. oszillierend) sein kann.

Im weiteren Vorgehen könnten stochastische Methoden (Monte-Carlo-basiert), sowie empirische Stabilitätsuntersuchungen anhand von Simulationen in Betracht gezogen werden, um herauszufinden ob und wann grenzstabile Fälle auftreten. Allgemeiner kann angedacht werden mit weiterfassenden Ansätzen aus der Systemanalyse Aussagen zur Stabilität von Netzen mit beliebiger Anzahl von Prosumern und beliebiger Topologie machen zu können. Dies hätte jedoch den Rahmen des jetzigen Projektes gesprengt.

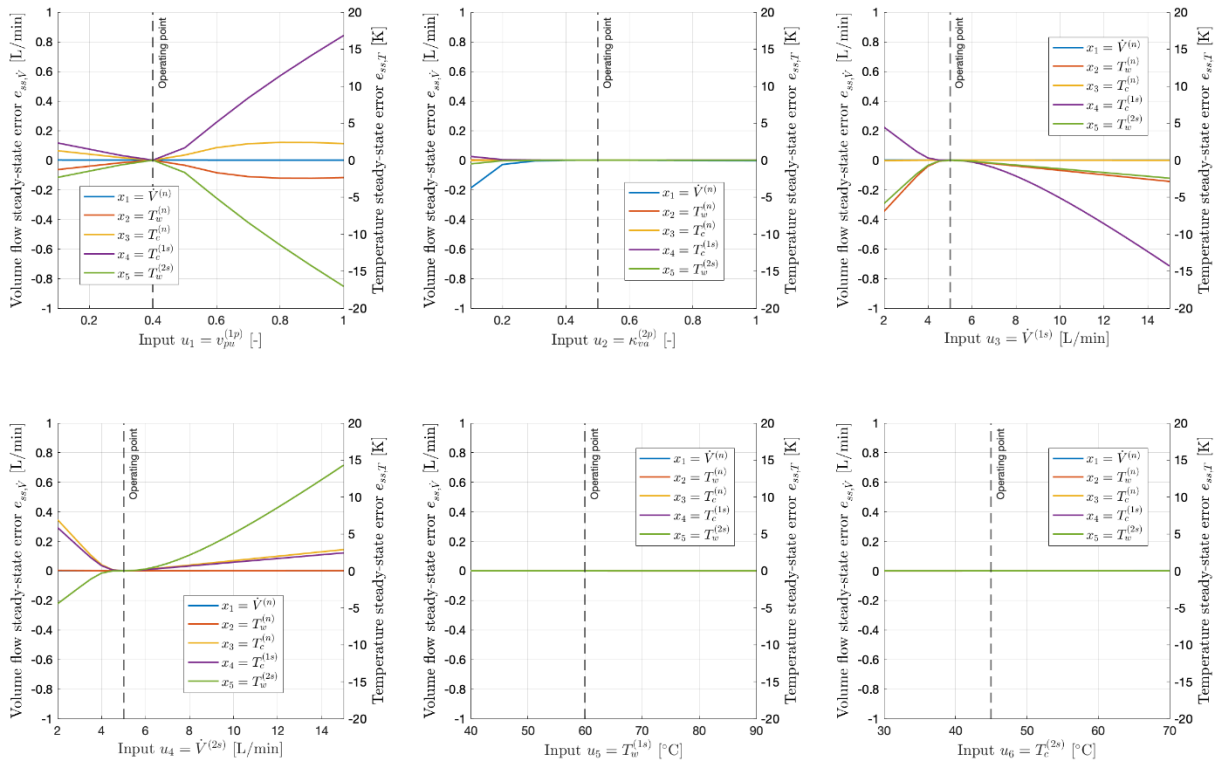


Abbildung 17: Absolute stationäre Fehler zwischen nichtlinearem und linearisiertem Systemmodell, die durch Variation einzelner Eingänge hervorgerufen werden. Alle anderen Eingänge sind dabei auf ihren Wert im Linearisierungspunkt eingestellt.

Regelung der Erzeuger in Prosumern

Um den Betrieb typischer Prosumer in Form von Gebäudeheizungssystemen abbilden zu können, muss eine gewisse Regelung der Erzeuger angenommen werden. Hierfür wurde im Rahmen des Projektes eine robuste, regelbasierte Steuerung entwickelt, welche den Nutzerkomfort sicherstellt und einen realistischen Betrieb abbildet. Die verschiedenen Wärmeerzeuger werden auf Basis der Schichttemperatur im Wärmespeicher ($T_{SP,x}$) aktiviert oder deaktiviert. Die „An/Aus“ Kriterien für verschiedene Wärmeerzeuger sind in Tabelle 4 aufgezeigt. Die Regelung des Heizungssystems im Gebäude versucht die Raumtemperatur entsprechend der Vorgabe zu erfüllen und be- / entlädt entsprechend den Wärmespeicher. Die Vorgabe der Soll-Raumtemperatur kann als fest definierter Wert werden für den Tag und die Nacht oder direkt von einem EMS vorgegeben werden. Die elektrische Batterie im Gebäude wird so be- / entladen, dass der Stromfluss am Netzanschlusspunkt gleich 0 ist.

Tabelle 4: "An/Aus" Kriterien der regelbasierten Steuerung für Wärmeerzeuger in Prosumern

Wärmeerzeuger	„An“ Kriterium	„Aus“ Kriterium
Wärmepumpe	$T_{SP,9} \leq T_{WW,min}$ $T_{SP,4} \leq T_{Hz,min}$	$T_{SP} \geq T_{WW,min} + 5K$ $T_{SP,2} \geq T_{Hz,min} + 5K$
Heizstab	$T_{SP,9} \leq T_{WW,min} - 5K$ $T_{SP,4} \leq T_{Hz,min} - 5K$	$T_{SP,7} \geq T_{WW,min}$ $T_{SP} \geq T_{Hz,min}$
BHKW	$T_{SP,9} \leq T_{WW,min}$	$T_{SP,2} \geq T_{Hz,min}$
Brennwerttherme	$T_{SP,9} \leq T_{WW,min} - 5K$	$T_{SP,2} \geq T_{Hz,min} - 5K$
Warmwasserpumpe	$T_{WW SP,9} \leq T_{WW,min}$	$T_{WW SP,6} \geq T_{WW,min} + 5K$

In den im Projekt erstellten Simulationsmodellen kann über Eingänge die Standardregelung aktiviert oder deaktiviert werden oder die Modulationsvorgaben der verschiedenen Erzeuger von einem EMS vorgegeben werden. Die regelbasierte Steuerung kann dabei als Notfallregelung fungieren, um fehlerhafte oder ausbleibende Vorgaben des EMS zu kompensieren. Dadurch wird verhindert, dass der Nutzerkomfort eingeschränkt wird.

Regelung von Booster-Wärmepumpen

Im Rahmen einer studentischen Forschungspraxis wurde eine Booster-Wärmepumpe vom Typ „WP Max-Grid HiQ F14“ des Herstellers Ratiotherm im CoSES-Labor in Betrieb genommen und in das Steuerungsframework integriert. Dabei handelt es sich um eine Wasser-Wasser Wärmepumpe, die quellseitig mit dem Wärmenetz und sekundärseitig mit Haus 1 des Labors verbunden ist.

Anlass für die Durchführung der Charakterisierung sind die begrenzten Angaben zu den Betriebsdaten durch den Hersteller. Für den im Labor eingesetzten Typ der Wärmepumpe ist nur ein einzelner COP-Wert bei Nennleistung angegeben. Zur Erstellung von detaillierten Simulationsmodellen ist eine breitere Datengrundlage unerlässlich, da das Anlagenverhalten stark von den vorherrschenden Temperaturniveaus und der Verdichterdrehzahl bestimmt wird.

Folgende Arbeitspakete wurden im Rahmen der Forschungspraxis bearbeitet:

- die Ableitung und Implementierung der Betriebsmöglichkeiten aus den technischen Unterlagen des Herstellers und der bereits erfolgten hydraulischen Anbindung im Labor
- die Definition und Programmierung von sicherheitsrelevanten Routinen
- die Planung und Durchführung der Charakterisierungsexperimente
- alle dafür nötigen Anpassungen am hydraulischen und mess- und steuerungstechnischen Aufbau
- die Auswertung und Dokumentation der Erkenntnisse

Konzeptionell ist eine Booster-Wärmepumpe dafür ausgelegt, in Niedertemperaturwärmenetzen oder Netzen mit saisonal gleitenden Temperaturen eingesetzt zu werden. Mittels der Wärmepumpe wird die Netztemperatur auf das für das Haus erforderliche Niveau gehoben.

Das im CoSES-Labor vorhandene Gerät besitzt zusätzlich einen Direktwärmetauscher, der genutzt werden kann, falls die Netztemperatur die Gebäudeanforderungen erfüllt. Auf Netzseite ist eine weitere Pumpe parallel zum Verdampfer installiert, um Spreizung über dem Verdampfer auf einem konstanten Wert zu regeln (Werkseinstellung 3K). Weiterhin bietet das Gerät die Möglichkeit seinen Kältekreis umzukehren, um bei Bedarf Kälteleistung für das Gebäude bereitzustellen und dabei Wärmeenergie in das Netz zurückzuspeisen. Für diesen Fall ist eine zusätzliche Pumpe auf Netzseite installiert. Abbildung 18 zeigt das hydraulische Schema der Wärmepumpe und die zugehörige Sensorik in der Laborumgebung. Die Wärmepumpe ist hausseitig mit einem eigenen Wärmespeicher verbunden. Die eingesetzten Motorventile erlauben verschiedene Konfigurationen zur netz- und hausseitigen Anbindung des Geräts. Die hydraulische Verbindungsvarianten auf Netzseite und deren Auswirkungen sind nachfolgend beschrieben:

- **Vorlauf – Rücklauf**

Anschlusschema wie bei einer konventionellen Übergabestation. Die Druckdifferenz zum Betrieb wird durch das Netz bereitgestellt. Im Heizbetrieb wird dem Wasser aus dem warmen Netzvorlauf Energie entzogen und anschließend kälter in den Rücklauf des Netzes zurückgespeist. Im Kühlbetrieb gibt die Wärmepumpe zusätzlich Wärme an das Wasser im Netz ab, wodurch die Temperatur bei der Rückspeisung in den Netzurücklauf über der des Netzvorlaufes liegt. Dadurch ergibt sich eine verringerte Spreizung im Netz und damit nachteilige Effekte hinsichtlich der Erzeugereffizienz, der Kapazität des Netzes und der Effizienz der Booster-Wärmepumpe im Kühlbetrieb. Der Netzanschluss hingegen bringt keinen Mehraufwand verglichen mit konventionellen Übergabestationen.

- **Rücklauf – Rücklauf**

In dieser Konfiguration ist die Wärmepumpe als Bypass zum Rücklauf des Wärmenetzes verbunden und im Heizfall wird Wärme aus dem Rücklauf des Netzes bezogen. Dadurch verringert sich die Rücklauftemperatur des Netzes, woraus eine höhere Spreizung folgt und damit die Kapazität und Erzeugereffizienz gesteigert wird. Gegenteiliges gilt für den Fall der aktiven Kühlung. Eine passive Kühlung über den Direktwärmetauscher ist abhängig von den Netztemperaturen eher möglich. Der Betrieb in dieser Konfiguration erfordert eine Pumpe, die das Wasser durch den Verdampfer der Wärmepumpe fördert. Zusätzlich muss im Netz ein ausreichender Durchfluss vorhanden sein, um zu vermeiden, dass sich ein hydraulischer Kurzschluss bildet.

- **Rücklauf – Vorlauf**

In dieser Konfiguration ist eine zusätzliche Pumpe erforderlich, die ausreichend dimensioniert sein muss, um die im Netz bestehende Druckdifferenz zu überwinden. Im Fall der aktiven Kühlung fungiert die Wärmepumpe als Wärmeerzeuger, womit diese Konfiguration vor Allem für bidirektionale Wärmenetze interessant ist. Der Heizbetrieb hingegen ist hinsichtlich der Effizienz der Wärmepumpe und der Auswirkungen auf die Temperaturniveaus im Netz nicht sinnvoll.

- **Vorlauf – Vorlauf**

Analog zur Konfiguration „Rücklauf – Rücklauf“ ist hier eine Pumpe und ein gewisser Volumenstrom im Netz zur Vermeidung von hydraulischen Kurzschlüssen erforderlich. Im Bezug auf die Auswirkungen auf die Netztemperatur ist im Heizfall die Konfiguration „Vorlauf – Rücklauf“ sinnvoller. Bei der aktiven Kühlung ergibt sich verglichen mit dem Rücklauf als Quelle generell ein niedrigerer COP und die Wärmepumpe erhöht die Netzvorlauftemperatur.

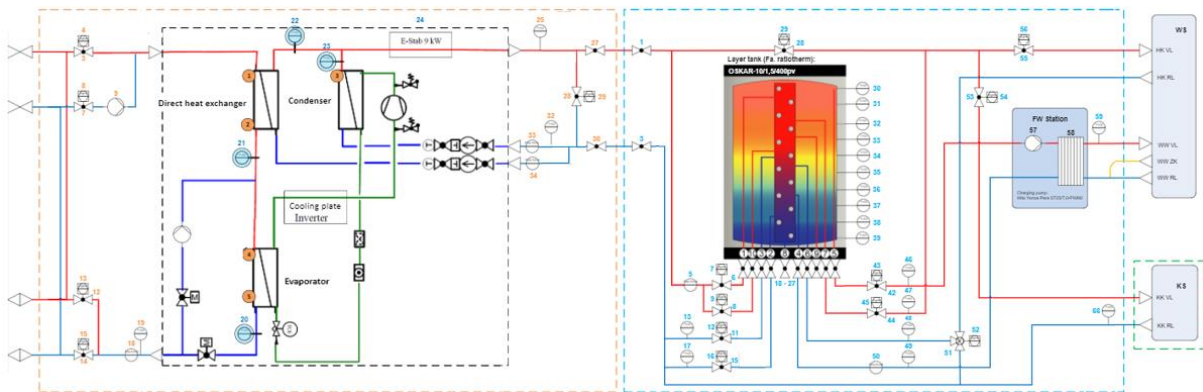


Abbildung 18: Hydraulik- und Messtechnikschemata der Booster-Wärmepumpe

Entsprechend der technischen Unterlagen wird das Gerät über ein 0-10 V Signal angesteuert, das als Vorlaufsolltemperatur interpretiert wird. Die Anforderung des Kompressors für den aktiven Heiz- oder Kühlmodus erfolgt jeweils über ein Digitalsignal. Weiterhin ist herstellereitig die Ansteuerung ohne Temperaturvorgabe implementiert. Hierbei läuft die Wärmepumpe mit konstanter Drehzahl, welche manuell am Display des Geräts festgelegt werden kann. Zur Automatisierung der Charakterisierungsexperimente wurde die interne Gerätesoftware durch den Hersteller auf Anfrage so modifiziert, dass die Verdichterdrehzahl über das 0-10V Signal vorgegeben werden kann. Diese Art der Ansteuerung ermöglicht zusätzlich die Regelung der aufgenommenen elektrischen Leistung der Wärmepumpe um beispielsweise den Strombedarf der Wärmepumpe an den PV-Überschuss anpassen und dadurch den Eigenverbrauch am erzeugten Strom zu optimieren.

Zur Charakterisierung der Wärmepumpe im Heizbetrieb wurde die Anlage quelseitig mit einem Netzemulator des Labors verbunden. Der Emulator verfügt über elektrische Heizelemente, mit welchen die Quelltemperatur variiert werden kann. Hausseitig wird der Speicher beladen, wobei der Vorlauf mit dem obersten Anschluss und der Rücklauf mit dem untersten Anschluss verbunden ist, um das gesamte Speichervolumen zu nutzen. Steigt die Rücklauftemperatur über einen Schwellwert wird der Speicher über das Wärmesenkenmodul gekühlt. Zur Charakterisierung des thermodynamischen Verhaltens der Wärmepumpe wurden 12 Messreihen mit unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt. Variiert wurde dabei die Kombinationen aus Netzvorlauftemperatur (12°C, 20°C, 30°C und 40°C) und Rücklauftemperatur auf Sekundärseite (30°C, 40°C und 50°C). Innerhalb einer jeden Messreihe wurde die Verdichterdrehzahl in 5 % Stufen von 25 % auf 100 % erhöht. Gleichzeitig wurden alle relevanten Volumenströme, Temperaturen und die aufgenommene elektrische Leistung sekundlich gemessen und aufgezeichnet, um den COP der Anlage unter den verschiedenen Betriebsbedingungen zu ermitteln. Exemplarisch ist die Messreihe mit den Randbedingungen 20°C Quelltemperatur und 30°C Rücklauftemperatur in Abbildung 19 gezeigt. Aus der Messung geht hervor, dass die Mindestdrehzahl der internen Regelung bei etwa 35 % liegt, da unterhalb dieser Grenze eine Änderung am Drehzahlstellsignal „P-T_Set_HP“ keinerlei Einfluss auf das Verhalten der Anlage zeigen. Das Rauschen auf der in grau dargestellten Zeitreihe der Rücklauftemperatur ist auf die Wechselwirkung der Kondensatorpumpe und dem Regelventil zur Rücklaufanhebung zurückzuführen. Die genannte Pumpe wird von der Wärmepumpe intern geregelt und sollte die Spreizung über dem Kondensator auf einen manuell einstellbaren Wert (Werkseinstellung 8K) konstant halten. In der Messreihe ist jedoch ein lineares Verhalten von Spreizung und Drehzahl zu erkennen. Da die Rücklauftemperatur in die Berechnung der thermischen Leistung und damit in den COP einfließt, überträgt sich das Rauschen auf diese beiden Kennlinien.

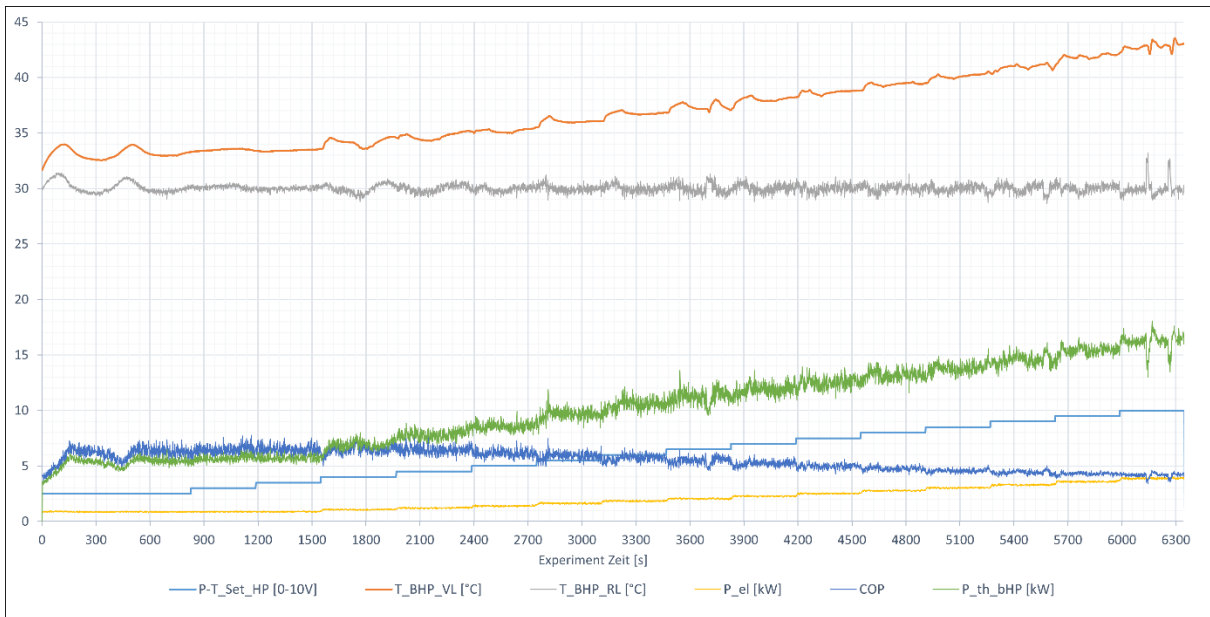


Abbildung 19: Charakterisierungsmessreihe der Booster-Wärmepumpe bei 20°C Netztemperatur und 30°C hausseitiger Rücklauftemperatur

Innerhalb der 12 Messreihen wird jede Stufe für die Drehzahlvorgabe 6 Minuten gehalten. Zur Weiterverarbeitung der aufgezeichneten Rohdaten wurden für die einzelnen Drehzahlstufen ein Mittelwert über die relevanten Werte gebildet, wobei die Messwerte nach jedem Sprung bis zum Erreichen eines stabilen Zustands ausgenommen wurden. Die resultierenden Mittelwerte wurden einerseits für eine fixe Drehzahl und variablen Temperaturen auf Netz- und Gebäudeseite sowie andererseits bei fixer Netztemperatur und variabler Drehzahl und Gebäuderücklauftemperatur ausgewertet. Exemplarisch sind in Abbildung 20 die gemessenen COP-Werte für 60% und 100% Drehzahl und in Abbildung 21 bei 12°C Netztemperatur gezeigt.

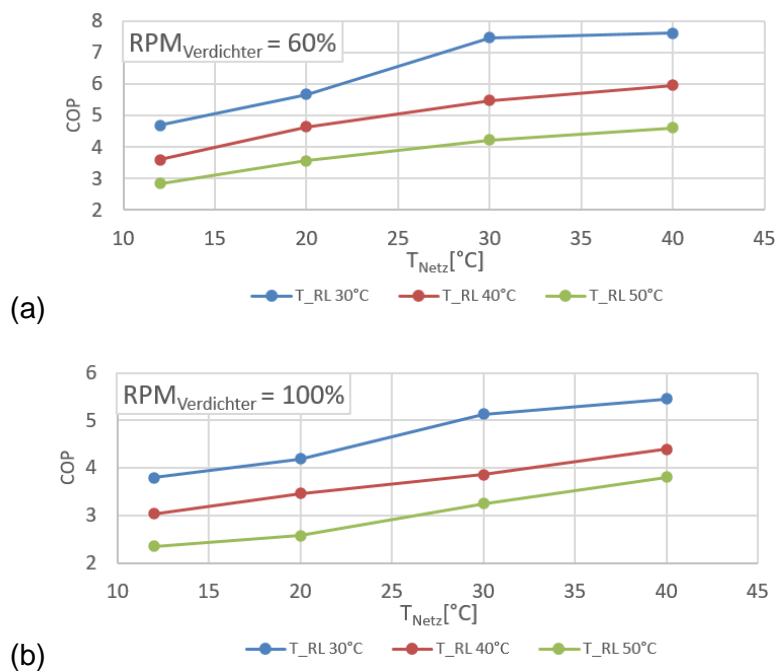


Abbildung 20: Gemittelte COP-Werte der Boosterwärmepumpe bei variablen Netz- und Gebäuderücklauftemperaturen und einer Verdichterdrehzahl von (a) 60% und (b) 100%.

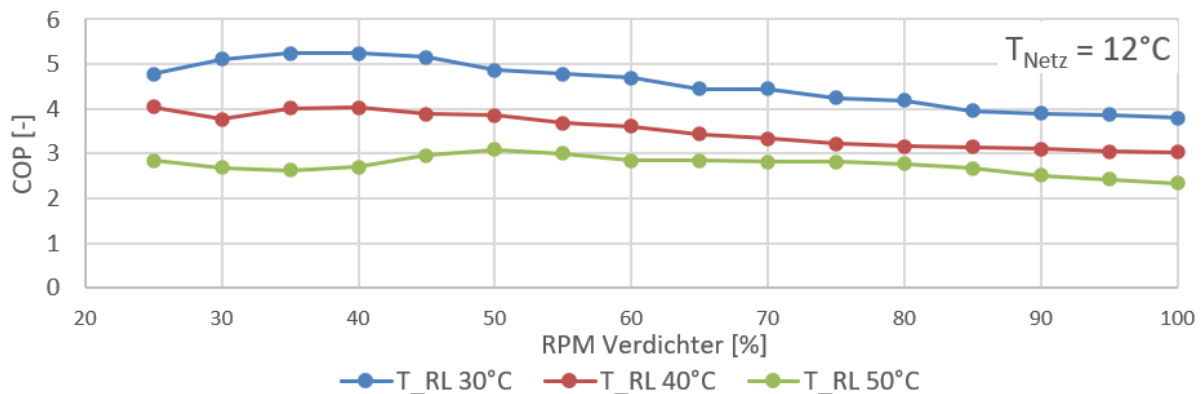


Abbildung 21: Gemittelte COP-Werte der Boosterwärmepumpe bei variabler Verdichterdrehzahl und einer Netztemperatur von 12°C.

2.3 E3 Simulationsbibliotheken und Modellierungsanalysen

Für die Entwicklung und Erprobung von Regelstrategien zur Prosumerintegration sind detaillierte Simulationen von entscheidender Bedeutung. Die Simulationsmodelle dienen dabei als digitaler Zwilling des CoSES-Labors, um die Aussagekraft der Simulationen zu erhöhen und die entwickelten Regelstrategien ohne umfangreiche Anpassungen im Labor mit realer Hardware testen zu können.

Daraus ergeben sich mehrere Anforderungen:

- Exakte Nachbildung der kommerziellen Komponenten des CoSES-Labors, einschließlich ihrer internen Regelstrategien,
- Realistische Darstellung des Wärme- und Kälteverbrauchs,
- Simulation der Bidirektionalität im Wärmenetz und ihrer Auswirkungen auf das hydraulische System,
- Minimierung der Rechenzeiten.

Zunächst wurden bestehende Modellierungsansätze, Werkzeuge und Modellbibliotheken durch eine umfassende Literaturrecherche und eine Online-Umfrage unter Tool-Entwicklern und Experten recherchiert. Die Werkzeuge wurden hinsichtlich ihrer Modellierungsansätze, Anwendungsbereiche und funktionalen Fähigkeiten verglichen und ihre jeweiligen Stärken und Einschränkungen hervorgehoben. Es zeigte sich, dass ein zunehmender Trend zu akausalen Modellierungen für die Simulation von 4GDHC- und 5GDHC-Systemen besteht. Während kommerzielle Tools überwiegend sequenzielle Modellierungen verwenden, die sich separat auf Hydraulik und thermische Aspekte konzentrieren, deuten wissenschaftliche Publikationen auf integrierte Ansätze hin. Darüber hinaus besteht Interesse an dynamischen Simulationen und Echtzeitanalysen von Netzen. Neuere Tools beginnen Funktionen für 4GDHC und 5GDHC sowie Co-Simulation zu integrieren, was auf einen Trend zu umfassenderen und integrierten Modellierungen hinweist.

Es wurde jedoch auch festgestellt, dass es an Literatur zur mathematischen Optimierung von DH-Netzen mangelt. Angewandte Forschung konzentriert sich größtenteils auf spezifische

Fallstudien, es besteht ein kritischer Mangel an Modellvalidierung unter realen Betriebsbedingungen, mit standardisierten Testfällen und fortgeschrittenen Steuerungsstrategien. Zudem befindet sich die Entwicklung physikalisch angemessener Modelle zur Optimierung der Betriebssteuerung in Wärmenetzen noch in einem frühen Stadium und ist für ingenieurtechnische Anwendungen ungeeignet.

Abschließend lässt sich sagen, dass trotz erheblicher Fortschritte bei den Simulationswerkzeugen für Fernwärme-Netze, mit einer Diversifizierung der Modellierungsansätze und einer Verbesserung der funktionalen Fähigkeiten, die Branche weiterhin Herausforderungen in Bezug auf Standardisierung, Validierung und Optimierung gegenübersteht. Die Erkenntnisse dieser Analyse wurden in folgendem Paper veröffentlicht: „Design and simulation of district heating networks: A review of modeling approaches and tools“ [26].

Mit Bezug auf die oben dargestellten Anforderungen, die unterschiedliche Schwerpunkte und Detailtiefe an die Simulationsbibliotheken stellen, wurde entschieden, zwei parallele Bibliotheken zu entwickeln:

- Prosnet, das sich auf das thermohydraulische System des Wärmenetzes konzentriert, und
- ProHMo, das die Gebäudemodelle des CoSES-Labors abbildet und den Schwerpunkt auf die Energieflüsse innerhalb der Gebäude legt.

Beide Simulationsbibliotheken basieren auf Modelica, einer objektorientierten Simulationssprache, die sich hervorragend zur Modellierung multiphysikalischer Systeme eignet. Insbesondere die Möglichkeit akausaler Verbindungen macht Modelica prädestiniert für die Analyse bidirektionaler Wärmenetze.

Aus historischen Gründen wurde Prosnet in Dymola und ProHMo in SimulationX implementiert. Bei Bedarf können die beiden Bibliotheken mithilfe von Functional Mock-up Units (FMUs) gekoppelt werden, um eine integrierte Simulation zu ermöglichen.

2.3.1 Wärmetauschermodellierung

Um das Verhalten der Wärmeübergabestationen zu untersuchen, wurde die Modellierung von Gegenstrom-Plattenwärmetauschern als zentrales Element der Übergabestation durchgeführt. Um modellbasierte Regelungsansätze vorzubereiten, erfolgte dies zunächst in Form mathematischer Gleichungen, bevor die Modellierung mit *Modelica* umgesetzt wurde. Dabei wurden nichtlineare Gleichungen aus der Thermodynamik zur Beschreibung des idealisierten Gegenstroms verwendet und mit einer vereinfachten Variante verglichen. Letztere nutzt statt der logarithmischen mittleren Temperaturdifferenz (LMTD) die arithmetische mittlere Temperaturdifferenz (AMTD).

Die Motivation für die Verwendung der AMTD lag darin, dass sie ein lineares Gleichungssystem ermöglicht, welches in linearen Optimierungsproblemen (LP) genutzt und einfach gelöst werden kann. Allerdings zeigte sich, dass die vereinfachten Gleichungen das Verhalten des Wärmetauschers in den Randbereichen nicht ausreichend genau abbilden. Abbildung 22 veranschaulicht den absoluten Fehler zwischen den berechneten Auslass-temperaturen bei Verwendung der AMTD im Vergleich zur LMTD. Dabei wurde festgestellt, dass das AMTD-Modell rechnerisch Austrittstemperaturen ergeben kann, die höher sind als

die höchste Eingangstemperatur des Wärmetauschers. Dies widerspricht dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik und ist physikalisch nicht möglich.

Aus diesem Grund erweist sich das AMTD-Modell mit linearen Gleichungen als ungeeignet für eine realistische Abbildung des Wärmetauscherverhaltens. Um ein rechenintensives nichtlineares Modell als Reglerbasis zu vermeiden, wurde ein alternativer Ansatz für die Regelung bidirektionaler Prosumer-Übergabestationen gewählt, wie dies im Abschnitt "PID-Regler mit gewichteter Fehlerfunktion" erläutert ist.

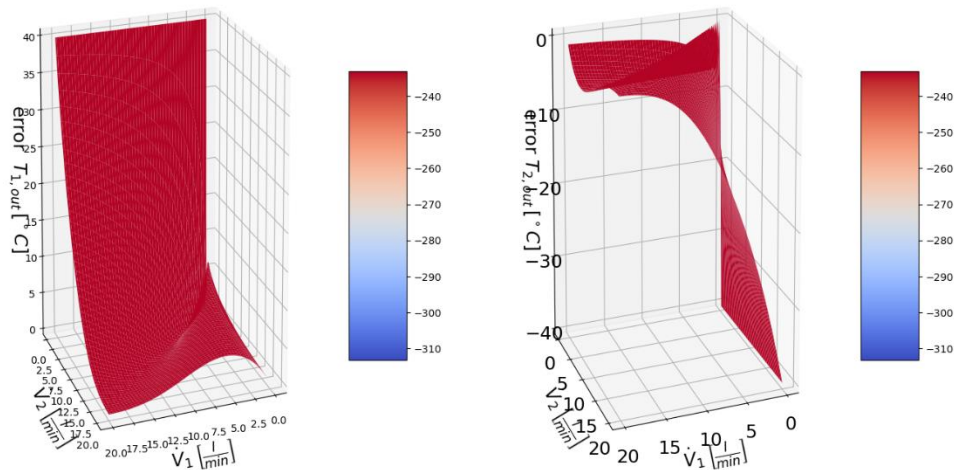


Abbildung 22: Absoluter Fehler zwischen idealen Wärmetauschergleichungen mit arithmetischer mittlerer Temperaturdifferenz und logarithmischer mittlerer Temperaturdifferenz – netzseitige Auslasstemperatur links und hausseitige rechts bei konstanten Einlasstemperaturen.

2.3.2 Bibliothek zur Simulation von Prosumer-Wärmenetzen - Prosnet

Anknüpfend an Vorarbeiten aus dem MEMAP-Projekt [27] wurde die Entwicklung einer Bibliothek in Dymola zur Simulation von Prosumer-Wärmenetzen nach Vorbild des CoSES-Labors vorangetrieben. Damit steht eine Modelica-Bibliothek zur Verfügung mit der benutzerfreundlich Simulationsmodelle diverser Netzkonstellationen konfiguriert und thermohydraulisch in Dymola simuliert werden können. Die Bibliothek ist öffentlich auf Github unter dem Namen „ProsNet“ zugänglich und wurde in einem Paper näher beschrieben [28]. Wie im realen Netz ist auch in der Bibliothek die Wärmeübergabestation zentrales Element. Es stehen Modelle für Wärmeübergabestationen nach Vorbild des CoSES-Labors und der in Abschnitt „Bidirektionale Prosumer-Wärmeübergabestation“ vorgestellten Konfiguration zur Verfügung. Diese sind kombiniert mit idealisierten Prosumer-Modellen, sodass das Prosumer-Verhalten als Input von außen vorgegeben werden kann. Genau hier ist die Schnittstelle zu Hausmodellen, welche die interne Anlagenkonfiguration von Prosumern abbilden und in der Bibliothek „ProHMo“ modelliert werden (siehe nächster Abschnitt).

Im Vergleich zu den Vorarbeiten wurde im Rahmen des Projektes die existierenden Teilmodelle der Wärmeübergabestation zu einem Gesamtmodell zusammengefasst und die Schnittstelle des Wärmeübergabestationsmodells zu anderen Modellen standardisiert (siehe Abbildung 23). Dies erlaubt eine noch übersichtlichere Konfigurierung von Wärmenetzkonstellationen. Außerdem wurde der in Abschnitt „PID-Regler mit gewichteter

Fehlerfunktion“ beschriebene Regler als Standard-Regelung für bidirektionale Wärmeübergabestationen in die Bibliothek eingepflegt.

Mit Hilfe der ProsNet-Bibliothek wurden diverse Simulationsstudien durchgeführt, welche im Abschnitt „Simulative Untersuchungen“ näher beschrieben sind.

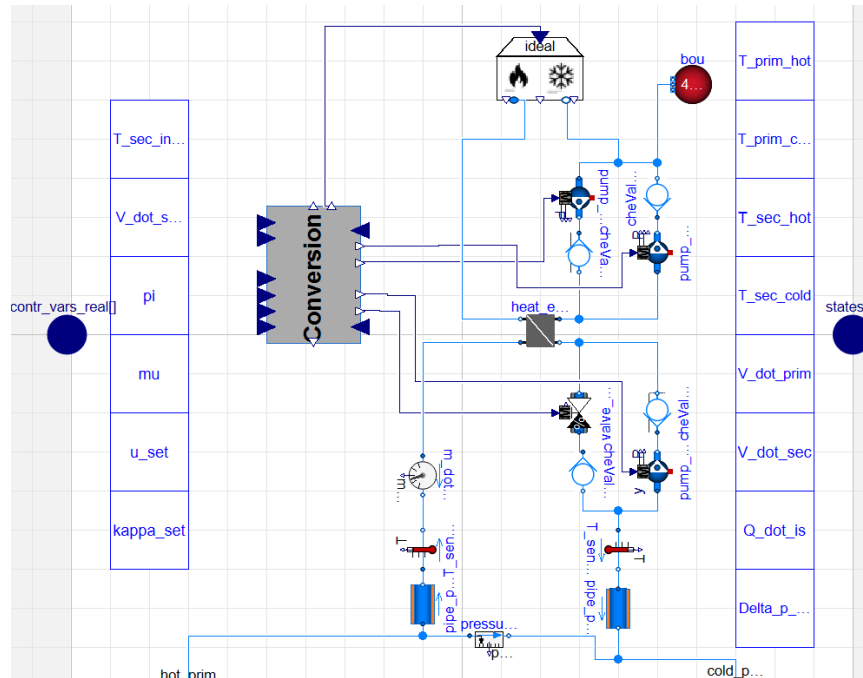


Abbildung 23: Wärmeübergabestationsmodell in der ProsNet-Bibliothek in Dymola

2.3.3 Bibliothek zur Simulation von Prosumern - ProHMo

Am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (EWK) wurde für Analysen von Gebäudeenergiesystemen die kommerzielle Bibliothek „Green City“ in SimulationX verwendet. Diese enthält diverse generische Modelle von Wärmeerzeugern sowie detaillierte Modelle für Wärmespeicher und den Wärmeverbrauch von Gebäuden. Dadurch ist Green City sehr gut geeignet für generelle Analysen von Gebäude- und Quartierenergiesysteme.

Die Modelle von Green City simulieren das Wärmesystem anhand der Volumenströme und Temperaturen und vernachlässigen den Druck, wodurch die Modelle einfacher und die Simulationszeit kürzer wird. Diese Vereinfachung setzt voraus, dass die Flussrichtung des Wassers bekannt ist und dass die Pumpen jederzeit die gewünschte Durchflussmenge liefern können. Diese Annahmen sind bei passend ausgelegten Heizungsanlagen erfüllt.

Da kommerzielle Wärmeerzeuger stark von den spezifischen internen Regelstrategien abhängen, eignen sich generischen Modelle nicht zur Erstellung eines digitalen Zwillings des CoSES Labors. Daher wurde aufbauend auf der Green City Bibliothek die „ProHMo“ Bibliothek erstellt [29], deren Struktur in Abbildung 24 abgebildet ist.

Die Wärmeerzeugermodelle basieren auf Look-up-Tabellen, die Daten über das dynamische Verhalten und die Effizienz liefern und aus Messungen im CoSES-Labor stammen (siehe Abschnitt „Labor und Experimente“). Alle Wärmeerzeugermodelle verwenden Objekte der Modelica Standard Library und können direkt in andere auf Modelica basierende Simulationsprogramme importiert werden.

CoSES ProHMo based on Green City	Generators - look-up table-based models - based on measurements from CoSES
	Thermal Energy Storage (TES) - one-dimensional, layered TES model featuring constant layer widths - adapted from GreenCity
	Consumption - building model derivative of GreenCity - Domestic Hot Water (DHW) consumption based on DHWcalc [30]
	Environment - weather and electricity prices of Munich ¹ - adaptable environmental files catering to diverse regions

¹ Weather data courtesy of the Meteorological Institute Munich
 (<https://www.en.meteo.physik.uni-muenchen.de>)

Abbildung 24: Struktur der ProHMo Simulationsbibliothek [29]

Das vorhandene Speichermodell von Green City wurde mit Messdaten des CoSES-Labors kalibriert und verfügt über zusätzliche Ein- und Auslassöffnungen. Um verschiedene Gebäudekonfigurationen abbilden zu können, sind verschiedenen Wärmeverteilungssysteme implementiert und erlauben eine variable Konfiguration von Wärmespeicher, -erzeugern, -verbrauch und der bidirektionalen Wärmeübergabestation.

Der Wärmeverbrauch der Gebäude setzt sich aus Heizungsenergie und Warmwasserverbrauch zusammen. Die Green City-Bibliothek bietet bereits ein detailliertes Modell des Heizungsverbrauchs, welches leicht angepasst wurde, um die gewünschten Eigenschaften des Heizsystems (Rücklauftemperatur, spezifische Belegungsprofile, Temperaturabsenkungen, ...) besser abzubilden. Für den Warmwasserverbrauch wurde ein Modell erstellt, welches Verbrauchsprofile (z.B. erstellt durch DHWcalc) enthält und überprüft, ob die Wassertemperatur ausreicht.

Entsprechend der Konfiguration des CoSES Labors wurden die einzelnen Module zu Gebäudemodelle kombiniert. Abbildung 25 zeigt den Aufbau des Simulationsmodells des Gebäudes SF 2 aus dem CoSES-Labor. Über die Eingangssignale kann der Nutzer Sollwerte für die verschiedenen Elemente vorgeben oder die regelbasierte Steuerung aktivieren. Das Wärmeverteilungssystem verbindet die Brennwerttherme, die Wärmeübergabestation und den Wärmeverbraucher. Um einen effizienten Betrieb der Wärmepumpe sicherzustellen ist diese direkt mit dem Wärmespeicher verbunden – dies war ein Ergebnis des Untersuchungen zur Prosumer-Konfiguration aus den Abschnitten Untersuchung von Prosumer-Konfigurationen für optimale Netzeinspeisung“ und „Prosumerkonfiguration“. 3-Wegeventile verbinden die Wärmepumpe mit dem oberen, bzw. unteren Abschnitt, um die Schichtung im Speicher für einen effizienten Betrieb der Wärmepumpe zu nutzen.

In den im Projekt erstellten Simulationsmodellen kann über Eingänge die Standardregelung aktiviert oder deaktiviert werden oder die Modulationsvorgaben der verschiedenen Erzeuger von einem EMS vorgegeben werden. Die regelbasierte Steuerung kann dabei als Notfallregelung fungieren, um fehlerhafte oder ausbleibende Vorgaben des EMS zu kompensieren. Dadurch wird verhindert, dass der Nutzerkomfort eingeschränkt wird.

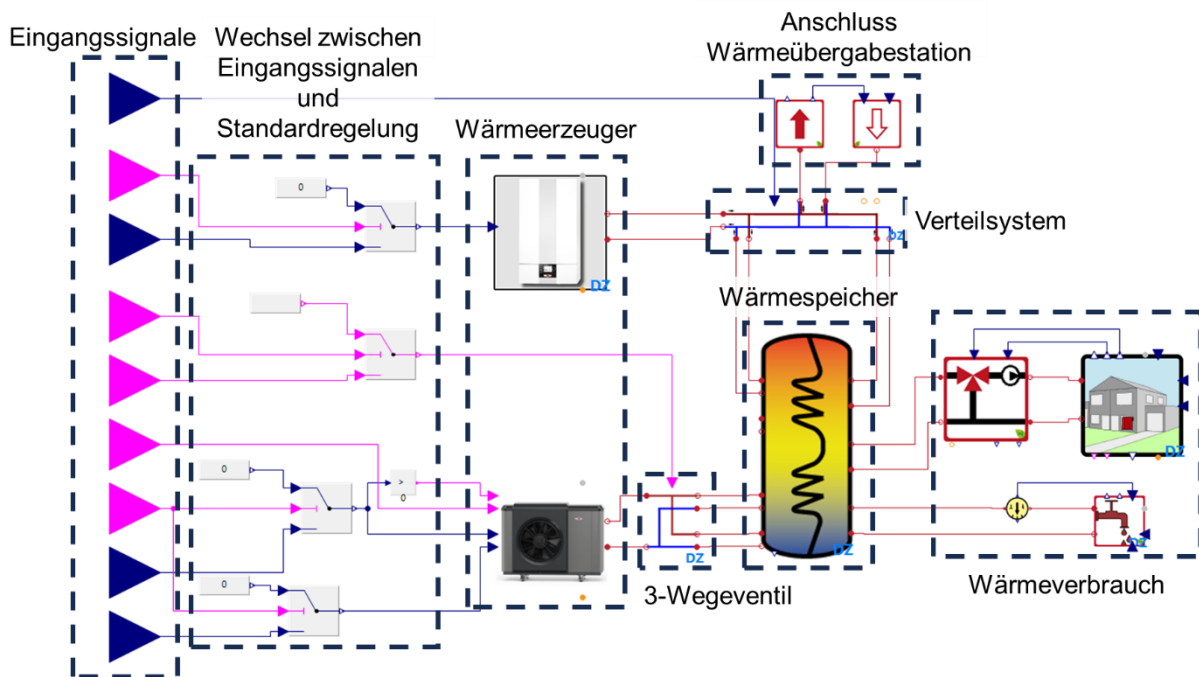


Abbildung 25: Beispielhafter Aufbau des Simulationsmodells eines Gebäudes in der ProHMo Bibliothek in SimulationX

2.3.4 Benchmarking Framework für verschiedene EMS-Ansätze

Basierend auf der ProHMo-Bibliothek wurde ein Benchmarking Framework entwickelt für verschiedene Gebäude-Energiemanagementsysteme (EMS). Um EMS-Ansätze zu vergleichen, wurden die Gebäudemodelle aus ProHMo als FMUs exportiert und veröffentlicht² [30]. FMUs erlauben eine software- und lizenzunabhängige Nutzung der Simulationsmodelle, was ideal für das Benchmarken verschiedener EMS-Ansätze ist. Neben den Modellen wurde zwei Programmvorlagen veröffentlicht, welche die Verwendung des Benchmark Modells in Python und in einer Trainingsumgebung-Umgebung für Gebäude-EMS auf Reinforcement-Learning-Basis aufzeigt und so deren Nutzung vereinfacht.

Die Benchmark-Simulation erfolgt wie in Abbildung 26 dargestellt. Zu Beginn kann der Nutzer die Parameter definieren, welche beim Öffnen der FMU geladen werden. Mit Hilfe des initialen Zustands (Speichertemperatur, ...) und der Wetter- und Verbrauchsvorhersagen bestimmt anschließend das EMS die Sollwerte für das Energiesystem, welche im nächsten Simulationsschritt umgesetzt werden. Im Rolling-Horizon-Verfahren bestimmt das EMS mit Hilfe der neuen Zustände jeweils die nächsten Sollwerte, bis das Ende der Simulation erreicht ist. Abschließend werden verschiedene KPIs bestimmt, unter anderem die Gesamtkosten und der gesamte Energieverbrauch. Eine nähere Beschreibung hierzu findet sich in der Veröffentlichung „A benchmarking framework for energy management systems with commercial hardware models“ [31].

² https://gitlab.lrz.de/energy-management-technologies-public/coses_prohmo

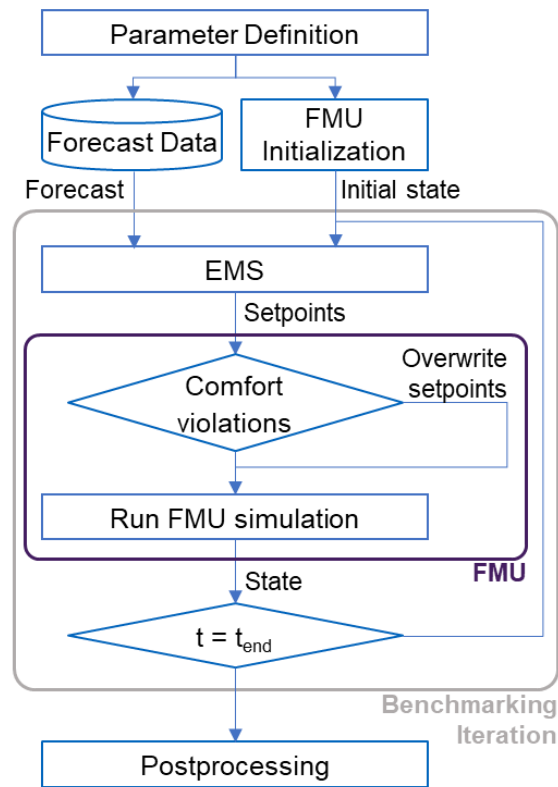


Abbildung 26: Benchmarking von EMS [31]

Für den Vergleich verschiedener EMS-Ansätze wurde das Simulationsmodell von Gebäude „SF 2“ aus dem CoSES-Labor gewählt, welches in Abbildung 27 abgebildet ist. Die Wärmepumpe kann den oberen oder unteren Bereich des Wärmespeichers aufheizen. Die Wärmepumpe erhitzt das Wasser mit einer konstanten Temperaturdifferenz von ca. 5 K zwischen Vor- und Rücklauf. Dadurch weist der Wärmespeicher in den beiden Bereichen während des Aufheizens nur einen geringen Temperaturunterschied auf, mit einer scharfen Trennschicht zwischen beiden Bereichen. Dies kann gezielt genutzt werden, um den oberen Bereich auf die für Warmwasser notwendige Temperatur aufzuheizen, während im unteren Bereich eine geringere Temperatur ausreicht.

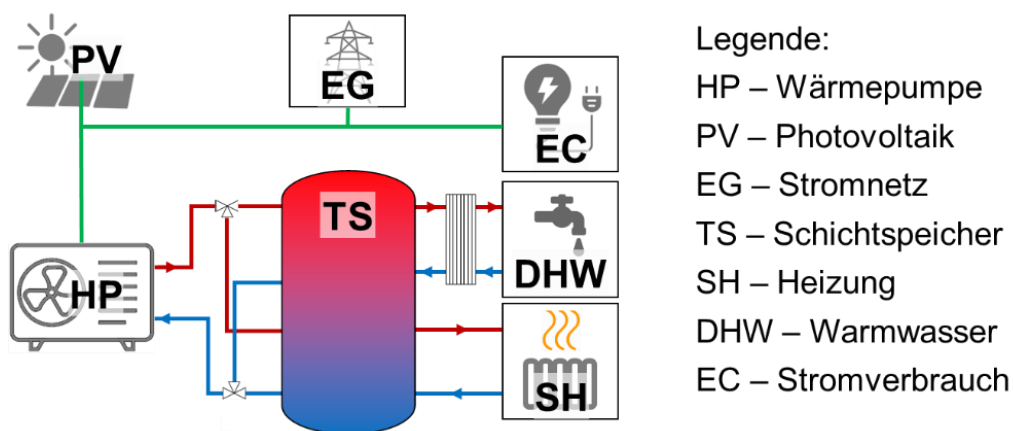


Abbildung 27: Schematische Darstellung von SF 2

Die regelbasierte Steuerung dient als Benchmark für die entwickelten dezentralen EMS. Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit externen Kollegen wurde die Simulationsbibliothek CoSES ProHMo in der Entwicklung eines Energiemanagementsystems verwendet. Das Energiemanagementsystem basiert im Gegensatz zu dem im Abschnitt „Gebäudeenergiemanagementsysteme“ aufgeführten Ansatz auf Deep Reinforcement Learning. CoSES ProHMo wurde dabei zum Trainieren und Validieren des Energiemanagementsystems verwendet.

ProHMo diente über das Benchmarking-Framework hinaus als Simulationsmodell für die PHIL-Emulatoren des CoSES Labors im Projekt.

2.3.5 Kombination von Prosumer- und Netzsimulationen

Um Prosumernetze inkl. Primär- und Sekundärseite vollständig abbilden zu können, wurde im Projekt das Konzept der beiden entwickelten Modelica Bibliotheken „ProHMo“ und „ProsNet“ kombiniert. Die beiden Bibliotheken wurden in unterschiedlichen Softwareumgebungen entwickelt (SimulationX und Dymola). Eine Portierung von ProHMo zu Dymola ist nicht ohne Weiteres möglich, da ProHMo auf die proprietäre GreenCity Bibliothek angewiesen ist. Die Verbindung der Bibliotheken über FMUs wäre prinzipiell möglich und wurde untersucht, allerdings sind die Modelle dann lediglich als BlackBoxen zu verwenden. Daher wurde entschieden die Konzepte der ProsNet Bibliothek in SimulationX neu zu implementieren und eine Verbindung zwischen den Konzepten der Bibliotheken herzustellen. Näheres hierzu ist in der Veröffentlichung „5th Generation District Heating and Cooling Modelica Models for Prosumer Interaction Analysis“ [9] beschrieben.

Die Verbindung der ProHMo Gebäudesimulationen mit einer detaillierten Netzsimulation benötigt ein hydraulisches Interface, wie in Abbildung 28 dargestellt. Dieses Interface ist notwendig, da im Gebäude Druckeinflüsse nicht modelliert werden, diese aber auf Netzseite nicht vernachlässigbar sind.

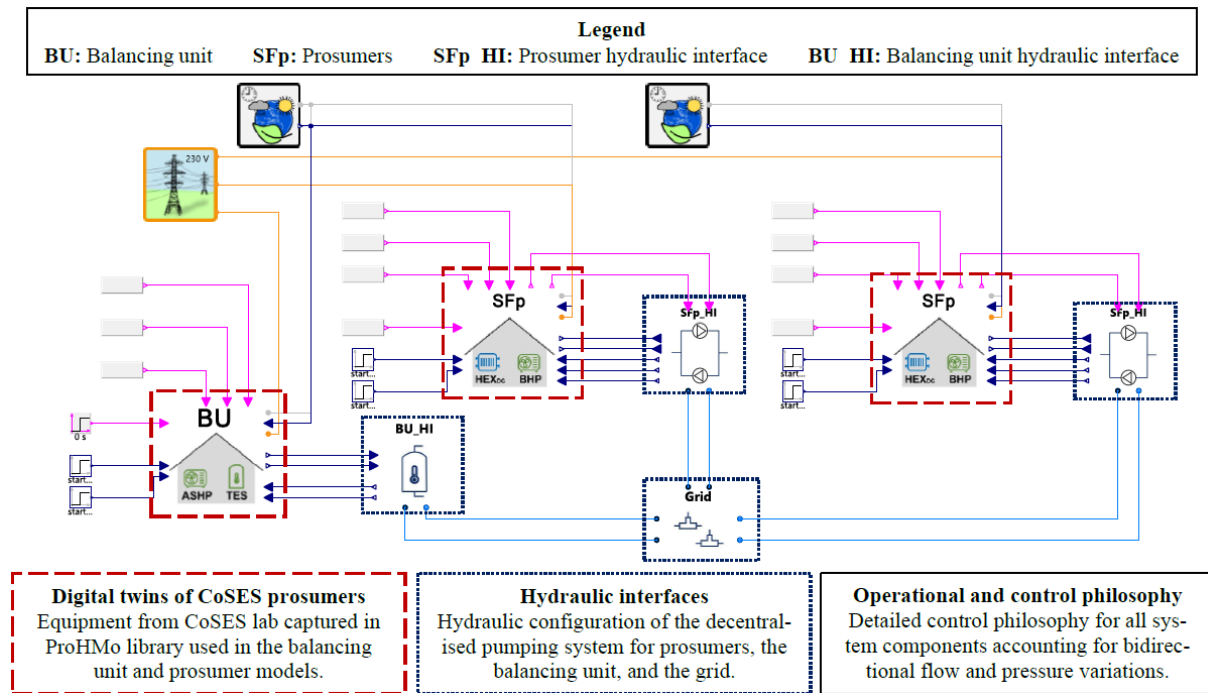


Abbildung 28: Verbindung der ProHMo Gebäudemodelle mit einer detaillierten Netzsimulation

Die Kopplung kann dabei auf Gebäude- oder Netzseite erfolgen. Bei der Verwendung von Prosnet und 4GDH Netzen ist die Kopplung an die Wärmeübergabestation am sinnvollsten und einfachsten. Dabei werden dem Wärmetauscher der Wärmeübergabestation Volumenstrom und Eingangstemperatur auf Gebäudeseite vorgegeben und die resultierende Ausgangstemperatur berechnet. Bei 5GDHC, wo das Verhalten der Booster Wärmepumpe direkten Einfluss auf das Wärmenetz hat, ist eine Einbindung der ProHMo Gebäudemodelle auf Netzseite erforderlich.

Abbildung 29 zeigt das hydraulische Interface für die Einbindung auf Netzseite. Das Gebäudemodell gibt den Sollvolumenstrom für die Entnahme oder Einspeisung aus dem Netz sowie die Einspeisetemperatur vor. Die Pumpen versuchen den Sollvolumenstrom zu erreichen und der tatsächliche Volumenstrom wird an das Gebäudemodell gesendet. Mit Hilfe einer simulierten thermischen Trägheit wird die tatsächliche Einspeisetemperatur bestimmt.

Hydraulic interface model - Modelica

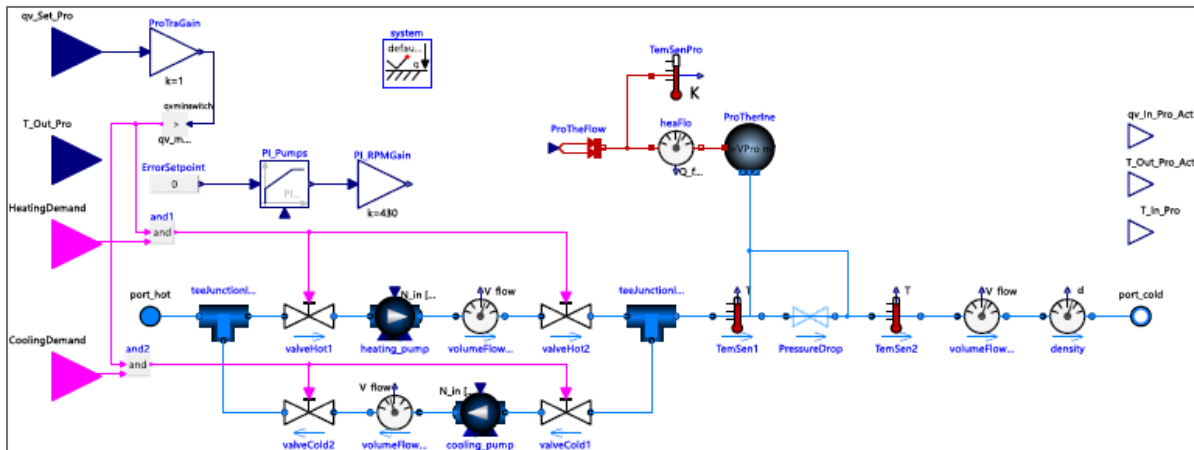


Abbildung 29: Hydraulisches Interface für die Einbindung der Booster Wärmepumpe ins 5GDHC Netz [9]

Mit Hilfe der Simulationsumgebung wurde die in Abschnitt „Regelung von Booster-Wärmepumpen“ dargestellte regelbasierte Steuerung der Booster Wärmepumpe und Ausgleichseinheit entwickelt und feingetuned. Die Simulation diente außerdem dazu, das Experiment zur Validierung der verschiedenen Netzregelkonzepte vorzubereiten.

Um auch den Einfluss der Gebäudehydraulik auf die Thermohydraulik von Prosumernetzen zu untersuchen, gab es zum Ende des Projektes Bemühungen die ProHMo-Bibliothek in Dymola zu portieren und hierbei auch die Gebäudehydraulik mit abzubilden. Hierfür müssen die Verbrauchermodelle und das Wärmespeichermodell der GreenCity Bibliothek ersetzt und nachgebildet werden mit anderen Komponenten. Dies hätte den Vorteil dass so primär- und sekundärseite von Prosumernetzen lizenzfrei (ohne GreenCity) modelliert werden können. Die Erzeugermodelle der ProHMo Bibliothek und deren regelbasierte Steueralgorithmen können übernommen werden. Die verschiedenen prosumerinternen Komponenten müssen in der geeigneten Konfiguration über thermohydraulische Interfaces miteinander verbunden werden, damit auch die gebäudeinterne Hydraulik modelliert wird. Diese Gebäudemodelle können dann für 4GDH-Netze mit den Netzmodellen von ProsNet an der Wärmeübergabestation gekoppelt werden. Leider konnten die Arbeiten hierzu nicht mehr im Rahmen des Projektes beendet werden, werden jedoch im Anschluss an das Projekt weiterverfolgt.

2.3.6 Wärmespeicher-Simulationsmodelle

Speicher sind ein zentrales Element für die intelligente Regelung von Energiesystemen und die Nutzung von Synergien zwischen verschiedenen Anlagen und Sektoren, da sie Energieerzeugung und -verbrauch zeitlich entkoppeln können. Wie in Abschnitt „Gebäudeenergiemanagementsysteme“ beschrieben ist das Wärmespeichermodell ein zentrales Element von Gebäude-EMS. In einfachen EMS wird für Wärmesysteme meist ein gemischtes Speichermodell angenommen, wo der Speicherzustand über den Energiegehalt und Zu- und Abflüsse durch Leistungsflüsse abgebildet werden. Hierbei wird allerdings der Temperaturverlauf innerhalb des Speichers ignoriert, welcher einen wichtigen Einfluss auf das System hat, insbesondere bei stark temperaturabhängigen Erzeugern wie Wärmepumpen.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Projektes ein detailliertes eindimensionales MPC-Wärmespeichermodell entwickelt. Details hierzu finden sich in der Veröffentlichung „Stratified thermal energy storage model with constant layer volume for predictive control“ [32]. Das entwickelte Modell ist ein zeitlich diskretes, geschichtetes Wärmespeichermodell mit konstanter Schichthöhe und variabler Schichttemperatur. Um den Berechnungsaufwand gering zu halten, wurden in der Optimierung quadratische oder einfachere Nebenbedingungen verwendet. Das Modell ist in GitLab veröffentlicht³.

Wie in Abschnitt „Gebäudeenergiemanagementsysteme“ beschrieben, wurde ausgehend vom entwickelten Wärmespeichermodell ein Gebäude-EMS veröffentlicht, welches verschiedene Wärmespeichermodelle enthält und es auch ermöglicht deren Performance vergleichend gegenüberzustellen [23].

- „Power-only“ Speichermodell:
Einfachstes Speichermodell, Wärme wird nur als Leistung, bzw. Energie abgebildet. Dadurch fehlt die Temperaturinformation.
Einsatzzweck: Wärmesystem, wo eine starke Schichtung des Speichers sichergestellt ist, und einem Wärmeerzeuger mit konstanter Vorlauftemperatur. Dadurch ist sichergestellt, dass vorhandene Wärmeleistung immer genutzt werden kann.
- Zonen Speichermodell:
In diesem linearen Speichermodell werden Zonen unterschiedlicher Temperatur definiert. Dabei wird jede Zone als gemischtes Speichermodell betrachtet, wobei kein Austausch zwischen den Zonen erfolgt. Für jede Zone kann ein spezifischer Wirkungsgrad und eine spezifische Entnahmeart (z.B. Warmwasser oder Fußbodenheizung) definiert werden.
Einsatzzweck: Wärmespeicher mit Zonen, welche sich nur wenig beeinflussen und einem Wärmeerzeuger, welcher geringe Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf hat, wodurch die Zonen nur eine geringe Temperaturdifferenz aufweisen.
- 1D Speichermodell mit konstanter Schichthöhe:
Aufgrund des guten Kompromisses zwischen Rechendauer und Genauigkeit ist dies die gängigste Art, Wärmespeicher zu modellieren. Das Wärmespeichermodell besteht dabei aus einer vom Nutzer spezifizierbarer Anzahl an Schichten konstanter Höhe und variabler Temperatur. Die Temperatur der Schichten ändert sich durch konvektiven Wärmeaustausch über Anschlüsse und zwischen den Schichten, konduktiven Wärmeaustausch, Wärmeverlusten und Durchmischung.
Die Schichttemperatur wird im vorliegenden Modell als quadratische Funktion der Temperatur und des Volumenstroms abgebildet. Die Verwendung von quadratischen oder einfacheren Nebenbedingungen stellt dabei einen guten Kompromiss aus Rechendauer und Modellgenauigkeit dar.
Einsatzzweck: Abbildung von unterschiedlichen Temperaturverläufen im Wärmespeicher und stark temperaturabhängigen Prozessen.
- 1D Speichermodell mit konstanter Schichttemperatur:
In diesem Ansatz wird die Temperaturverteilung im Speicher durch Schichten mit konstanter Temperatur und variabler Höhe beschrieben. Durch die Diskretisierung der Temperatur erhält man ein lineares Modell. Allerdings werden Integer Variablen

³ <https://gitlab.lrz.de/energy-management-technologies-public/strats-e>

benötigt, um die Schicht zu bestimmen, aus welcher Wärme entnommen werden kann. Dadurch steigt die Rechendauer mit steigender Anzahl an Schichten oder Rechenschritten stark.

Einsatzzweck: Abbildung von unterschiedlichen Temperaturverläufen im Wärmespeicher und Prozessen, deren effizient nichtlinear von der Temperatur abhängt.

2.3.7 Auslegung von Komponenten für Prosumer-Wärmenetze

Für den effizienten und robusten Betrieb von Wärmenetzen als Versorgungsinfrastruktur, müssen die einzelnen Komponenten geeignet ausgelegt werden. In konventionellen thermischen Netzen geschieht dies für gewöhnlich anhand des Netzschlechtpunktes, welcher zumeist beim am weitesten entfernten Verbraucher liegt. Die Infrastruktur wird so dimensioniert, dass der Netzschlechtpunkt auch im Worst-Case noch ausreichend versorgt werden kann (Druck, Temperatur, Volumenstrom). Im Gegensatz zu konventionellen thermischen Netzen sind prosumerbasierte Netze durch wechselnde hydraulische Kreise gekennzeichnet. Daher ist bei diesen Netzen die Identifizierung des maßgeblichen Betriebszustands für die Dimensionierung der Netzinfrastruktur nicht trivial. Es wurde daher eine regelbasierte Methode entwickelt zur Bestimmung der relevanten Auslegungsbedingungen für radiale Prosumernetze. Die Methode und ein zugehöriges Excel-Tool⁴ hierzu wurden im Rahmen einer Masterarbeit [33] erarbeitet und im Paper „Dimensioning radial prosumer-based thermal networks“ [34] publiziert.

Durch den Vergleich der Leistungsflüsse für verschiedene Betriebszustände werden die maximalen Leistungsflüsse durch jeden Leitungsabschnitt des Netzes bestimmt. Mit zusätzlichen Annahmen zu Netztemperaturen ergeben sich somit die maximalen Volumenströme durch jeden Netzabschnitt, welche mit Druckverlusten gekoppelt sind. Auf der Grundlage der Ergebnisse können Netzleitungen, Regelventile und Umwälzpumpen iterativ dimensioniert werden. Die entwickelte Methode ist für die statische Dimensionierung ausgelegt und erfordert Benutzereingaben zu den sekundärseitigen Prosumer-Eigenschaften. Um den Auslegungsprozess zu automatisieren, wurde die Methode in ein Excel-Tool integriert.

2.3.8 Simulative Untersuchungen

Basierend auf den im letzten Abschnitt vorgestellten Modellen und Simulationsbibliotheken wurden im Projekt verschiedene simulative Untersuchungen durchgeführt, welche in diesem Abschnitt erläutert werden.

Charakteristika und Herausforderungen thermischer Prosumernetze

Mit den entwickelten thermohydraulischen Modellen für Prosumerwärmenetze, sowie der entsprechenden Software-Artefakte stehen umfassende Werkzeuge zur Verfügung, um das Zusammenspiel zwischen Aktuatorsteuerung und Netzstatus in intelligenten thermischen Netzen zu untersuchen. Dies erleichtert die Entwicklung und Erprobung spezieller Regelstrategien, die die Besonderheiten des Netzverhaltens und die damit verbundenen Herausforderungen berücksichtigen. Durch thermohydraulische Simulationen mit der ProsNet

⁴ https://github.com/FabianSpeer/PBN_Dimensioning_Tool

Bibliothek und dem Tool „ProHeatNet_Sim“⁵ wurden Charakteristiken und Herausforderungen von thermischen Netzen mit Prosumern untersucht. Der Fokus lag dabei auf dem thermohydraulischen Verhalten und dessen Implikationen für den Betrieb, die technische Regelung und mögliche Marktansätze. Die Ergebnisse wurden aufbereitet und veröffentlicht im Paper „Characteristics and Challenges in Prosumer-Dominated Thermal Networks“ [35].

Vereinfachend wurde ein radiales Netz mit 3 gleichartigen Prosumern betrachtet. Es wurden vier Szenarien simuliert. Die Szenarien I & II sind stationäre Szenarien, die mit dem Tool ProHeatNet Sim simuliert wurden. Die Szenarien III & IV untersuchen das dynamische Verhalten mithilfe des Modelica-basierten Simulationswerkzeugs Dymola in Kombination mit der ProsNet-Bibliothek.

- Szenario I: Prosumer 1 konsumiert, während die Prosumer 2 und 3 produzieren. Die Pumpen von Prosumer 1 und 2 laufen beide mit 80 % Geschwindigkeit.
- Szenario II: Dieses Szenario entspricht Szenario I, jedoch wird die Pumpengeschwindigkeit von Prosumer 2 auf 60 % reduziert.
- Szenario III: Das thermische Netz startet kalt (30°C), wobei Prosumer 1 und 2 Energie austauschen. Prosumer 2 agiert als Konsument.
- Szenario IV: Es startet aus dem stationären Zustand von Szenario I. Prosumer 2 wechselt vom Produktions- in den Konsummodus und nach einiger Zeit wieder zurück in den Produktionsmodus.

In den untersuchten Prosumer-Wärmenetzen wird die Netzfunktionalität durch das Zusammenspiel der verschiedenen Prosumer mit ihren Wärmeübergabestationen bestimmt. Es zeigte sich, dass diese sich durch die thermohydraulische Kopplung im Netz stark gegenseitig und damit auch die Netzfunktion als Ganzes beeinflussen. Dabei können systemische Phänomene auftreten, wie das Blockieren eines Teilnehmers durch die Einspeisung eines anderen über hydraulische Effekte. Des Weiteren reagiert der thermohydraulische Netzzustand sehr sensibel gegenüber kleinen Veränderungen in den Aktuator-Inputs. Für die Konzeptentwicklung kann hieraus gefolgert werden, dass eine unabhängige Regelung der Anlagen voneinander eine große Herausforderung ist und eine gewisse Art der Koordination vonnöten ist. Außerdem sind Effekte wie das gegenseitige Blockieren durch entsprechende Regelungsalgorithmen zu antizipieren durch Design-Entscheidungen für das Netz bzw. Energiemanagement oder den Markt zu unterbinden.

Untersuchung von Prosumer-Konfigurationen für optimale Netzeinspeisung

Im Projekt wurden verschiedene Konfigurationen von Prosumer-Heizsystemen analysiert, um deren Eignung für die Integration in prosumerbasierte Wärmenetze zu bewerten. Die Ergebnisse sind veröffentlicht in der Publikation „A comparison of prosumer system configurations in district heating networks“ [35].

Der Fokus der Untersuchungen lag auf der Verbindung und Anordnung von Wärmeerzeugern (HG), Wärmeverbrauchern (HC), Wärmespeichern (TS) und der bidirektionalen Wärmeübergabestation, die sowohl als Quelle als auch Senke fungiert. Ziel war es, Konfigurationen zu identifizieren, die eine optimale Netzeinspeisung ermöglichen, niedrige Rücklauf-temperaturen erzeugen und eine hohe Effizienz gewährleisten.

⁵ https://github.com/thomaslicklederer/ProHeatNet_Sim

Die betrachteten Konfigurationen unterscheiden sich hinsichtlich der Anordnung der Komponenten, insbesondere der Einbindung des Wärmespeichers in paralleler oder serieller Konfiguration. Die Simulationen der verschiedenen Konfigurationen wurden mit der Software SimulationX und der Green City Toolbox durchgeführt. Die Analyse umfasste Szenarien mit verschiedenen Wärmeerzeugern (Wärmepumpe, Solarthermie, verbrennungsbasierte Systeme) sowie unterschiedlichen Netz- und Verbrauchstemperaturen.

Die meisten modernen Heizsysteme mit einem oder mehreren Wärmeerzeugern nutzen einen Wärmespeicher, welcher unterschiedliche Aufgaben erfüllt: Er minimiert die Start-Stopp-Zyklen des Wärmeerzeugers, deckt kurzfristige Spitzenlasten ab und sorgt für hydraulische Entkopplung. Zudem kann er zusammen mit einer Wärmepumpe als Speichereinheit für das Stromsystem dienen, indem er beispielsweise bei Stromüberschuss geladen wird.

Die Anordnung des Wärmespeichers in klassischen Parallelsystemen gliedert sich in 2-Rohr- und 4-Rohr-Systeme (siehe Abbildung 30). Der Unterschied beider Systeme ist, dass beim 4-Rohr-System Wärmeerzeuger und -verbraucher getrennte Anschlüsse an den Wärmespeicher haben und somit hydraulisch komplett entkoppelt sind. Allerdings treten dadurch innerhalb des Wärmespeichers höhere Volumenströme auf, welche häufig entgegengesetzt gerichtet sind. Dies kann zu Vermischung innerhalb des Speichers führen, welche allerdings durch den Einsatz von Prallblechen verringert werden kann.

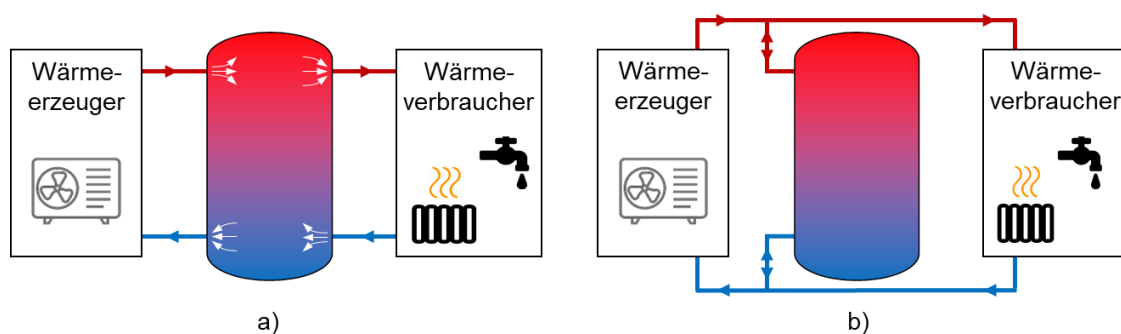


Abbildung 30: 4-Rohr (a) vs. 2-Rohr (b) Wärmespeichereinbindung [17]

Beide Systeme haben verschiedene Vor- und Nachteile, wodurch die Auswahl von den spezifischen Anforderungen des Heizsystems abhängen. Neben der parallelen Anordnung der Komponenten kann der Wärmespeicher auch seriell integriert werden, was weitere Kombinationsmöglichkeiten eröffnet.

Bei Prosumern kommt eine zusätzliche Komponente hinzu, die bidirektionale Wärmeübertragungsstation. Diese Komponente verbindet das Gebäude mit dem Wärmenetz und dient sowohl als Wärmesenke als auch als Wärmequelle. Da es keine Untersuchungen zur optimalen Konfiguration der Komponenten gab, wurden geeignete Konfigurationen analysiert und simulativ verglichen. Abbildung 31 zeigt die betrachteten Konfigurationen. Für diese wurden verschiedene Szenarien untersucht, mit unterschiedlichen Wärmeerzeugertypen (Wärmepumpe, verbrennungsbasierte Wärmeerzeuger und Solarthermie), unterschiedlichen Wärmenetzttemperaturen und der primäre Einsatz (Wärmeeinspeisung oder -bezug).

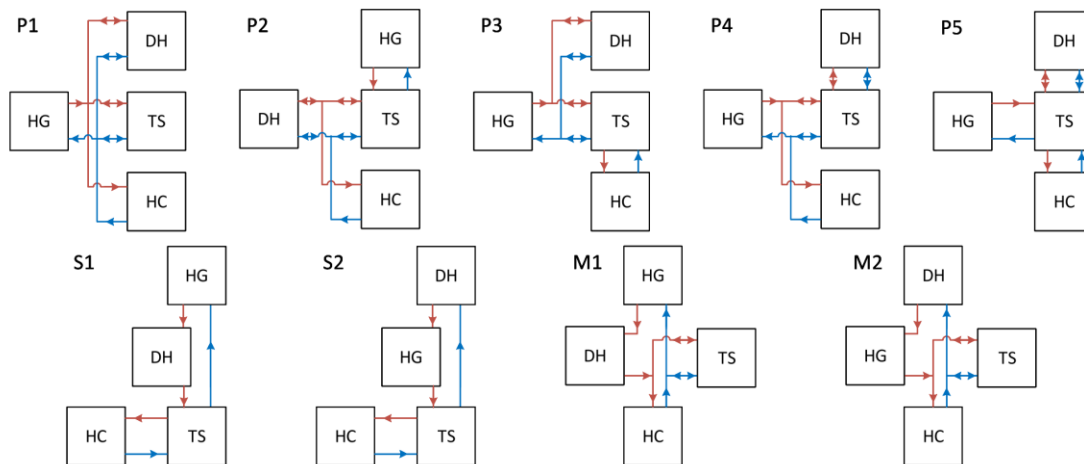


Abbildung 31: Untersuchte hydraulische Konfigurationen von Wärmeerzeugern (HG), Wärmeverbrauchern (HC), Wärmespeichern (TS) und Wärmenetzanbindung (DH) in Prosumern [19].

Die Simulation identifizierte optimale Konfigurationen für die verschiedenen Generatortypen. Zwei wesentliche Konfigurationen wurden als vielversprechend identifiziert:

1. Direkte Verbindung aller Komponenten: Diese Konfiguration zeigte die besten Ergebnisse für verbrennungsbasierte Wärmeerzeuger, da sie die niedrigsten Rücklauftemperaturen und minimale Speicherverluste aufwies. Durch die gemeinsame Anbindung aller Komponenten kann der Brennwertnutzen des Verbrennungssystems maximiert werden, was zu einer erhöhten Effizienz führt. Diese Anordnung spiegelt die Praxisempfehlungen wider, die auch bei der Planung des CoSES-Labors der TU München berücksichtigt wurden. Allerdings existieren derzeit keine Standardrichtlinien, wie Wärmespeicher in dieser Konfiguration integriert werden sollten.
2. Verbindung über den Wärmespeicher: In Szenarien mit hohen Netztemperaturen und alternativen Wärmeerzeugern, wie Wärmepumpen oder Solarthermie, zeigte sich, dass eine serielle Anordnung mit dem Wärmespeicher, idealerweise mit unterschiedlichen Anschlusshöhen, die Effizienz maximiert. Diese Anordnung ermöglicht eine gezielte Anpassung der Vorlauftemperaturen und minimiert Rücklauftemperaturen. Die Effizienzsteigerung wurde zusätzlich durch den Einsatz eines Dreiwegeventils zwischen dem Rücklauf des Wärmenetzes und dem Wärmespeicher-Einlass unterstützt.

Dabei wurden die folgenden Aspekte evaluiert:

- Rücklauftemperaturen: Niedrige Rücklauftemperaturen auf Netzseite wurden insbesondere in der Konfiguration mit direkter Verbindung aller Komponenten erreicht, was die Netzbetriebseffizienz verbessert.
- Speicherverluste: Eine serielle Einbindung des Wärmespeichers minimierte die thermischen Verluste, vor allem bei Solarthermie- und Wärmepumpensystemen.
- Netzeffizienz: In Konfigurationen mit einer Wärmepumpe oder Solarthermie wurde eine erhöhte Effizienz durch die gezielte Nutzung des Wärmespeichers erreicht. Dies ermöglichte auch eine flexible Reaktion auf Netzanforderungen und Schwankungen der Wärmeerzeugung.

Die Studien ergaben, dass die Konfiguration der Prosumer-Komponenten einen wesentlichen Einfluss auf die Effizienz und die Rücklauftemperaturen hat. Für verbrennungsbasierte Systeme wird eine direkte Verbindung aller Komponenten empfohlen, während Wärmepumpen und Solarthermieanlagen von einer seriellen Anbindung mit Wärmespeicher profitieren. Die Ergebnisse bieten wertvolle Entscheidungshilfen für die optimale Gestaltung prosumerbasierter Wärmenetze und deren Komponenten, um eine effiziente Netzeinspeisung zu gewährleisten.

PID-Regler und Regelziel-Aktuator-Zuordnung für die Wärmeübergabestationsregelung

Im Rahmen der Design-Phase des Regelungsansatzes mit gewichteten PID-Reglern (siehe Abschnitt "PID-Regler mit gewichteter Fehlerfunktion") wurde die Zuordnung von Temperaturregelzielen zu den Aktuatoren (Pumpen und Ventilen) in bidirektionalen Wärmeübergabestationen untersucht. Ziel war es, eine optimale Regelziel-Aktuator-Zuordnung zu finden, da es bisher keine strukturierten Untersuchungen zu diesem Thema gab. Die Ergebnisse wurden veröffentlicht in der Publikation "Control of bidirectional prosumer substations in smart thermal grids: A weighted proportional-integral control approach" [18].

Die zentrale Fragestellung lautete: Welche Zuordnung von Temperaturregelzielen zu den Aktuatoren führt zu einer verbesserten Regelungsperformance, insbesondere unter Verwendung eines gewichteten PID-Regler-Ansatzes? Dabei sollten Varianten der Regelung für die Zuordnung von Aktuatoren auf der primären und sekundären Seite der Wärmeübergabestation analysiert werden.

Zur Beantwortung der Fragestellung wurden vier Reglervarianten entwickelt und simulativ getestet. Dabei wurde zwischen zwei Steuerungsansätzen unterschieden:

- Same-side Control: Die Aktuatoren regeln die Temperatur auf der gleichen Seite der Wärmeübergabestation, auf der sie sich befinden.
- Cross-over Control: Die Aktuatoren regeln die Temperatur auf der gegenüberliegenden Seite der Station.

Diese beiden Paradigmen wurden sowohl für den Produktions- als auch für den Bezugsmodus der Prosumer untersucht, was zu vier unterschiedlichen Reglervarianten führte (siehe Abbildung 32).

mode	actuator side	A (cross-over cross-over)		B (same-side same-side)		C (cross-over same-side)		D (same-side cross-over)	
con	prim	$T_{2,s}$	\dot{Q}	\dot{Q}	ΔT_1	$T_{2,s}$	\dot{Q}	\dot{Q}	ΔT_1
	sec	\dot{Q}	ΔT_1	$T_{2,s}$	\dot{Q}	\dot{Q}	ΔT_1	$T_{2,s}$	\dot{Q}
pro	prim	\dot{Q}	ΔT_2	$T_{1,s}$	\dot{Q}	$T_{1,s}$	\dot{Q}	\dot{Q}	ΔT_2
	sec	$T_{1,s}$	\dot{Q}	\dot{Q}	ΔT_2	\dot{Q}	ΔT_2	$T_{1,s}$	\dot{Q}
weight		<i>hi</i>	<i>lo</i>	<i>hi</i>	<i>lo</i>	<i>hi</i>	<i>lo</i>	<i>hi</i>	<i>lo</i>

Abbildung 32: Untersuchte Reglervarianten mit unterschiedlichen Zuordnungen der Temperaturregelziele zu den verschiedenen Aktuatoren und damit Seiten der Wärmeübergabestation.

Die Simulationen für ein Radialnetz mit 3 Prosumern wurden mit der Software Dymola und der ProsNet-Bibliothek durchgeführt. Insgesamt wurden 36 Szenarien simuliert, die unterschiedliche Netzbedingungen, Pumpdimensionierungen und Gewichtungsfaktoren der Regelziele umfassten. Die Simulationszeit betrug jeweils vier Stunden, und die Leistungssollwerte wurden in Form von Zeitreihen vorgegeben.

Die Studie zeigte, dass die beste Performance mit dem Regler D erzielt wurde, der eine Kombination aus den positiven Eigenschaften der anderen Reglervarianten darstellt. Regler D konnte in beiden Modi (Produktion und Bezug) die gewünschten Regelziele erreichen. Die wichtigsten Erkenntnisse waren:

- Regler A zeigte schwache Ergebnisse, insbesondere im Bezugsmodus, da die Cross-over-Regelung die Leistungssollwerte nicht erreichen konnte.
- Regler B führte zu Blockaden bei den Pumpen, da die Regelung auf der gleichen Seite im Produktionsmodus nicht geeignet war.
- Regler C kombinierte die Nachteile von Regler A und B und erzielte somit die schlechtesten Ergebnisse.
- Regler D zeigte die beste Performance, insbesondere in Szenarien mit gewichtenden Fehlerfunktionen, die eine flexible Anpassung der Regelziele ermöglichten.

Die Ergebnisse zeigten auch, dass die Einführung der gewichtenden Fehlerfunktionen entscheidend für die Optimierung des Systems war. Ohne Gewichtung konnten bestimmte Regelziele, wie die Leistungsregelung, nicht ausreichend erfüllt werden, was zu hohen Fehlerwerten führte. Mit der Gewichtung wurde das steife Regelungsproblem entspannt, sodass die Regelung flexibel auf unterschiedliche Netz- und Verbrauchsbedingungen reagieren konnte.

Mit der gefundenen optimalen Regelziel-Aktuator-Zuordnung war das Reglerdesign erfolgreich abgeschlossen. In einem nächsten Schritt wurde der gefundene Regelungsansatz im CoSES-Labor experimentell untersucht, siehe hierzu Abschnitt "Weighted PID Experimente".

Validierung der Auslegungsmethode für Komponenten in Prosumer-Wärmenetzen

Im Abschnitt „Auslegung von Komponenten für Prosumer-Wärmenetze“ wurde eine Auslegungsmethode entwickelt, die auf die besonderen Anforderungen von Prosumer-basierten Wärmenetzen abzielt, insbesondere in radialen Netzstrukturen. Zur Validierung der entwickelten Methode wurde eine Fallstudie mit einem radialen Netz mit fünf Prosumern durchgeführt. Die genaue Beschreibung der entwickelten Auslegungsmethode und ihrer Validierung ist veröffentlicht in der Publikation "Dimensioning radial prosumer-based thermal networks" [34].

Das in der Fallstudie betrachtete Netz wurde mit dem entwickelten Tool dimensioniert und anschließend in einer detaillierten thermohydraulischen Simulation mit Dymola und der ProsNet-Bibliothek überprüft. Die Validierung erfolgte unter verschiedenen Energieaustauschszenarien, wobei insbesondere die Genauigkeit der berechneten maximalen Leistungsflüsse sowie die Betriebszustände der dimensionierten Komponenten untersucht wurden. Die Simulationen umfassten 36 verschiedene Szenarien, in denen sowohl die Leistungsflüsse als auch die Betriebsparameter der Komponenten (z. B. Pumpendrehzahl, Ventilstellung) analysiert wurden. Dabei wurden die folgenden Kriterien bewertet:

- Genauigkeit der maximalen Leistungsflüsse in den Netzleitungen: Die Simulationsergebnisse zeigten eine maximale Abweichung von nur 0,7 % für die berechneten Leistungsflüsse, was die hohe Genauigkeit der Auslegungsmethode bestätigt.
- Versorgung der Prosumer: Die Bedarfe der Prosumer konnten in allen Szenarien erfüllt werden, wobei die maximalen Abweichungen bei der gelieferten Leistung 3,3 % und bei der sekundären Vorlauftemperatur 0,58 K betragen.
- Betriebszustände der Aktuatoren: Während geringfügige Fehler in der Temperaturspreizung auf der Primärseite zu Abweichungen in den Betriebszuständen der Pumpen und Ventile führten, blieben diese Abweichungen im operablen Bereich und beeinträchtigten die Funktionalität des Netzes nicht.

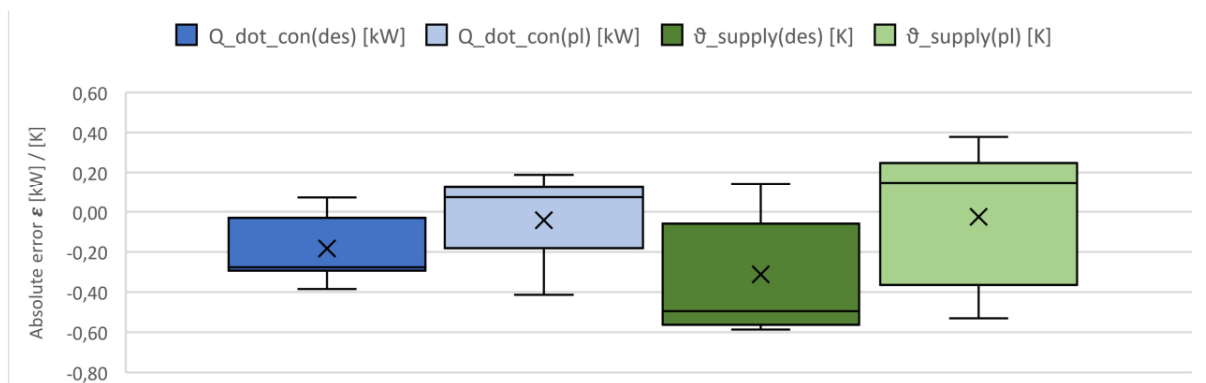


Abbildung 33: Absoluter Fehler der Verbrauchsleistung und der Vorlauftemperatur während des simulierten Design- und des Teillastscenarios [34].

Die Validierung zeigte, dass die entwickelte Auslegungsmethode in der Lage ist, die relevanten Betriebszustände der Komponenten unter verschiedenen Lastbedingungen korrekt vorherzusagen und die Komponenten entsprechend passend zu dimensionieren. Die geringen Abweichungen, die in der Simulation auftraten, hatten keine negativen Auswirkungen auf die Netzfunktionalität. Dies zeigt, dass die Methode zur Dimensionierung flexibler, radialer

Prosumer-basierter Netze geeignet ist, selbst bei begrenzten Informationen in frühen Planungsstadien.

Die vorgestellte Methode ermöglicht es somit Planern, Komponenten eines Prosumer-Wärmenetzes realistisch zu dimensionieren und gleichzeitig verschiedene wirtschaftliche Szenarien und Variantenvergleiche frühzeitig in die Planung einzubeziehen.

Performance-Vergleich verschiedener EMS mit dem ProHMo Benchmarking Framework

Die in Abschnitt „Bibliothek zur Simulation von Prosumern - ProHMo“ vorgestellten Modelle und das „Benchmarking Framework für verschiedene EMS-Ansätze“ wurden genutzt, um einen Performance-Vergleich verschiedener Gebäudeenergiemanagementsysteme anhand einer Simulationsstudie durchzuführen. Ziel der Studie war es, die Leistung und Effizienz von unterschiedlichen EMS-Ansätzen zu vergleichen und deren Eignung für verschiedene Anwendungsfälle zu evaluieren. Details hierzu sind veröffentlicht in der Publikation „A benchmarking framework for energy management systems with commercial hardware models“ [31].

In der Literatur werden zahlreiche EMS-Ansätze diskutiert, darunter regelbasierte (RB), modellprädiktive (MPC) und verstärkungslernende (RL) Systeme. Diese unterschiedlichen Ansätze weisen in Simulationen jedoch oft unterschiedliche Bewertungsgrundlagen auf, was Vergleiche erschwert. Das ProHMo Benchmarking Framework bietet die Möglichkeit, diese EMS auf einer gemeinsamen Grundlage zu testen und zu bewerten, indem realistische Gebäudemodelle und kommerzielle Hardwarekomponenten verwendet werden.

Die Simulationsstudie verglich vier EMS-Ansätze:

- Ein regelbasiertes EMS (RB),
- Ein modellprädiktives EMS (MPC),
- Ein RL-basiertes EMS,
- Ein hybrides RB+RL EMS, bei dem das regelbasierte System die Komfortanforderungen sicherstellt, während der RL-Agent die Betriebskosten minimiert.

Die Simulationen wurden unter Nutzung von Gebäudemodellen durchgeführt, die kommerzielle Komponenten, wie Wärmepumpen (HP) und thermische Energiespeicher (TES), realitätsgetreu abbilden. Ein wichtiger Aspekt war die Verwendung variabler Stromtarife basierend auf dem deutschen Day-Ahead-Markt. Die Steuerungssignale der EMS-Algorithmen wurden über das ProHMo Framework mit den simulierten Gebäudemodellen gekoppelt.

In der Simulationsstudie wurden die folgenden Leistungskennzahlen (KPIs) betrachtet:

- Energieverbrauch (Total Energy Consumption),
- Betriebskosten (Total Costs),
- Betriebsstunden der Wärmepumpe,
- Startvorgänge der Wärmepumpe,
- SOC (State of Charge) des Energiespeichersystems.

Diese Kennzahlen erlaubten einen detaillierten Vergleich der Effizienz und Betriebssicherheit der verschiedenen EMS-Ansätze. Die Ergebnisse der Simulationen wurden in Diagrammen dargestellt und mit den festgelegten Benchmark-KPIs verglichen. Abbildung 34 zeigt die KPIs der verschiedenen untersuchten EMS im Vergleich.

Algorithm	$C_{op,tot}$	E_{tot}	t_{op}^{ASHP}	n_{starts}^{ASHP}
RB EMS	100%	100%	449.7 h	419
MPC based EMS	93.4%	95.8%	567.0 h	381
RL based EMS	96.4%	98.6%	573.8 h	993
RB+RL based EMS	97.3%	98.1%	492.4 h	460

Abbildung 34: KPIs der verschiedenen untersuchten EMS

Die Ergebnisse der Simulationsstudie zeigten, dass das modellprädiktive EMS (MPC) die besten Ergebnisse hinsichtlich der Betriebskosten und des Energieverbrauchs erzielte. Es konnte durch die präzise Steuerung der Wärmepumpe und die Berücksichtigung von Last-, Wetter- und Preisprognosen die Effizienz maximieren. Die Anzahl der Startvorgänge der Wärmepumpe war bei diesem Ansatz am niedrigsten, was zu einer längeren Lebensdauer der Komponenten führt.

Das RL-basierte EMS zeigte eine etwas schwächere Performance im Vergleich zum MPC-Ansatz, erwies sich jedoch als robuster, da es unabhängig von Prognosen operieren kann. Dies macht es für praktische Anwendungen interessant, bei denen Vorhersagedaten nicht immer zuverlässig sind.

Der hybride RB+RL Ansatz bot eine ausgewogene Leistung, indem er Komfortanforderungen sicherstellte und gleichzeitig die Betriebskosten minimierte. Der regelbasierte EMS (RB) zeigte die schwächste Performance, insbesondere bei der Vermeidung von Spitzenlasten und der optimalen Nutzung von kostengünstiger Energie.

Die Simulationsstudie verdeutlichte, dass das ProHMo Benchmarking Framework eine leistungsstarke Plattform bietet, um unterschiedliche EMS-Ansätze unter realistischen Bedingungen zu testen und zu vergleichen. Besonders der modellprädiktive Ansatz konnte durch seine effiziente Nutzung von Prognosedaten überzeugen. Der RL-Ansatz zeigte hingegen seine Stärke in Szenarien, in denen keine präzisen Vorhersagen verfügbar sind. Die Ergebnisse legen nahe, dass hybride Ansätze, die sowohl die Flexibilität von RL-Systemen als auch die Präzision von MPC nutzen, ein vielversprechender Weg für die Zukunft sind.

2.4 E4 Praktische Umsetzung

Praktische Untersuchungen wurden im Rahmen des Projektes an zwei Standorten durchgeführt: im CoSES Labor der TU München und im Feld vor Ort auf dem Gelände des Industriepartners im Projekt.

2.4.1 Labor und Experimente

Das Labor für Combined Smart Energy Systems (CoSES) der Technischen Universität München (TUM) bietet eine vielseitige und modulare Testumgebung für sektorgekoppelte Energiesysteme. Zielsetzung des Labors ist es den intelligenten Betrieb aktiver Strom-Verteilnetze sowie der vierten und fünften Generation von Fernwärme- und Kühlnetzen mit Hilfe von moderner Informations- und Kommunikationstechnologie zu untersuchen. Hierfür umfasst die einzigartige Testumgebung die folgende Ebenen und Komponenten:

Elektrische Ebene: Ein rekonfigurierbares Niederspannungsnetz mit einer Länge von 1,5 km, das Batteriespeicher, Photovoltaikanlagen, Ladestationen für Elektrofahrzeuge und emulierte dezentrale Erzeuger verbindet. Diese Infrastruktur wird detailliert in Mohapatra et al. [36] beschrieben und bildet die Basis für die Untersuchung der elektrischen Kopplung und Integration in Prosumer-Wärmenetze.

Thermische Ebene: Ein flexibles Wärme- und Kältenetz verbindet fünf thermische Prosumer, die bidirektionalen Energieaustausch zwischen den Einheiten und dem Netz ermöglichen. Diese Ebene wird umfassend von Zinsmeister et al. [37] beschrieben.

Durch die variabel konfigurierbaren Netzlängen können unterschiedliche Szenarien simuliert werden, z.B. Wärmeverluste und Zeitverzögerungen bei Temperaturänderungen, die für Prosumer-Wärmenetze von entscheidender Bedeutung sind. Um realitätsnahe Bedingungen zu schaffen, setzt das CoSES-Labor auf kommerzielle Hardware. Dazu gehören Blockheizkraftwerke (BHKW) mit Leistungen von 2 kW_{el} bis 20 kW_{el}, Gasbrennwertkessel mit bis zu 50 kW_{th}, sowie verschiedene Wärmepumpen (Luft- und Erdwärmepumpen). Solarthermie-Emulatoren, die über steuerbare elektrische Heizungen nachgebildet werden, ermöglichen zudem eine flexible und wetterunabhängige Durchführung der Experimente. Alle Wärmeerzeuger sind über ein Energiemanagementsystem steuerbar, um das dynamische Verhalten von Prosumern im Netz präzise zu untersuchen. Die thermischen Speicher im Labor, mit Kapazitäten von 500 bis 2000 Litern, sind in unterschiedlichen Konfigurationen installiert (z.B. Schichtspeicher, Kombispeicher), um die Energiespeicherung und -nutzung in Prosumer-Wärmenetzen realistisch darzustellen. Diese umfangreiche Ausstattung ermöglicht es, die komplexen Interaktionen und Optimierungspotenziale in intelligenten thermischen Netzwerken praxisnah zu testen und zu validieren.

Kommunikations- und Steuerungsebene: Ein Echtzeit-Steuerungssystem überwacht und regelt die Versuche, wobei dezentrale Steuerungen und API-Schnittstellen die Integration externer Energiemanagementsysteme (EMS) unterstützen. Dies ist entscheidend, um die dynamischen Interaktionen innerhalb von Prosumer-Netzwerken zu erforschen.

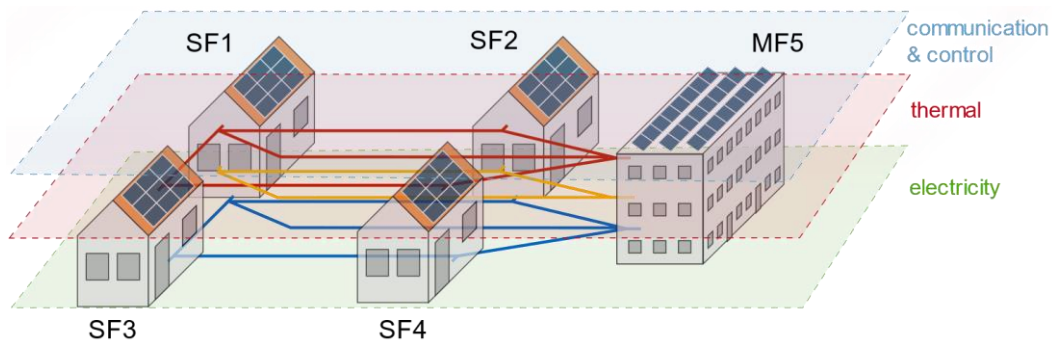


Abbildung 35: Ebenen des CoSES Labors mit 5 Prosumern [37]

Anpassungen der Laborinfrastruktur

Zu Beginn des OSkit-Projekts war die CoSES-Laborumgebung nur teilweise betriebsbereit, und spezifische Anpassungen sowie Erweiterungen der Infrastruktur waren erforderlich, um die geplanten Experimente durchzuführen.

Es wurde ein Wärmenetzemulator entwickelt und in Betrieb genommen, welcher die Verhaltensweisen eines realen Wärmenetzes unterschiedlicher Leitungslängen nachstellen soll. Dabei müssen durch Kombination mit einer Co-Simulation insbesondere zwei Phänomene abgebildet werden: Wärmeverluste der Leitungen an die Umgebung und die Verzögerung der Wärmeübertragung bei unterschiedlichen Leitungslängen. Hierfür wurde zunächst MIMO-Regelstrategien für den Wärmenetzemulator getestet, welche keine ausreichende Performance zeigten. Daher wurde der Aufbau des Emulators modifiziert, um insbesondere schnelle Temperaturwechsel bei Modi-Umschaltungen besser darzustellen. Es wurde ein zusätzlicher Bypass integriert, um die thermischen Massen zu entkoppeln und die Reaktionszeit des Systems zu verbessern. Die Regelung des Emulators wurde angepasst und validiert, um sicherzustellen, dass das Temperaturprofil eines realen Netzes präzise nachgefahren werden kann. Insgesamt wurden neun Wärmenetzemulatoren installiert, wodurch die Gebäudesimulatoren flexibel in einem Ringnetz verbunden werden können. Diese Anpassung ermöglicht die realitätsnahe Nachstellung komplexer Netzstrukturen

Prototypische bidirektionale Wärmeübergabestationen wurden gemäß der Konzepte aus dem Abschnitt 2.1.2 "Bidirektionale Prosumer-Wärmeübergabestation" in Betrieb genommen und charakterisiert. Während der Inbetriebnahme wurden verschiedene Betriebsmodi getestet, und es konnten wichtige Erkenntnisse über das thermische und hydraulische Verhalten der Stationen gewonnen werden. Eine zentrale Erkenntnis war der hohe hydraulische Widerstand in Prosumernetzen, weshalb stärkere Pumpen für die Wärmeübergabestationen benötigt wurden, welche nachgerüstet wurden im Rahmen des Projektes. Die Steuerung der Wärmeübergabestation wurde in die Laborumgebung integriert und validiert.

Als weitere wichtige Komponente ist die Luftwärmepumpe, die als moderner Wärme- und Kälteerzeuger dient. Ein Umgebungsluftemulator wurde entwickelt und in Betrieb genommen, um realistische Klimabedingungen ohne Klimakammer zu simulieren. Die Regelung dieser Wärmepumpe wurde mittels LabVIEW implementiert und mit PID-Reglern so abgestimmt, dass eine präzise Steuerung unter verschiedenen Umgebungsbedingungen möglich ist.

Für Experimente zu 5. Generation von Wärme- und Kältenetzen war die Inbetriebnahme einer Booster-Wärmepumpe zwischen Netzseite und Prosumerseite notwendig. Die Wärmepumpe "WP Max-Grid HiQ F14" wurde in das Labor integriert und umfassend charakterisiert. Dabei

wurden hydraulische Anpassungen an den Anschlüssen vorgenommen und die elektronische Steuerung optimiert. Die Pumpe kann damit sowohl im Heiz- als auch Kühlmodi betrieben werden.

Mit diesen Anpassungen und Erweiterungen wurde die Laborinfrastruktur des CoSES-Labors für die Experimente im Rahmen des OSkit-Projekts vorbereitet.

Charakterisierung von Komponenten

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene kommerzielle Komponenten des CoSES-Labors detailliert charakterisiert, um ihre Leistungsfähigkeit und Effizienz unter verschiedenen Betriebsbedingungen zu ermitteln. Dies sorgt für einen Mehrwert, da die Angaben der Hersteller, z.B. in technischen Datenblättern lediglich einige wenige Betriebspunkte umfassen, welche im realen Betrieb teilweise nur selten angefahren werden. Das Verhalten in allen anderen Betriebspunkten ist weitgehend unbekannt. Daher können die gewonnenen Kennfelder aus den Charakterisierungen genutzt werden, um das Verhalten der Komponente im Feld abzuschätzen und dieses in Simulationsmodelle zu integrieren. Dies wurde beispielsweise umgesetzt, wie in Abschnitt „Bibliothek zur Simulation von Prosumern - ProHMo“ beschrieben.

Brennwerttherme: Die Charakterisierung der Brennwerttherme Wolf CGB-2-20 umfasste die Bestimmung des Wirkungsgrades bei unterschiedlichen Modulationen und Rücklauf-temperaturen. Die Ergebnisse zeigten, dass die gemessenen Wirkungsgrade etwas unter den Herstellerangaben lagen, was auf die Betriebsbedingungen und die internen Verluste durch Regelkomponenten zurückzuführen ist. Das Aufheiz- und Abkühlverhalten der Therme wurde ebenfalls untersucht und dokumentiert, um die Dynamik in verschiedenen Lastfällen abzubilden.

Blockheizkraftwerk (BHKW): Für das Blockheizkraftwerk (BHKW) „neoTower 2.0“ wurden sowohl der elektrische als auch der thermische Wirkungsgrad über verschiedene Lastbereiche und Rücklauf-temperaturen ermittelt. Die gemessenen Wirkungsgrade zeigten teils deutliche Abweichungen zu den Herstellerangaben, da bei den Herstellerdaten interne Verbraucher, wie Pumpen und Steuerungen, nicht berücksichtigt wurden. Das Betriebsverhalten des BHKWs, inklusive Start- und Abkühlphasen, wurde detailliert analysiert, um Rückschlüsse auf die Effizienz und Stabilität des Systems zu ziehen. Die Ergebnisse und Daten der Charakterisierung sind in folgender Publikation öffentlich zugänglich: „Characterization of a Combined Heat and Power Unit at the CoSES laboratory“ [38]

Thermische Speicher: Die thermischen Speicher wurden unter verschiedenen Beladungs- und Entladungsszenarien charakterisiert, um ihre Fähigkeit zur Temperaturschichtung und die Speicherverluste zu bewerten. Messungen zeigten, dass bei kontrollierten Lade- und Entladevorgängen eine stabile und effiziente Schichtung erreicht werden kann. Dies ist entscheidend für die Integration in ein intelligentes Wärmenetz, um Energieverluste zu minimieren und die thermische Effizienz zu optimieren. Die Ergebnisse und Daten der Charakterisierung sind in folgender Publikation öffentlich zugänglich: „Characterization of a Thermal Storage at the CoSES laboratory“ [39]

Luftwärmepumpe: Die Luftwärmepumpe im CoSES-Labor wurde als moderner Wärme- und Kälteerzeuger charakterisiert. Experimente zur Bestimmung der Leistungskennlinien und des Regelverhaltens zeigten, dass das System flexibel auf verschiedene Betriebsbedingungen reagiert und sich gut zur Simulation und Validierung komplexer Wärmenetze eignet. Der

speziell entwickelte Luftemulator ermöglicht es, die Umgebungskonditionen präzise nachzubilden, um die Wärmepumpe unabhängig von äußeren Wetterbedingungen zu testen.

Booster-Wärmepumpe: Die Booster-Wärmepumpe „WP Max-Grid HiQ F14“ wurde zur Emulation von bidirektionalen Wärmeübergabestationen eingesetzt. Die Charakterisierung umfasste die Untersuchung des Betriebsverhaltens sowohl im Heiz- als auch im Kühlmodus. Anpassungen an der hydraulischen Integration und die Optimierung der Steuerung ermöglichten eine flexible Nutzung innerhalb des DHC-Systems. Diese Charakterisierung ist besonders relevant für die Integration in intelligente Netzstrategien, die den bidirektionalen Energietransfer bei niedrigen Netztemperaturen unterstützen.

Validierungsexperimente der Wärmespeichermodelle

Die in Abschnitt „Wärmespeicher-Simulationsmodelle“ vorgestellten Modelle wurden experimentell validiert. Als Benchmark wurde das Verhalten eines Wärmespeichers aus dem CoSES-Labor verwendet, welcher zuvor charakterisiert worden war (siehe letzter Abschnitt). Die Validierung erfolgte in Zusammenarbeit mit Forschern aus Cardiff und ist publiziert in zwei Veröffentlichungen:

- “Experimental validation of a hybrid 1-D multi-node model of a hot water thermal energy storage tank” [11]
- “Stratified thermal energy storage model with constant layer volume for predictive control — Formulation, comparison, and empirical validation” [32]

Die Wärmespeichermodelle wurden mit dem Ziel entwickelt, eine präzise Vorhersage der Temperaturverläufe und des Ladezustands (State-of-Charge, SoC) in thermisch geschichteten Speichern zu ermöglichen. Dabei sollte ein Gleichgewicht zwischen Modellgenauigkeit und rechnerischer Effizienz erreicht werden, um die Modelle in Echtzeitregelungen und Vorhersagen einzusetzen. Die Validierung zielte darauf ab, die Leistung der Modelle im Vergleich zu realen Messdaten zu prüfen, insbesondere im Hinblick auf die Darstellung von thermischer Schichtung und Temperaturübergängen während Lade- und Entladeprozessen.

Dabei wurde die Anzahl der Schichten und die Größe der Zeitschrittweite variiert. Die Validierung ergab, dass das Modell eine bessere Genauigkeit aufweist als einfache MPC-Speichermodelle und der Rechenaufwand im Vergleich zu anderen Modellierungsansätzen gering ist. Abbildung 36 zeigt beispielhaft die Speicherauslasstemperatur der verschiedenen Modelle. Dabei kann man sehen, dass das einfache gemischte Speichermodell die Temperatur in allen Zeitschritten überschätzt. Das von uns vorgeschlagene Speichermodell (CLV) und ein weiteres eindimensionales Speichermodell (CLT) folgen dagegen dem Temperaturverlauf vergleichsweise gut.

In einer Case-Study wurde das Speichermodell in ein optimierungsbasiertes EMS eingebunden und die Veränderung der Kosten und der verbrauchten Energie bewertet. Hierbei zeigte sich eine starke Reduzierung der Kosten und des Energieverbrauchs im Vergleich zu einfachen Speichermodellen, was den Nutzen des Modells unterstreicht.

Bisherige Simulationsmodelle haben das Problem, dass der Temperaturübergang bei einer sehr scharfen Trennung von warmem und kaltem Wasser im thermischen Speicher schlecht abgebildet wird. Das Problem wird in dem Ansatz von De la Cruz-Loredo et al. dadurch gelöst, dass eine Barriere innerhalb der Schichten angenommen wird, welche sich entsprechend der Be- und Entladung verschiebt. Dadurch kann ein starker Temperaturwechsel innerhalb einer

Schicht abgebildet werden. Das Simulationsmodell wurde mit Messungen des CoSES Labors validiert.

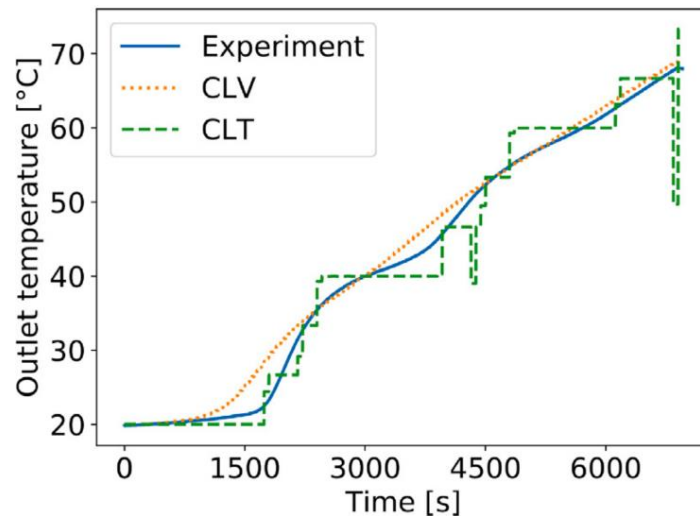


Abbildung 36: Beispielhafter Temperaturverlauf des Speicherauslasses [17].

Experimentelle Untersuchungen zum Pump Blocking

Es wurden experimentellen Untersuchungen zum Phänomen des „Pump Blocking“ im CoSES-Labor durchgeführt, um die zuvor simulativ ermittelten Ergebnisse zu validieren. Die Untersuchungen zielten darauf ab, das Verhalten der Pumpen und die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Prosumern in einem bidirektionalen Wärmenetz zu analysieren, insbesondere wenn mehrere Einspeisepumpen gleichzeitig aktiv sind. Nähere Informationen zum Experiment können der Results-Section folgender Publikation entnommen werden: „A prosumer-based sector-coupled district heating and cooling laboratory architecture“ [37].

Wie im Abschnitt „Charakteristika und Herausforderungen thermischer Prosumernetze“ beschrieben, wurde simulativ vorhergesagt, dass mehrere Einspeisepumpen sich gegenseitig hydraulisch blockieren können: eine Pumpe erhöht beim Einspeisen den Differenzdruck zwischen Vor- und Rücklauf netzseitig so sehr, dass seine benachbarte Pumpe aufgrund der niedrigeren Drehzahl oder kleineren Dimensionierung nicht mehr in der Lage ist diesen zu überkommen. Damit wird diese kleinere Pumpe daran gehindert Volumenstrom zu fördern und ins Netz einzuspeisen.

Um die Ergebnisse der Simulationen zu überprüfen, wurde ein 24-stündiges Experiment im CoSES-Labor durchgeführt. In diesem Experiment waren zwei der Häuser Prosumer (SF1 und SF2) und das dritte ein Verbraucher (SF4). Die Steuerung der Energieflüsse erfolgte in 15-Minuten-Schritten mit dem Optimierungstool „urbs⁶“, wobei das Ziel die Minimierung der Heiz- und Stromkosten war. Abbildung 37: Optimierung der Energieerzeugung Abbildung 37 zeigt die optimierten Fahrpläne der drei Gebäude im Experiment.

Die Experimente bestätigten das simulativ vorhergesagte Verhalten: Als SF1 und SF2 gleichzeitig Wärme einspeisten, blockierte die Pumpe von SF1 aufgrund des höheren

⁶ <https://github.com/tum-ens/urbs>

hydraulischen Widerstands nahezu vollständig, während SF2 weiterhin einen stabilen Volumenstrom lieferte. Diese Ergebnisse sind aus den Diagrammen in Abbildung 38 zu lesen und bestätigten die simulativ vorhergesagten Effekte des Pump Blocking.

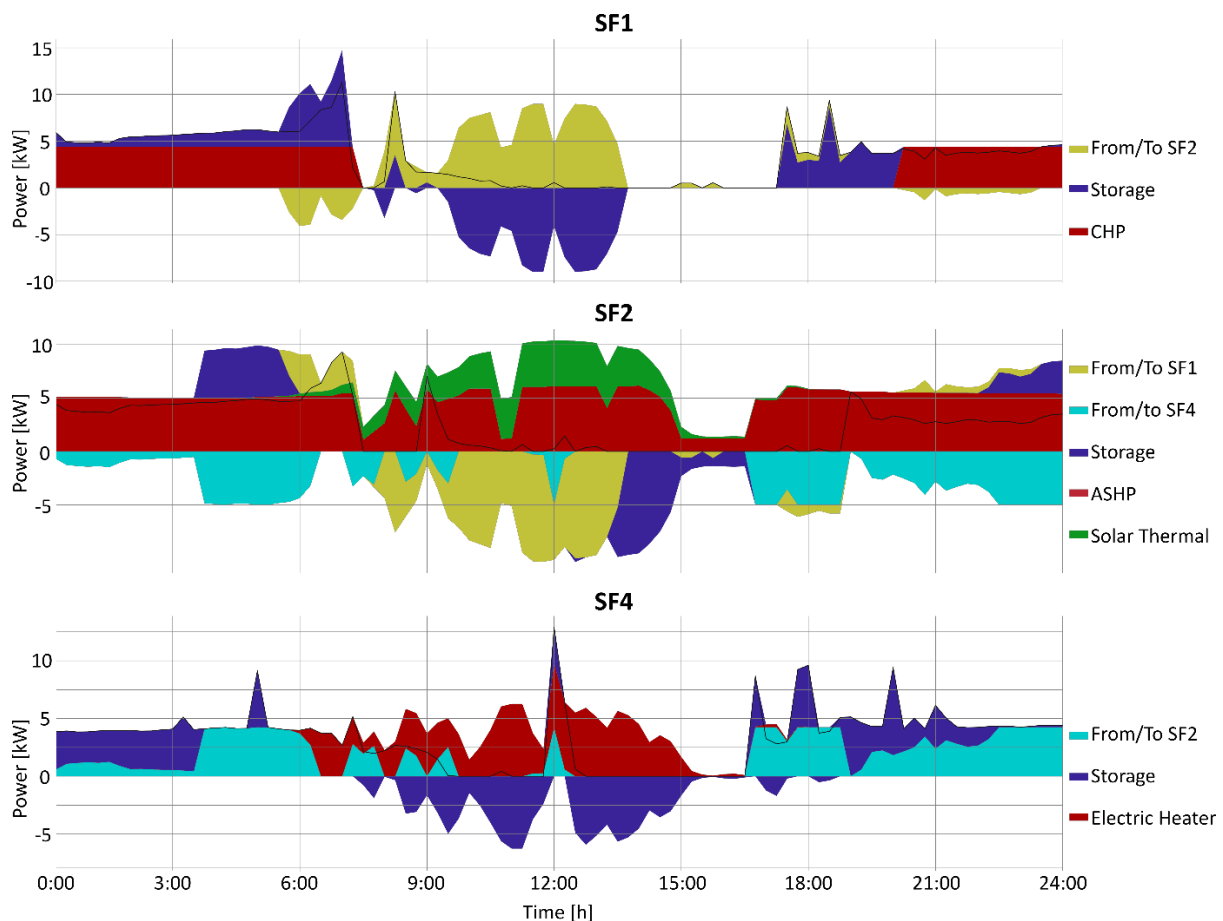


Abbildung 37: Optimierung der Energieerzeugung

Die experimentellen Untersuchungen zeigten, dass das Pump Blocking durch eine optimierte Steuerstrategie vermieden werden kann. Durch die Anpassung der Pumpenleistung und den konnte eine gleichmäßigere Verteilung der Volumenströme erreicht werden. Ein Beispiel aus dem Experiment zeigt, dass das manuelle Reduzieren der Leistung der Pumpe in SF2 nach etwa 2230 Sekunden dazu führte, dass SF1 wieder einen stabilen Volumenstrom liefern konnte. Dies verdeutlicht die Bedeutung intelligenter Steuerstrategien für die Stabilität von bidirektionalen Wärmenetzen.

Neben dem Pump Blocking wurde auch die Bedeutung der Rohrvorwärmung für den dynamischen Betrieb des Wärmenetzes untersucht. Die Experimente zeigten, dass ohne eine sinnvolle Vorwärmung der Rohre zu Beginn der Einspeisung warmes und kaltes Wasser vermischt wird, was dazu führt, dass die Temperaturanforderungen des Verbrauchers nicht erfüllt werden. Diese Erkenntnisse sind entscheidend für die Entwicklung effektiver Steuer- und Regelstrategien im Betrieb von intelligenten Wärmenetzen

Die Ergebnisse der Untersuchungen bestätigen die Notwendigkeit einer sorgfältig abgestimmten Regelung, um das Phänomen des Pump Blocking zu vermeiden und die Effizienz des Gesamtsystems zu maximieren.

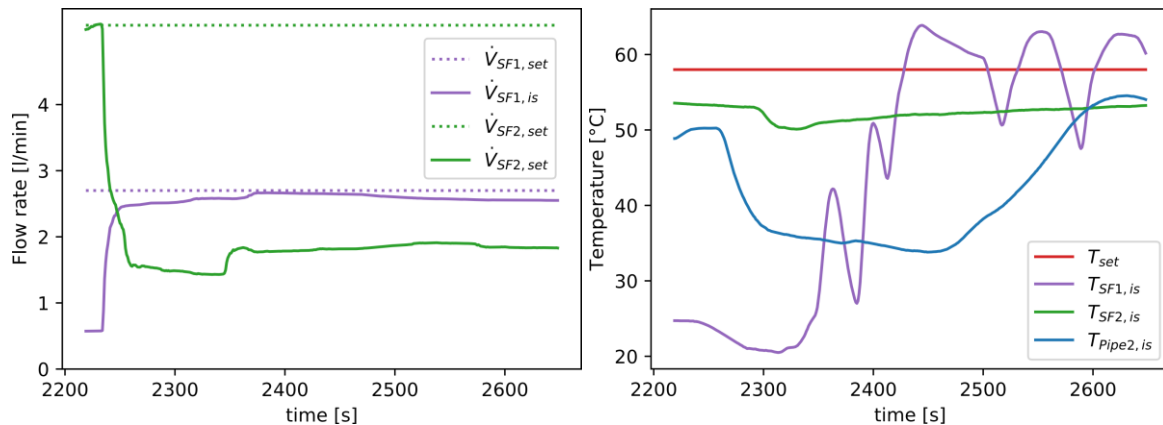


Abbildung 38: Blockieren der Pumpe (links) und Beimischung von kaltem Wasser (rechts)

Validierung und Co-Simulation mit der ProHMo Bibliothek

Wie in Abschnitt "Bibliothek zur Simulation von Prosumern - ProHMo" beschrieben, wurde die ProHMo-Library als digitaler Zwilling des CoSES-Labors entwickelt, um realistische Simulationen und Prüfungen unter Laborbedingungen durchzuführen. Weiterführend wurden Validierungsexperimente für das ProHMo-Framework durchgeführt, sowohl zur Überprüfung der Modelle, als auch zur Nutzung der Bibliothek als Benchmarking-Framework.

Die Validierung der ProHMo-Modelle im CoSES-Labor zielte darauf ab, die Genauigkeit der Modelle für kommerzielle Wärmegeneratoren und thermische Speicher zu überprüfen. Dabei wurden die dynamischen Verhaltensweisen von Wärmepumpen und Speichern analysiert, die zuvor im Labor experimentell charakterisiert wurden. Die Modelle wurden so parametrisiert, dass sie das Verhalten der realen Systeme genau widerspiegeln, indem Lookup-Tabellen genutzt wurden, die auf Messdaten basieren. Dies ermöglichte es, die Effizienz und Reaktion der Modelle unter verschiedenen Betriebsbedingungen präzise abzubilden (Daniel_ProHMo_Paper).

Um die Eignung von ProHMo als Benchmarking-Framework für Energie-Management-Systeme (EMS) zu demonstrieren, wurden spezifische Experimente mit einer Luft-Wärmepumpe (ASHP) durchgeführt. Im Experiment wurde das Verhalten der Wärmepumpe unter unterschiedlichen Umweltbedingungen getestet, einschließlich niedriger und milder Umgebungstemperaturen. Die Wärmepumpe konnte sowohl Heiz- als auch Kühlbetrieb realisieren, wobei die Effizienz in Abhängigkeit von den Modulationsstufen und den Systembedingungen variiert wurde. Die Ergebnisse wurden mit den ProHMo-Modellen verglichen, die diese dynamischen Effekte ebenfalls abbildeten. Dabei zeigte sich, dass ProHMo eine hohe Übereinstimmung mit den experimentellen Messungen erreichte.

Die Experimente zeigten, dass ProHMo in der Lage ist, die dynamischen Eigenschaften und die Effizienz der ASHP präzise abzubilden, insbesondere bei der Simulation von Start-, Abtau- und Teillastverhalten. Die Validierung umfasste den Vergleich von COP-Werten (Coefficient of Performance) sowie Temperaturverläufen im Speicher. Es wurde festgestellt, dass ProHMo im Gegensatz zu anderen Simulationstools wie IDEAS und GreenCity genauer arbeitet, da es spezifische interne Kontrollmechanismen und Lookup-Tabellen für die Komponenten verwendet, die aus den Laborversuchen abgeleitet wurden.

In einer Fallstudie wurde die Luft-Wärmepumpe in ein optimierungsbasiertes EMS integriert, das ebenfalls über ProHMo geprüft wurde. Das Experiment verdeutlichte, dass durch den

Einsatz eines optimierten Steuerungssystems signifikante Verbesserungen in der Energieeffizienz und der Kostensenkung erreicht werden konnten. Die Tests zeigten, dass ProHMo als robustes Benchmarking-Tool fungiert, das verschiedene EMS-Strategien realitätsnah prüfen und optimieren kann.

Die Validierungsexperimente bestätigen, dass ProHMo eine hohe Genauigkeit bei der Simulation von realen Wärmepumpen und thermischen Speichern erreicht und somit als zuverlässige Grundlage für die Entwicklung und Evaluierung neuer Steuerungsstrategien im Bereich von intelligenten Wärmenetzen dient. Die Möglichkeit, ProHMo als Benchmarking-Framework zu nutzen, erweitert das Einsatzspektrum erheblich und ermöglicht die effiziente Entwicklung und das Testen von EMS für komplexe, sektorgekoppelte Energiesysteme.

Experimentelle Untersuchung der Wärmeübergabestationen

Wie im Abschnitt „Bidirektionale Prosumer-Wärmeübergabestation“ eingeführt, bilden die Wärmeübergabestationen ein essenzielles Element in Prosumerwärmenetzen. Daher wurden auch diese im Rahmen des Projektes im Labor aufgebaut charakterisiert und optimiert.

Die Inbetriebnahme umfasste den Aufbau und die initiale Konfiguration zweier prototypischer Wärmeübergabestationen. Zunächst wurden grundlegende Tests durchgeführt, bei denen Wärme zwischen zwei virtuellen Gebäuden im Labor übertragen wurde. Dabei wurden unterschiedliche Betriebsmodi getestet.

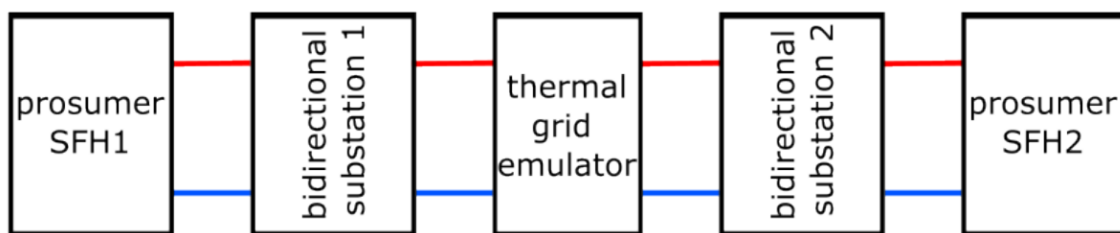


Abbildung 39: Abstrahierter Versuchsaufbau mit zwei Wärmeübergabestationen zum Wärmeaustausch zwischen zwei Gebäuden im Experiment.

Nach der Inbetriebnahme erfolgte eine detaillierte Charakterisierung der Wärmeübergabestationen. Dabei wurden verschiedene Betriebszustände analysiert, um die hydraulischen und thermischen Eigenschaften zu bestimmen. Insbesondere wurden die Volumenströme und Temperaturverläufe bei unterschiedlichen Vor- und Rücklauftemperaturen gemessen. Es zeigte sich, dass die installierten Pumpen in einigen Betriebsmodi zu klein dimensioniert waren, um die notwendigen Volumenströme zu gewährleisten. Basierend auf den Erkenntnissen der Charakterisierung wurden Anpassungen vorgenommen, um die Effizienz der Übergabestationen zu verbessern. Dies umfasste den Einbau leistungsstärkerer Pumpen, um die Volumenströme in allen Betriebsmodi sicherzustellen, sowie die Optimierung der Steuerungssoftware, um eine feinere Regelung der Temperatur- und Druckverhältnisse zu ermöglichen. Diese Modifikationen wurden erfolgreich in einer studentischen Arbeit dokumentiert und implementiert, um die Übergabestationen für zukünftige Experimente zu stabilisieren.

Die Wärmeübergabestationen spielten eine zentrale Rolle in weiteren Laboruntersuchungen, wie beispielsweise den Pump Blocking-Experimenten und der Entwicklung von Regelstrategien mit gewichteten PID-Algorithmen. In diesen Experimenten wurden die überarbeite-

ten Übergabestationen eingesetzt, um den Einfluss verschiedener Steuerstrategien und die Interaktion der Pumpen innerhalb des Netzwerks zu testen.

Zusätzlich wurde im Labor eine Booster-Wärmepumpe als spezielle Wärmeübergabestation für 5. Generation Wärme- und Kältenetze getestet. Die Inbetriebnahme dieser Booster-Wärmepumpe umfasste die Installation und Kalibrierung der Steuerungssysteme, um zwischen Heiz- und Kühlmodi flexibel wechseln zu können. Die experimentelle **Charakterisierung** dieser Anlage zeigte ihre Eignung, um auch bei niedrigen Netztemperaturen effiziente Wärmeübergaben zu realisieren. Die Daten aus diesen Experimenten flossen in die Simulationen mit dem ProHMo-Framework ein und wurden als Grundlage für Open-Access-Veröffentlichungen genutzt.

5GDHC Experiment

Im CoSES-Labor der Technischen Universität München wurden im Rahmen des OSkit-Projekts experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung und Validierung von 5th Generation District Heating and Cooling (5GDHC) Netzwerken durchgeführt. Diese Experimente zielten darauf ab, die hydraulischen und thermischen Herausforderungen solcher Netzwerke zu untersuchen und passende Kontrollstrategien zu entwickeln und zu testen. Das 5GDHC-Netzwerk basiert auf einem bidirektionalen, dezentralen Ansatz, der sowohl Heiz- als auch Kühlanforderungen über ein Niedertemperaturnetz erfüllt. Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden in folgendem Journal-Paper publiziert: "Development and experimental validation of a hydraulic design and control philosophies for 5th Generation District Heating and Cooling Networks" [10].

Für die Experimente wurde im Labor ein Setup aufgebaut, bei dem zwei Prosumer über ein bidirektionales thermisches Netz angeschlossen sind an eine zentrale Ausgleichseinheit (Balancing Unit, BU). Diese BU wurde in das System integriert, um ein thermodynamisches Gleichgewicht aufrechtzuerhalten, indem sie überschüssige Wärme oder Kälte aus dem Netz aufnimmt oder abgibt. Die Konfiguration des Systems ermöglicht eine flexible Verteilung von Wärme und Kälte durch die Prosumer, die sowohl als Wärmequellen als auch als -senken agieren können. Diese dezentrale Architektur wurde entwickelt, um Synergien zwischen Heiz- und Kühlanforderungen zu nutzen und gleichzeitig die Netzstabilität zu gewährleisten. Abbildung 40 abstrahiert den experimentellen Aufbau des 5GDHC-Experiments.

Zwei verschiedene Steuerstrategien wurden getestet in diesem Setup: **TGridFix**, eine Strategie mit fixierten Rücklauftemperaturen im Netz, und **TGridFloat**, die eine frei schwebende Temperaturregelung zulässt. Beide Ansätze beinhalten dezentral gesteuerte Pumpen mit variablen Drehzahlen, um den Druck im Netz zu regulieren und so eine hydraulische Stabilität zu erreichen. Die Experimente zeigten, dass die Strategie TGridFix eine leicht höhere elektrische Leistungsaufnahme für die Booster-Wärmepumpe (BHP) erforderte, da die Temperaturdifferenz zwischen dem Verdampfer und dem Netz nicht optimal war. Im Vergleich dazu zeigte TGridFloat eine höhere Effizienz mit einem Seasonal Coefficient of Performance (SCOP) von 4.16, im Gegensatz zu 3.84 bei TGridFix.

Die Experimente bestätigten, dass das 5GDHC-System in der Lage ist, stabile Betriebszustände für verschiedene Szenarien wie dominante Heiz- oder Kühlanforderungen sowie gemischte Lasten zu realisieren. Die Kombination aus dezentralen Pumpen und einer passiven BU ermöglichte eine effiziente Steuerung und reduzierte die Gefahr von hydraulischen Instabilitäten wie dem „Pump-Hunting“-Phänomen. Insbesondere zeigte die

Verwendung von TGridFix, dass eine konstante Rücklauftemperatur eine verbesserte Vorhersagbarkeit des Systemverhaltens bieten kann, jedoch auf Kosten eines höheren Energieverbrauchs für die Pumpen und einer geringeren Flexibilität. TGridFloat hingegen ermöglichte flexiblere Anpassungen an variierende Prosumer-Anforderungen und zeigte insgesamt einen geringeren elektrischen Verbrauch.

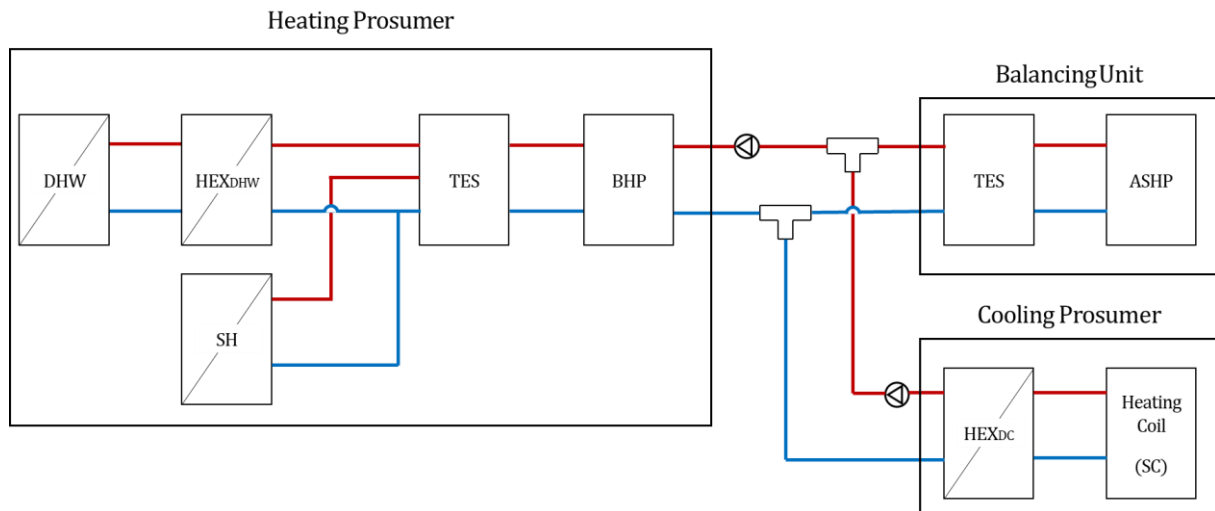


Abbildung 40: Experimenteller Aufbau 5GDHC Experiment

Im Rahmen der Experimente wurden auch bestehende Komponenten im CoSES-Labor wie Booster-Wärmepumpen und Wärmeübergabestationen genutzt, um ihre Effizienz und Integration in 5GDHC-Systeme zu testen. Die Tests umfassten eine Vielzahl von Betriebszuständen, darunter die Nutzung der Booster-Wärmepumpe bei sehr niedrigen Vorlauftemperaturen, um ihre Eignung für die 5GDHC-Konfiguration zu validieren. Die experimentellen Daten fließen in die Optimierung der Steueralgorithmen und die Verbesserung der Netzwerkarchitektur ein, wodurch das Gesamtsystem stabilisiert und seine Effizienz weiter erhöht werden konnte.

Die experimentellen Untersuchungen im CoSES-Labor bestätigten die Machbarkeit und die Vorteile des 5GDHC-Systems. Durch die Kombination von bidirektionalen Flüssen, dezentralen Pumpen und flexiblen Steuerstrategien konnte das System effizient betrieben werden. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Weiterentwicklung und Implementierung von 5GDHC-Netzwerken in städtischen Gebieten, um sowohl Heiz- als auch Kühlanforderungen nachhaltig und effizient zu decken.

Weighted PID Experimente

In vorausgehenden Abschnitten wurde die Konzeptionierung eines „PID-Regler mit gewichtender Fehlerfunktion“ beschrieben und dessen simulative Untersuchung beschrieben in Abschnitt 2.3.8 unter „PID-Regler und Regelziel-Aktuator-Zuordnung für die Wärmeübergabestationsregelung“. Als dritter Schritt erfolgte im Projekt die experimentelle Untersuchung.

Die Variante, welche in den Voruntersuchungen die besten Resultate erzielte, wurde im Rahmen eines experimentellen Versuchs im CoSES-Labor umgesetzt, um die Gültigkeit des

Simulationsmodells zu validieren. Zur Einbindung in die Laborumgebung wurde der Regler in LabView programmiert.

Als erstes Teilerperiment wurde der Regler in einem Minimalaufbau umgesetzt, der aus 2 Prosumern besteht, die mittels Übergabestationen und einem bidirektionalen Wärmenetz miteinander verbunden sind. Das vereinfachte Hydraulikschema ist in Abbildung 2 dargestellt, wobei dort Haus 1 als Producer und Haus 2 als Consumer illustriert sind.

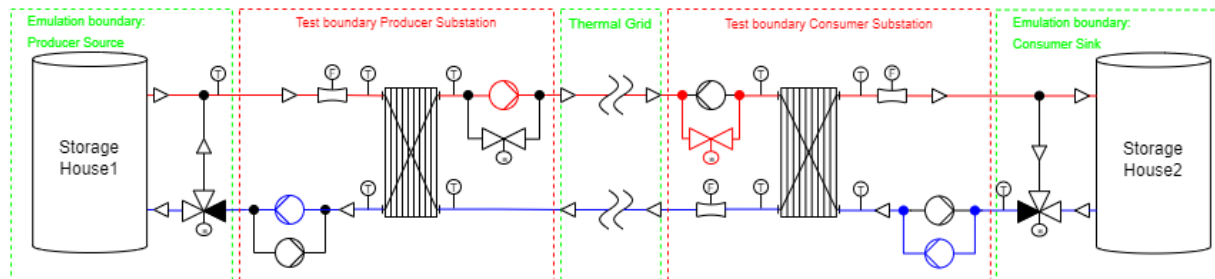


Abbildung 41: Experimenteller Aufbau zur Validierung des Reglers der Übergabestationen

Der Wärmespeicher eines Prosumers, dessen obere Schicht vor Experimentbeginn aufgeheizt wurde, dient im Producer-Fall als Wärmequelle und im Consumer-Fall als Wärmesenke. Zur Vermeidung der Überhitzung oder Auskühlung der Speicher wurde eine simple regelbasierte Steuerung für die Erzeuger und Wärmesenken der beteiligten Häuser implementiert, um die Speichertemperaturen im erforderlichen Bereich zu halten. Zur Gewährleistung von stabilen Randbedingungen für die Kalibrierung der PID-Reglerkonstanten und die Randbedingungen der Simulation im Experiment nachzubilden, wurde zwischen der Übergabestation und dem Wärmespeicher jeweils ein Mischermodule installiert. Dieses regelt hausseitig die Eintrittstemperatur in die Übergabestation, wobei sich beim Wechsel des Modus die Flussrichtung und damit das Regelziel ändert. Fungiert ein Haus als Producer wird somit auf Sekundärseite die Vorlauftemperatur auf 55°C und beim Consumer die Rücklauftemperatur auf 30°C gehalten. Zur Reduktion der Verzögerung von Temperaturänderungen in der Regelschleife des Mischermoduls wurden zusätzliche Temperatursensoren nahe an den relevanten Abgängen des Mischers verbaut.

Im nächsten Schritt des Experiments werden automatisiert dieselben Lastprofile und Rollenwechsel zwischen Einspeisung und Bezug wie in der Simulation nachgefahren, während die Fähigkeit des Reglers, die Leistungs- und Temperaturvorgaben einzuhalten, gemessen wird. Über die Dauer des Experiments werden diskrete Leistungs-Sollwerte für je 20-minütige Intervalle eingestellt, um das dynamische und statische Verhalten des Regelungssystems bei sprunghaften Änderungen zu evaluieren.

Die experimentellen Ergebnisse sind in Abbildung 42 dargestellt und zeigen, dass der entworfene PI-basierte Regler seine Ziele innerhalb von 6 Minuten nach einer Änderung der Leistungs-Sollwerte erreicht und erfolgreich Temperatur- und Leistungsziele entsprechend des Reglerentwurfs priorisiert. Bei bestimmten Leistungssollwerten wurden Temperaturoszillationen am hausseitigen Einlass des Wärmetauschers beobachtet, die auf thermische Wechselwirkungen zwischen Speicher, Erzeuger, Wärmesenke und Mischermodule zurückzuführen sind anschließend von einem Prosumer über das Netz zum anderen propagieren. Folglich spiegeln sich diese Oszillationen in mehreren Messungen wider.

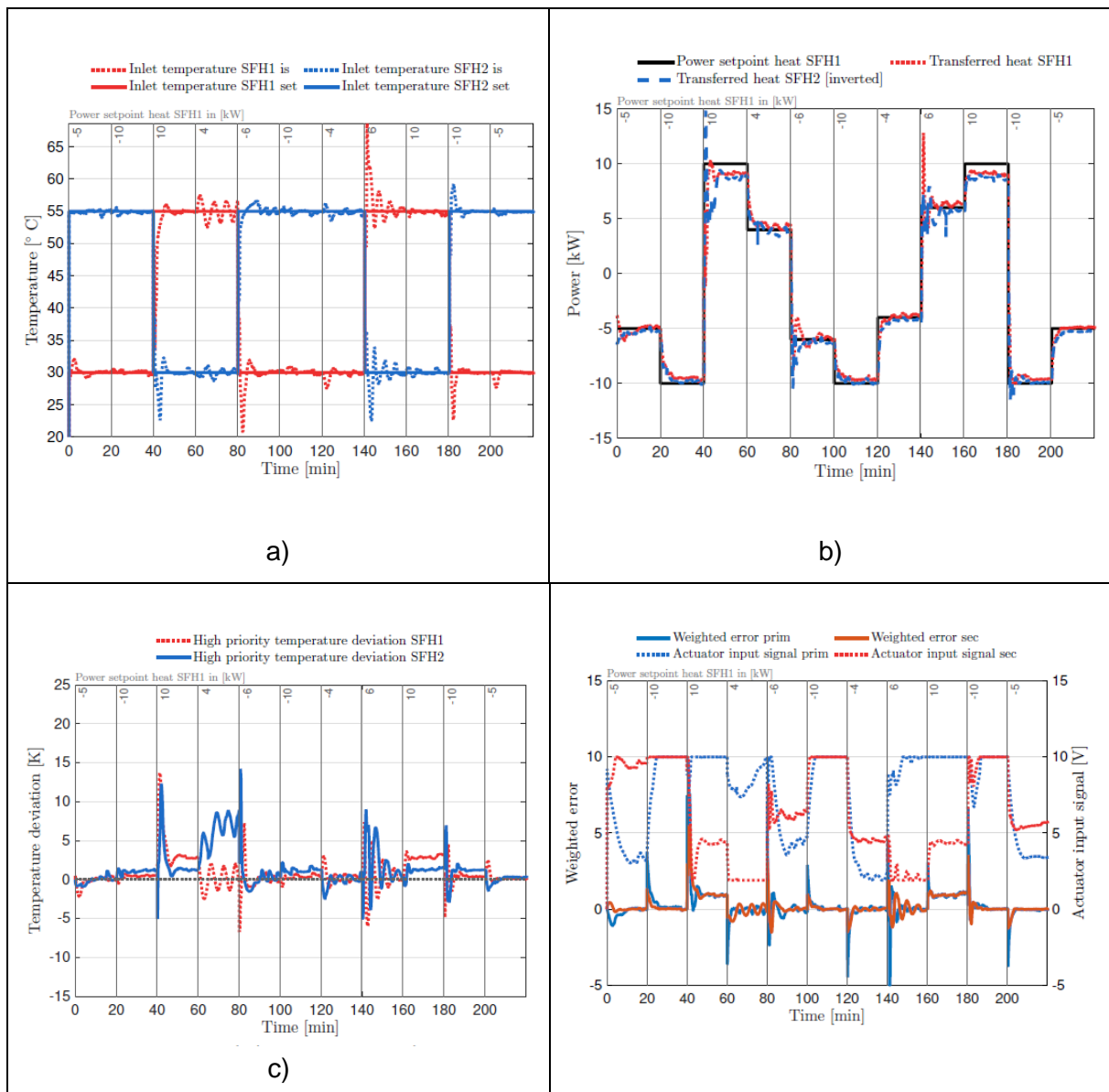


Abbildung 42: Messergebnisse des Leistungs- und Temperaturverhaltens während der PID-Regelungstests

Insgesamt bestätigen die experimentellen Ergebnisse die Eignung des Regelungskonzepts für reale Anwendungen und stützen die praktische Umsetzbarkeit von rein prosumerbasierten Fernwärmesystemen. Gleichzeitig unterstreichen die Erkenntnisse die Relevanz der richtigen Dimensionierung der Aktoren für ein optimales Verhalten.

2.4.2 Feldtestprototyp der bidirektionale Wärmeübergabestation

Neben den experimentellen Untersuchungen im CoSES-Labor, wurde ergänzend eine prototypische bidirektionale Wärmeübergabestation im Feld bei einem der Projektpartner aufgebaut und getestet.

Ausgangssituation

Der Feldversuch sollte Komponenten einer bidirektionalen Übergabestation sowie deren Steuerung in der Praxis testen und Erkenntnisse über reale Anwendungsszenarien liefern.

Ausgangsbasis sind zwei benachbarte Gebäude am Standort der Triowatt in Stephanskirchen.



Abbildung 43: Lageplan

Im Gebäude A befindet sich eine konventionelle Ölheizung. Gebäude B dagegen wird von einer Luft/Wasser-Wärmepumpe in Verbindung mit einer thermischen Solaranlage beheizt. Zwischen den beiden Gebäuden existieren bereits Verbindungsleitungen für Vor- und Rücklauf, die an die Heizungsanlage im Gebäude B angeschlossen sind und im Heizungsraum von Gebäude A enden. In diesem Raum sollte eine bidirektionale Wärmeübergabestation aufgebaut werden.

Konzept

Da nur zwei Gebäude miteinander gekoppelt werden, gibt es kein separates Wärmenetz. Die beiden Heizungsanlagen werden mittels der Übergabestation direkt miteinander verbunden, daher ist der Aufbau der Station symmetrisch.

Zentrales Element ist der Wärmetauscher, der gegenläufig durchströmt wird. Zwei regelbare Pumpen sorgen für einen variablen Volumenstrom. Mittels der beiden Drei-Wege-Ventile pro Seite kann die Anbindung an die Vor- und Rücklaufleitungen der Heizungsanlagen vertauscht und somit die Richtung des Wärmeflusses umgekehrt werden, ohne die Strömungsrichtung im Wärmetauscher zu ändern. Dies ist die Voraussetzung für den Einsatz kommerzieller Wärme/Kältemengenzähler.

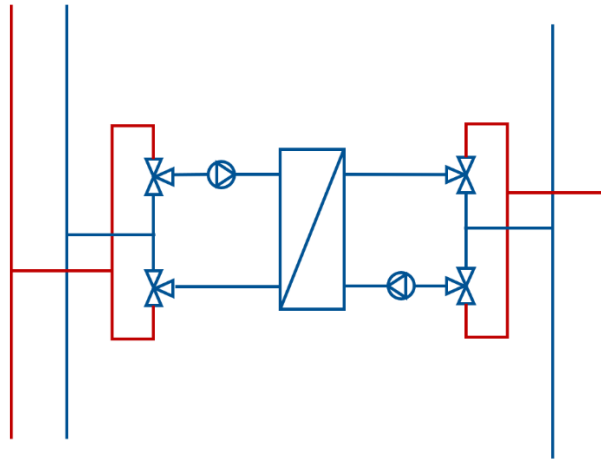


Abbildung 44: Aufbau der bidirektionalen Wärmeübergabestation

Aufbau der Übergabestation

Die meisten vorhandenen Heizungsanlagen sind in Räumen untergebracht, deren Größe gerade ausreichend für die Unterbringung der Komponenten ist. Der vorhandene Kellerraum mit der Ölheizung in Gebäude A stellt hier keine Ausnahme dar. Deshalb wurde beim Entwurf der Übergabestation auf einen möglichst kompakten Aufbau geachtet.

Die einzelnen Komponenten werden möglichst direkt mittels Schraubfittings miteinander verbunden. Für die notwendigen Rohrleitungen kommt das Prestabo-System der Firma Viega zum Einsatz, das mittels Pressverbindungen und Formteilen eine gute Platzausnutzung ermöglicht. Der Anschluss an die vorhandenen Vor- und Rücklaufleitungen sowohl zur Ölheizung als auch zu den Wärmeleitungen in Richtung Gebäude B erfolgt mit Flexschläuchen. Auf diese Art konnte die Übergabestation im beengten Bauraum untergebracht werden.

Beim Wärmetauscher kommt ein Alfa Laval CB60 Plattenwärmeübertrager in gelöteter Ausführung aus Edelstahl zum Einsatz, der nominal bis zu 85 kW Übertragungskapazität besitzt.

Die beiden Umwälzpumpen Wilo Stratos MAXO 25/0,5-4 sind Hocheffizienz-Nassläuferpumpen, die mittels 0-10V Signal angesteuert werden können und über Rückmeldekontakte zur Fehlerüberwachung verfügen. Die Pumpen sind jeweils im Vorlauf des Wärmetauschers angeordnet.

An den Ausgängen des Wärmetauschers sitzen Engelmann Sensostar U Wärme-/Kältemengenzähler. Diese erfassen die Vor- und Rücklauftemperaturen, Volumenflüsse, Energie- und Leistungswerte in beiden Strängen der Übergabestation. Die Messgeräte sind mit einer Modbus-RTU Schnittstelle für die Datenübertragung ausgestattet.

Die Drei-Wege-Ventile Honeywell VC 6013 MP 6000 haben 230V Motorköpfe, die innerhalb von etwa 6 Sekunden zwischen den beiden Ventilpositionen umschalten können. Die Ansteuerung erfolgt über einen einfachen Wechslerkontakt, an den Endpositionen schaltet der Antrieb selbsttätig ab.

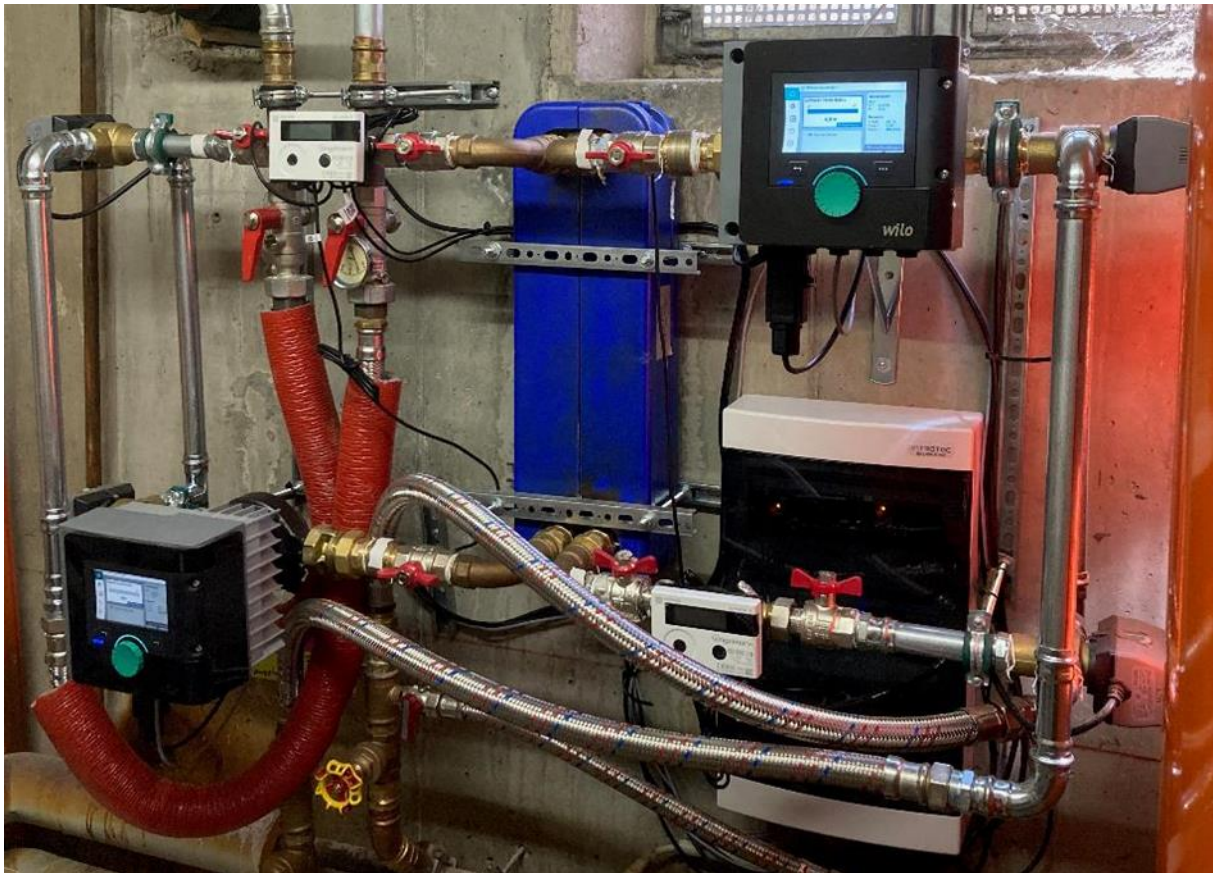


Abbildung 45: Realisierte Umsetzung der bidirektionalen Wärmeübergabestation

Steuerung

Elektrische Steuerung

Im Verlauf des Projekts wurden verschiedene Konzepte für die Realisierung der Steuerungshardware untersucht.

Erste Versuche mit Arduino-basierten Hutschienengeräten (Controllino) ergaben einen sehr hohen Aufwand für die Software-Implementierung, unter anderem wegen der beschränkten Rechenleistung. Daher wurde zunächst auf eine bereits bei Triowatt bestehende Gateway-Hardware gesetzt. Viele Soft- und Hardwarekomponenten konnten so wiederverwendet werden, da das Gerät von vorneherein erweiterbar konzipiert wurde. Dazu wurde ein Hardware-Prototyp entwickelt und mit der Umsetzung der Softwareanpassungen begonnen.

Leider zeigten sich erhebliche technische Schwierigkeiten, die der Lieferant des Steuerungssystems nicht angemessen lösen konnte. Daher musste eine völlig neue Lösung gefunden werden.

Das aktuelle Steuerungssystem besteht nun aus dem ExpertBMS Controller des Herstellers Webdyn. Das Gerät ist in einem Gehäuse im REG-Format mit 12 TE Breite zur Hutschienmontage untergebracht und passt so unter die Abdeckungen üblicher Elektroverteiler. Der Controller basiert auf einem ARM Mikroprozessor mit vier Cortex-A9 Kernen, 1 GB RAM und 8 GB Flash-Speicher. Zur Verbindung mit der Außenwelt stehen zwei Ethernet-Schnittstellen, zwei USB-Ports, vier serielle Schnittstellen und optional ein LTE/4G Mobilfunkmodem zur Verfügung.

Eine serielle Schnittstelle dient als Konsolenport, zwei sind als RS485-Anschlüsse nach außen geführt und die vierte ist intern mit einem weiteren Mikrocontroller verbunden. Dieser stellt eine

Reihe von Hardware-Anschlüssen bereit: Vier Relaisausgänge, sechs digitale Eingänge, sechs umschaltbare analoge/digitale Eingänge und acht analoge Ausgänge. Die Konfiguration und Ansteuerung dieser Schnittstellen erfolgt über das Modbus-RTU Protokoll.



Abbildung 46: Prototyp Steuerungselektronik

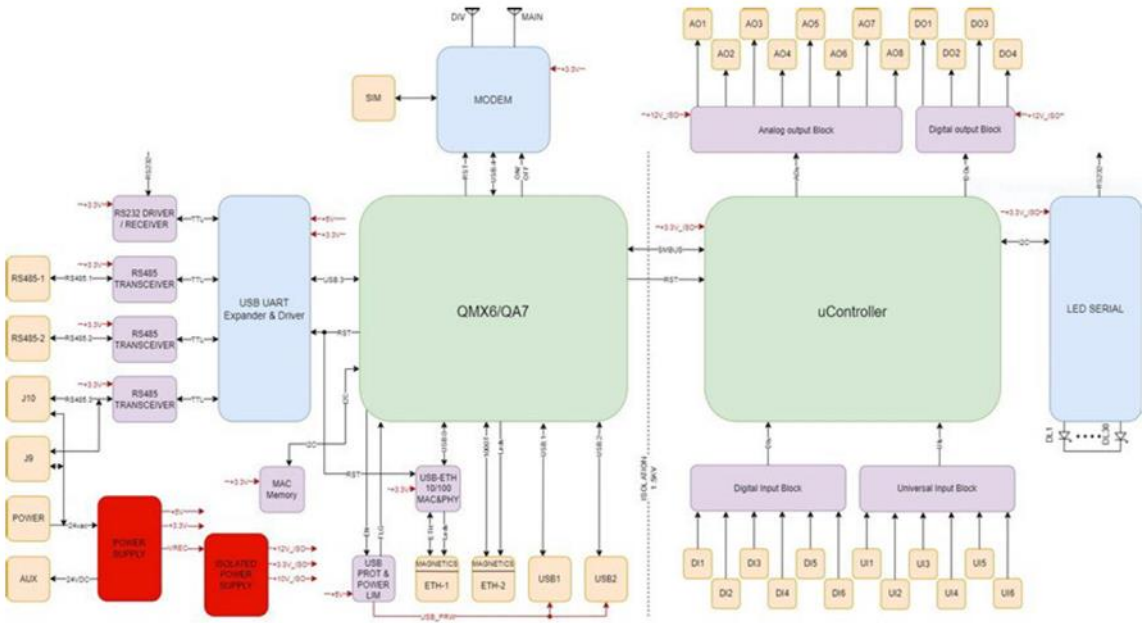


Abbildung 47: Systemdiagramm Controller

Die Betriebsspannung für den Controller wird von einem 24V DC Hutschienennetzteil bereitgestellt. Dieses Netzteil versorgt auch die beiden Wärmemengenzähler, die ihre Messwerte über die beiden Modbus-RTU Schnittstellen des Controllers anliefern.

Ein Relaisausgang des Controllers steuert ein Installationsrelais mit Wechslerkontakten an, das die 230 V für die Motorventile umschaltet. Zwei Analogausgänge mit 0-10 V Ausgangsspannung steuern die beiden Umwälzpumpen. Die Störmeldekontakte der Pumpen sind wiederum mit jeweils einem digitalen Eingang am Controller verbunden.

Die gesamte elektrische Steuerung ist in einem Aufputz-Kleinverteiler mit 3x12 TE Größe untergebracht. Dieser bietet ausreichend Platz für die REG-Geräte und die Reihenklemmen zum bequemen Anschluss aller Pumpen, Zähler und Ventile.



Abbildung 48: Steuerung

Software

Beim Betriebssystem fiel die Wahl auf Debian Linux in der aktuellen Version 12 „Bookworm“, das von der Hardware des Controllers problemlos unterstützt wird. Dadurch steht auch das umfangreiche Repository quelloffener Software für dieses System zur Verfügung.

Die Steuerung wurde mit Rode-RED realisiert. Dabei handelt es sich um eine Browser-basierende grafische Entwicklungsumgebung, die auf der JavaScript-Bibliothek Node.js basiert. Das System bietet Zugriff auf die Hardware-Schnittstellen des Controllers via Modbus-RTU, hat umfangreiche Funktionen zur Verarbeitung und Weiterleitung von Daten an andere Systeme und verbraucht wenig Hardwareressourcen. Individuelle Funktionen können per JavaScript leicht hinzugefügt werden, was bei diesem Projekt insbesondere für die Konvertierung der Messwerte der Wärme/Kältezähler genutzt wird.

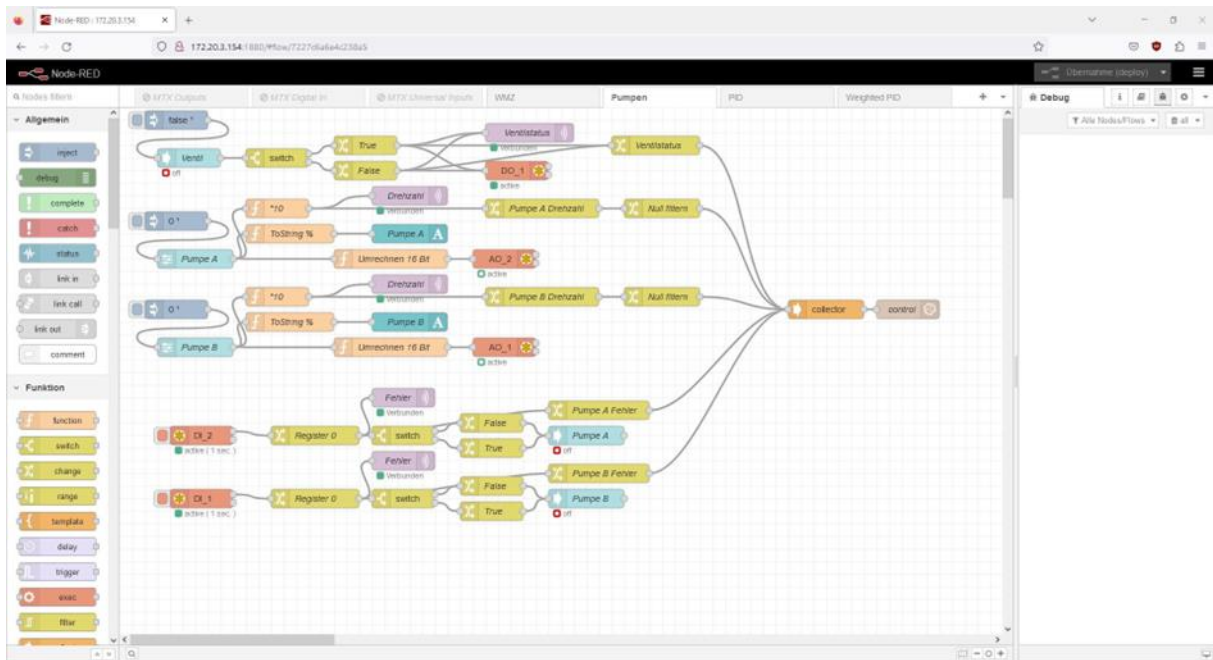


Abbildung 49: Screenshot Node-RED

Die Bedienung und Überwachung der Wärmeübergabestation erfolgt mit einer Web-basierten Oberfläche ebenfalls direkt in Node-RED. Dort können die aktuellen Werte abgelesen und die Pumpen und Ventile manuell gesteuert werden.

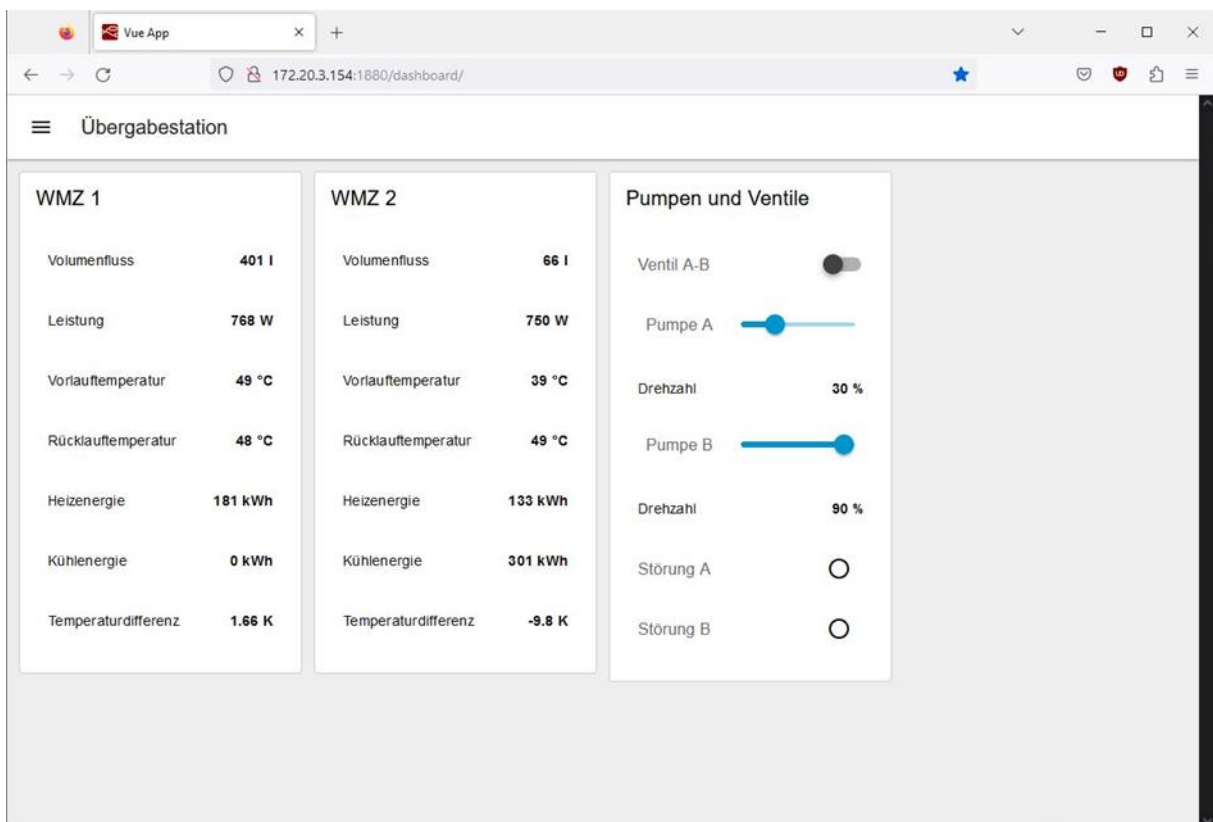


Abbildung 50: Screenshot Vue App

Auf dem BMS-Controller läuft zusätzlich der MQTT-Broker mosquitto. Auf diesem werden laufend alle aktuellen Messwerte und die Sollwerte der Pumpen und Ventile veröffentlicht und so für andere Systeme zugänglich gemacht.

Ein Server im lokalen Netzwerk stellt einen Docker-Container zur Verfügung, in dem die Datenbank InfluxDB sowie das Visualisierungstool Grafana laufen. Node-RED schreibt die erfassten Messwerte der Wärmeübergabestation über das Netzwerk in die Datenbank, wo sie langfristig gespeichert werden. Grafana greift auf die Daten in der InfluxDB zu und visualisiert diese in individuell konfigurierbaren Dashboards.

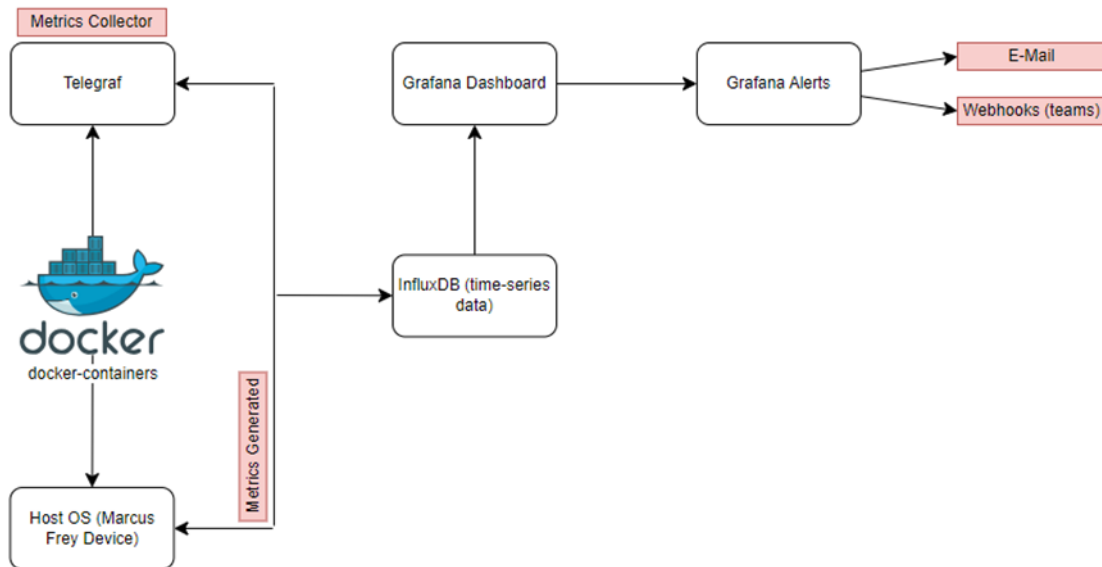


Abbildung 51: Systemschema InfluxDB/Grafana



Abbildung 52: Screenshot Grafana

Fazit

Im Rahmen des Feldversuchs konnte erfolgreich der Aufbau und die Inbetriebnahme einer bidirektionalen Wärmeübergabestation demonstriert werden. Es ist möglich, nur unter Verwendung von handelsüblichen Komponenten eine kompakte Anlage zu realisieren, die in einem üblichen Heizungsraum Platz findet.

Eine kommerzielle Verwendung erfordert eine rechtssichere Erfassung der übertragenen Wärmemengen. Dafür sind geeichte Wärme/Kältezähler verfügbar, die bereits vielfach bei Abrechnungsdiensten im Einsatz sind und gleichzeitig die benötigten Messwerte für die Steuerung der Station bereitstellen können.

Auch die elektrische Hardware besteht aus industriell erhältlichen Bauteilen. Das Konzept des verwendeten Controllers ist in ähnlicher Form von verschiedenen Herstellern lieferbar, so dass je nach Situation (z.B. Lieferproblemen oder Abkündigung seitens des Produzenten) Alternativen vorhanden sind und ein langfristiger Betrieb sichergestellt ist. Der Controller bietet genügend Leistung, um auch zukünftige Erweiterungen zu ermöglichen.

Die Software für die Steuerung der Wärmeübergabestation konnte ausschließlich mit Open-Source-Komponenten realisiert werden. Somit ist eine beständige Verfügbarkeit und Weiterentwicklung gewährleistet. Zudem ist diese Lösung kosteneffizient und geht Schwierigkeiten mit etwaigen Lizenzen aus dem Weg. Ebenso ist eine Anpassung an bereits vorhandene Infrastruktur, z.B. die Heizungssteuerung, Energiemanagement oder Hausautomatisierung möglich.

2.5 E5 Rückwirkungen Stromsystem

Neben der Analyse thermischer Prosumernetze ist auch deren Rückwirkung auf das Stromsystem Gegenstand dieses Projektes. Anhand von Versuchen im CoSES Labor und darauf aufbauenden Simulationsrechnungen wurden die Bereitstellung von netzdienlicher Flexibilität durch steuerbare Anlagen und die Entlastung des Stromnetzes eines Quartiers durch Sektorkopplung mit dezentralen Wärme- und Stromeinspeisung untersucht. Ebenso wurden die Auswirkungen auf die Spannungsqualität analysiert.

2.5.1 Analyse der Entlastung des Stromverteilnetzes durch Sektorkopplung

Methodische Vorgehensweise

Die Entlastung des Stromverteilnetzes durch die Implementierung von Sektorkopplungssystemen im Rahmen des Projekts wurde mittels verschiedener Szenarien modelliert und evaluiert. In der Simulation wurde ein thermisches Prosumernetz betrachtet, das auf den Prinzipien der Sektorkopplung von Strom und Wärme basiert. Zur Modellierung und Simulation kam das *urbs*-Tool zum Einsatz, welches auf einem linearen Optimierungsmodell basiert und auf die Minimierung von Netzentgelten abzielt. Der Einsatz eines linearen Modells wurde gewählt, um komplexe Sektorkopplungs-Energiesysteme rechenzeitoptimiert abbilden zu können. Das *urbs*-Tool fungierte dabei als zentrales Element, um Energieangebot und -nachfrage sowie Flexibilitätsoptionen im Strom- und Wärmesektor zu koordinieren.

Die Eingangsdaten für die Simulation variieren je nach Szenario und beinhalten Informationen zum Fernwärme- und elektrischen Verteilnetz, Wetterdaten und Energiepreise (vgl. Abbildung 53). Dazu gehören unter anderem der Energiebedarf, die Erzeugungskapazitäten, Flexibilitätsoptionen und die eingesetzte Technologie. Das Konzept der Sektorkopplung berücksichtigt mehrere Energieträger, wobei sowohl Wärme als auch elektrische Energie

betrachtet werden. Schließlich wird bei der Optimierung des Fernwärmenetzes für jedes Zeitintervall eine Lösung bestimmt.

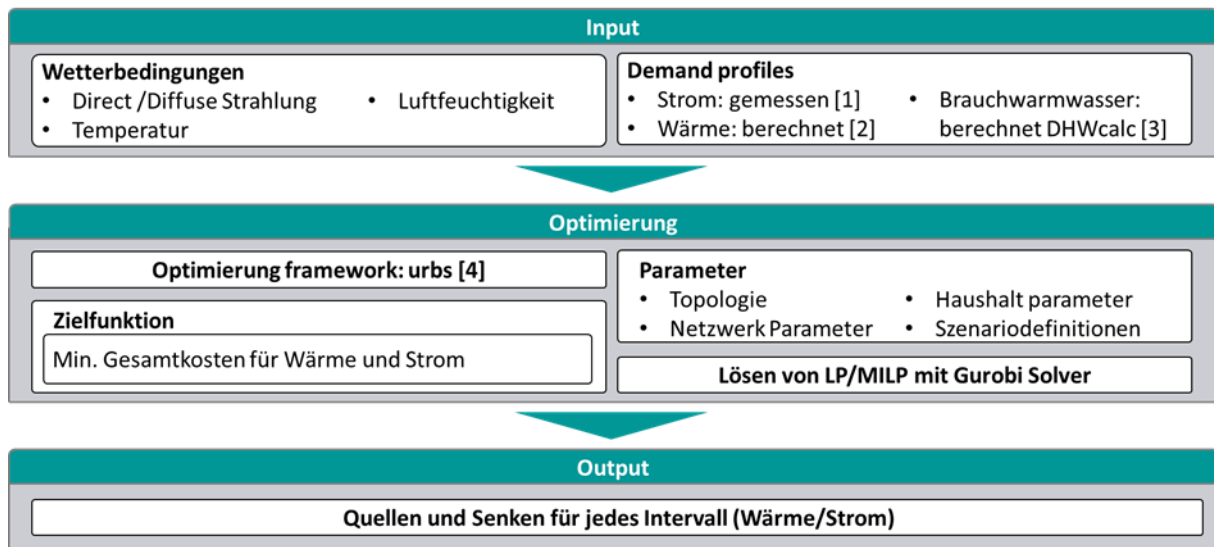


Abbildung 53: Schematische Darstellung der Methode zur Sektorkopplung mittels des urbs-Tools. Das Verfahren basiert auf einem linearen Optimierungsmodell, das 24-Stunden-Fahrpläne erstellt

Szenario A (Abbildung 54) beschreibt den aktuellen Stand der Technik ohne nennenswerte Interaktion zwischen den Sektoren. Das Szenario umfasst fünf Haushalte, die jeweils auf individuelle Heiztechnologien setzen, ohne eine Kopplung an das elektrische Netz. In Szenario B (Abbildung 55) hingegen wurde eine Kopplung zwischen Strom- und Wärmesektor simuliert. Die Haushalte sind über ein Wärmenetz verbunden. Es wurde angenommen, dass sowohl Wärmebedarfsprognosen als auch Wärmepreise für alle Teilnehmer im Fernwärmesystem bekannt sind.

Die Analyse umfasste eine Jahressimulation und spezifische Betrachtungen von Wintertagen, an denen die Lastspitzen traditionell höher ausfallen. Die Simulationen wurden unter Berücksichtigung der aktuellen Strom- und Gaspreise sowie der Einspeisetarife durchgeführt, um eine umfassende Bewertung der Kosten- und Energieeinsparungen durch Sektorkopplung zu ermöglichen.

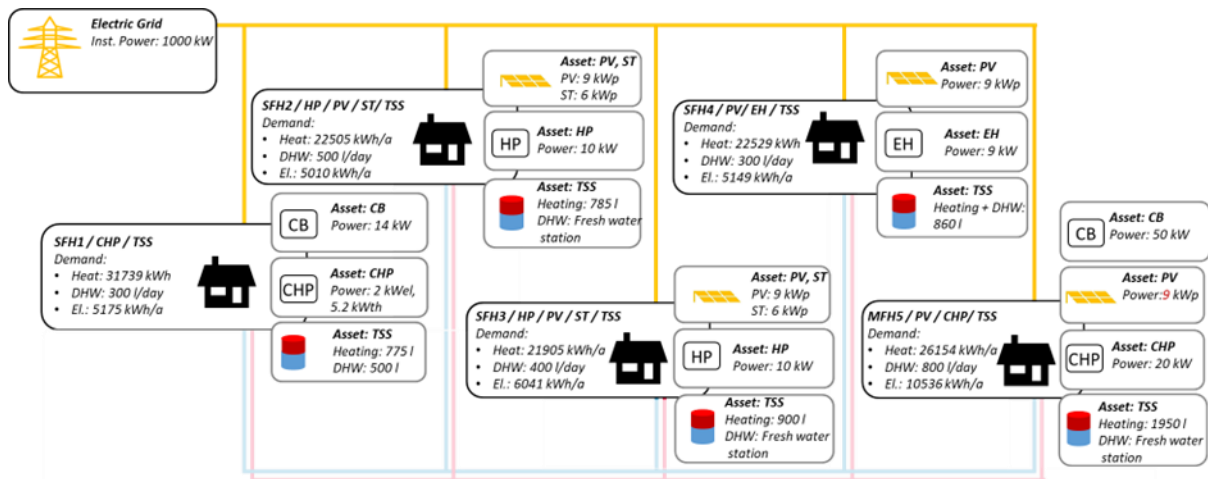


Abbildung 54: Darstellung der Systemkomponenten in Szenario A (Ausgangsszenario)

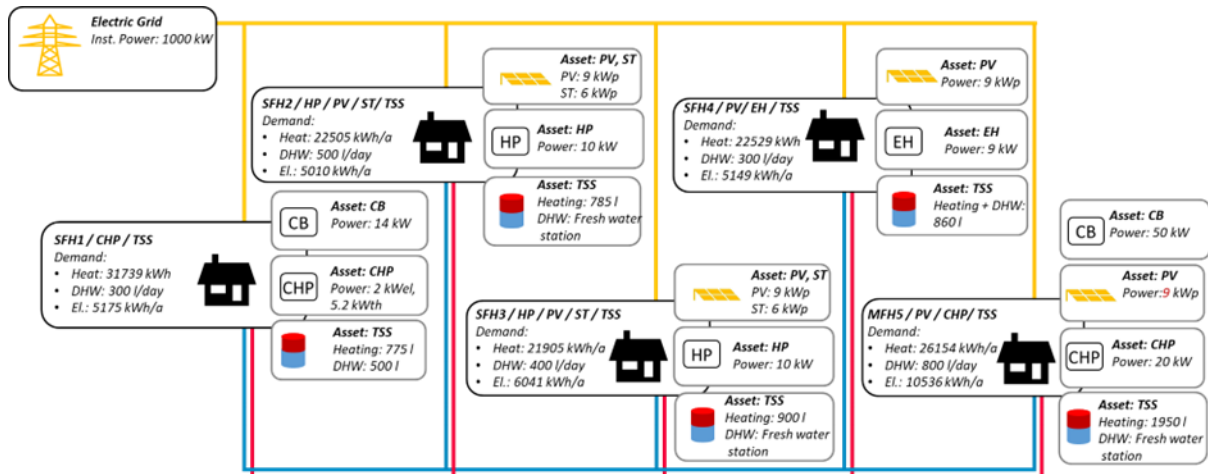


Abbildung 55: Darstellung der Systemkomponenten in Szenario B (Sektorkopplungsszenario)

Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse zeigten eine signifikante Entlastung des Stromverteilnetzes durch den Einsatz von Sektorkopplungstechnologien. Im Wintertagsszenario konnte eine Reduktion der Spitzenlast um 17,1 % festgestellt werden. Dies ist insbesondere auf die flexible Nutzung von Wärme- und Stromspeichern sowie die zeitversetzte Einspeisung von Strom in das Netz zurückzuführen (Abbildung 56).

Ein anderer Faktor für die Entlastung des Stromnetzes war die Integration von Wärmepumpen und deren Betrieb in Zeiten niedriger Strompreise. Dies ermöglichte auch eine Kostenreduktion von 29,7 % im Vergleich zum Ausgangsszenario ohne Sektorkopplung. Darüber hinaus trug die verstärkte Nutzung lokal erzeugter erneuerbarer Energien, beispielsweise aus Photovoltaikanlagen, zur weiteren Reduzierung der Netzbelastung bei, da weniger Strom aus dem übergeordneten Netz bezogen werden musste (Abbildung 57, Abbildung 58).

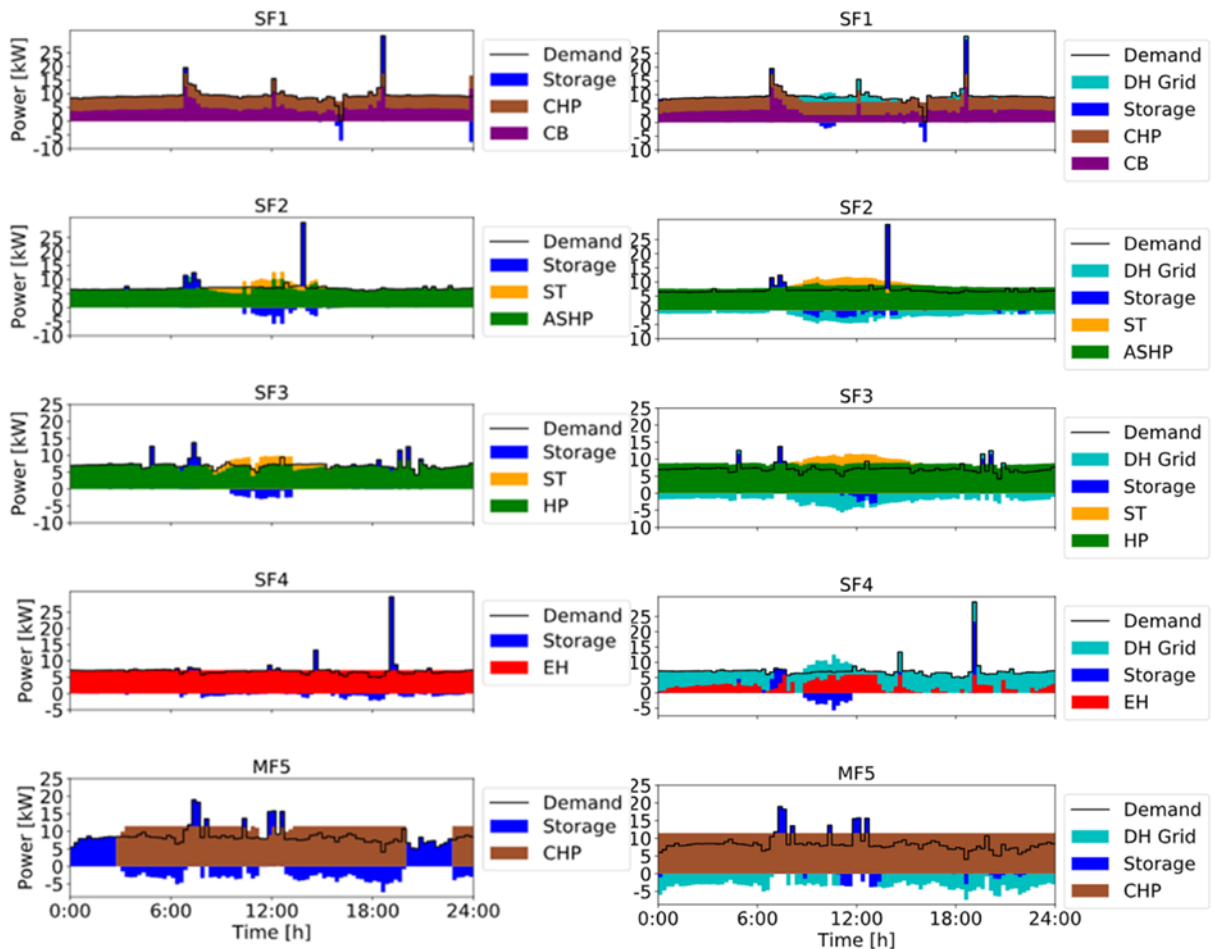


Abbildung 56: Vergleich der Leistung in verschiedenen Haushalten (SF1, SF2, SF3, SF4, MF5) – Ausgangsszenario (links) und Sektorkopplungsszenario (rechts)

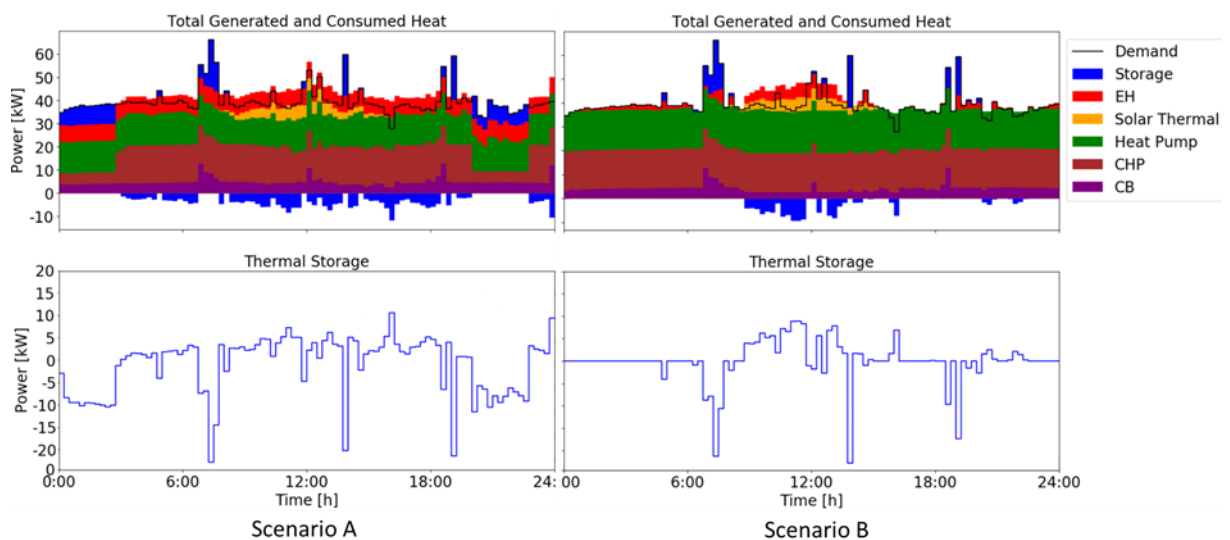


Abbildung 57: Vergleich der gesamten erzeugten Wärme sowie der thermischen Speichernutzung in Szenario A (links) und Szenario B (rechts)

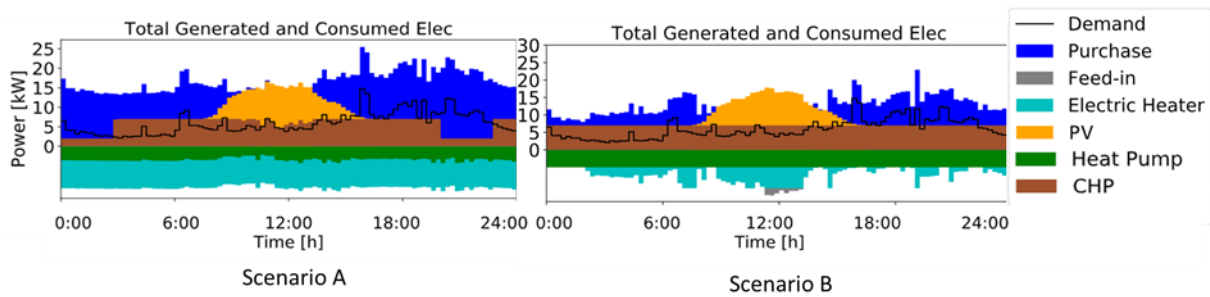


Abbildung 58: Vergleich der gesamten erzeugten elektrischen Energie in Szenario A (links) und Szenario B (rechts)

Qualitative Ableitungen

Die Simulationen verdeutlichen das Potenzial der Sektorkopplung zur Entlastung des Stromnetzes, insbesondere durch die flexiblere Steuerung von Energieflüssen in Zeiten hoher Spitzenlast. Dadurch kann eine gleichmäßigere Netzlast erreicht und der Bedarf an zusätzlichen Netzkapazitäten reduziert werden. Die stärkere Integration von Strom- und Wärmesektor trägt somit zu einer effizienteren und nachhaltigeren Nutzung der Energieressourcen bei.

Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer intelligenten Einsatzplanung für künftige Fernwärmesysteme. Die in den Simulationen verwendeten Annahmen – wie bekannte Wärmebedarfsprognosen und Wärmepreise sowie eine vereinfachte Netztopologie – machen deutlich, dass in realen Anwendungen ein zusätzlicher Planungsaufwand notwendig ist, um komplexere Bedingungen und genauere Ergebnisse zu berücksichtigen.

Trotz des erforderlichen Aufwands zeigt sich, dass die optimierten Sektorkopplungssysteme sowohl ökologisch als auch ökonomisch klare Vorteile bieten. Dabei könnte der Einsatz nichtlinearer Optimierungsverfahren, die komplexere physikalische Prozesse präziser abbilden, insbesondere bei der Anpassung von Bestandsnetzen relevant sein. Die Wahl der passenden Methode hängt stark vom spezifischen Anwendungsfall und den technischen Anforderungen ab.

2.5.2 Bereitstellung von Flexibilität im Stromnetz durch Power-to-Heat Anwendungen

Die Bereitstellung von Flexibilität im Stromnetz durch Power-to-Heat Anwendungen wird mit Hilfe von OpenTUMFlex untersucht. Hierfür wird das kumulierte Flexibilitätspotential von fünf Einzelgebäuden (siehe Abbildung 59 a) mit dem Flexibilitätspotential von fünf durch ein Wärmenetz verbundene Einzelgebäude (siehe Abbildung 59 b) verglichen. Dabei werden Übertragungsverluste vernachlässigt.



Abbildung 59: a) fünf Häuser ohne Anbindung an ein Wärmenetz, b) fünf Häuser mit Anbindung an ein Wärmenetz

Quantifizierung der Flexibilität

In einem ersten Schritt wurde OpenTUMFlex um die Komponenten der CoSES-Gebäude (insbesondere der Wärmepumpen und der Unterscheidung zwischen unterschiedlichen Temperaturniveaus) erweitert, um anschließend das kumulierte Flexibilitätspotential der fünf Einzelgebäude sowie das Flexibilitätspotential des durch ein Wärmenetz verbundenen Einzelgebäude ohne Wärmenetzbeschränkungen abzubilden und zu vergleichen.

OpenTUMFlex ist ein open-source Tool zur Quantifizierung und Bepreisung der Flexibilität von Prosumern zur Teilnahme an einem lokalen Flexibilitätmarkt. Abbildung 60 zeigt einen funktionalen Überblick über OpenTUMFlex. Als Eingangsdaten werden die Prosumerdaten benötigt, die bei dieser Untersuchung die PV-Erzeugung, Strom- und Wärmelastprognose, Strom- und Gaspreise, Wetterprofile und Geräteparameter waren. Mit diesen Eingangsdaten wird der kostenoptimale Betriebsplan für alle steuerbaren Geräte bestimmt, wobei mit den Nebenbedingungen die elektrische und thermische Energiebilanz sowie die funktionalen Beschränkungen der einzelnen Geräte berücksichtigt werden [40]. Aus dieser Optimierung resultieren eine optimale Strom- und Wärmebilanz (siehe Abbildung 61).

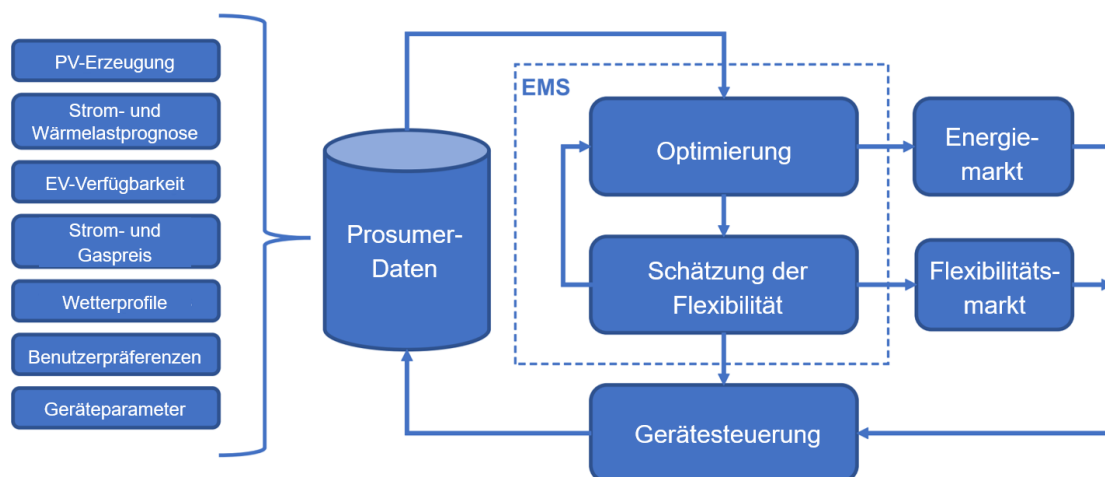


Abbildung 60: Überblick über funktionellen Aufbau von OpenTUMFlex (in Anlehnung an [40])

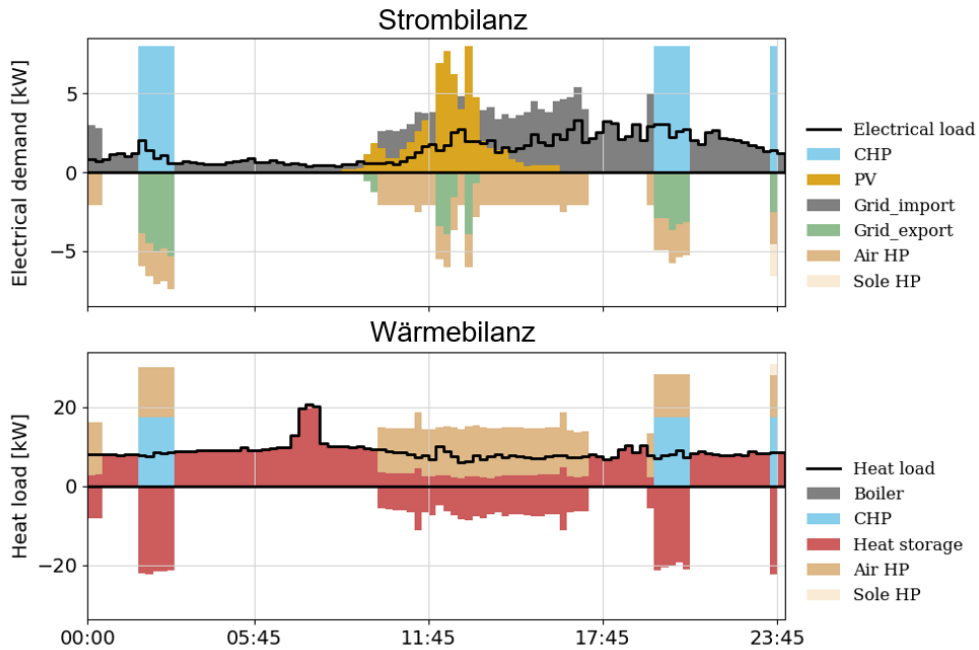


Abbildung 61: Strom- und Wärmebilanz nach Optimierung mit Hilfe von OpenTUMFlex

Flexibilität wird definiert als alle möglichen Abweichungen von dem optimalen Betrieb – unter Berücksichtigung von Gerätebeschränkungen –, weshalb dieser zuvor berechnete kostenoptimale Betriebsplan als Eingangsdatei zur Bestimmung der Flexibilität verwendet wird. Es wird zwischen positiver und negativer Flexibilität unterschieden. Der Ausdruck positive Flexibilität wird verwendet, wenn eine Einspeisung in das Netz oder eine Nicht-Nutzung der geplanten Entnahme erfolgt. Äquivalent dazu bezeichnet der Ausdruck negative Flexibilität die Entnahme von Energie aus dem Netz oder eine Nicht-Einspeisung von geplanten Einspeisungen. [40]

Die Flexibilität wird mit und ohne Berücksichtigung des Wärmenetzes berechnet, wobei zur Berechnung des Flexibilitätspotentials unter Berücksichtigung des Wärmenetzes Erzeugung, Verbrauch und Speicherkapazität zusammengefasst werden. Dies resultiert in der in Abbildung 62 dargestellten aggregierten Flexibilität. In diesem Fall ist mehr Flexibilität vorhanden, falls die Häuser durch ein Wärmenetz verbunden sind. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass in diesem Fall jegliche Übertragungsverluste vernachlässigt wurden.

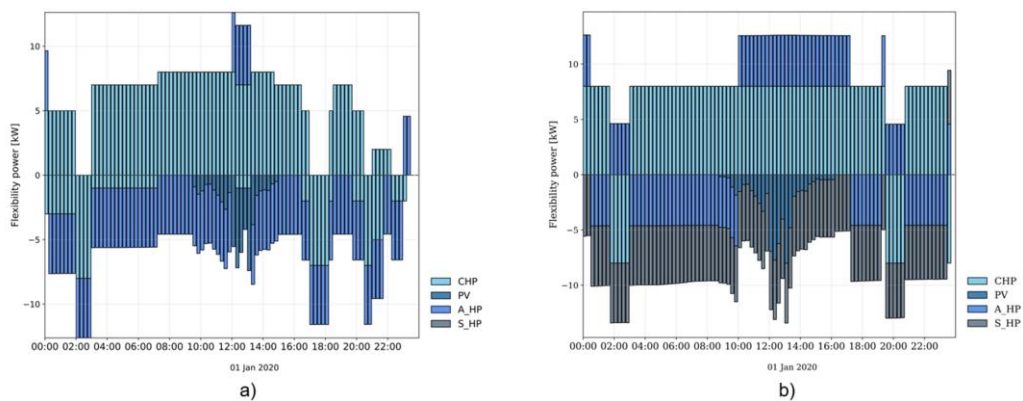


Abbildung 62: Aggregierte Flexibilität, falls Häuser nicht durch Wärmenetz verbunden sind (a), und, falls Häuser durch Wärmenetz verbunden sind (b)

Auswirkungen von Übertragungsverlusten

Um zu überprüfen, ob dies eine valide Annahme ist, wurde als zweiter Schritt die Übertragung zwischen den einzelnen Häusern mit Hilfe eines Optimierungstools (urbs) bestimmt. Dies resultierte in Tabelle 5, in der die Übertragungsverluste bei verschiedenen Effizienzen abgebildet sind. Abhängig von der Effizienz des Wärmenetzes ist zu beurteilen, ob die getroffene Annahme der Vernachlässigbarkeit der Übertragungsverluste zutrifft. Falls dies nicht zutrifft, wäre OpenTUMFlex um die Berücksichtigung der Übertragungsverluste zu erweitern, und die Flexibilität für diesen Fall zu berechnen. Bei dieser Berücksichtigung der Übertragungsverluste würde sich die zur Verfügung stehende Flexibilität verringern.

Tabelle 5: Übertragungsverluste bei unterschiedlichen Effizienzen des Wärmenetzes

	Export [kW]	Import [kW]	Übertragungsverluste [kW]
Effizienz	1	294,7	0,0
	0,95	283,3	14,2
	0,9	275,2	27,5
	0,85	264,6	39,7
	0,8	161,3	32,3
	0,75	135,0	33,7
	0,7	127,1	89,0

Nachweis der Flexibilität

Der Nachweis der Flexibilität könnte nach Abbildung 63 erfolgen. Demnach wird der bestimmte kostenoptimale Betriebsplan sowie mögliche positive/negative Flexibilität an den Netzbetreiber weitergeleitet. Dieser sendet anschließend ein Dispatch-Signal an das Gebäude. Daraufhin würde entsprechend des Dispatch-Signals die positive/negative Flexibilität zur Verfügung gestellt werden, indem der Betriebsplan der steuerbaren Geräte angepasst werden würde. [41]

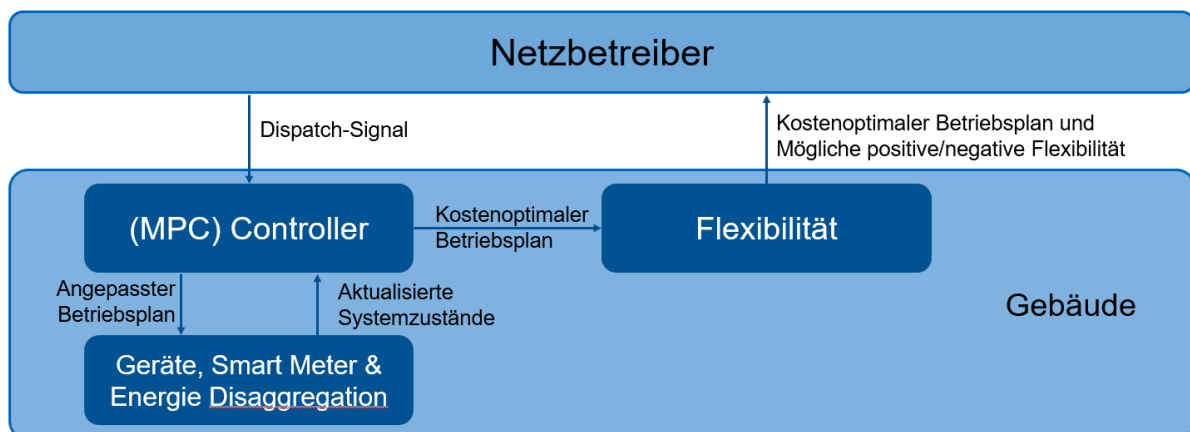


Abbildung 63: Nachweis der Flexibilität (in Anlehnung an [41])

2.5.3 Analyse des Systemeinflusses auf die Spannungsqualität

In diesem Arbeitspaket wurden die Rückwirkungen der verwendeten Systemkomponenten auf die Spannungsqualität untersucht. Hierfür wurden zunächst die in AP 2 erstellten Modelle als Functional Mockup Unit (FMU) kompiliert und in DigSilent PowerFactory 2023 SP5 integriert. Das BHKW aus dem CoSES Haus 1 wurde als FMU in PowerFactory importiert und eine Vorlage erstellt, die in existierende Netze importiert werden konnte. Dies wurde für das Simbench [42] Stadtnetz und das Landnetz durchgeführt.

Als kritischstes Szenario hat sich der Moment des Einschaltens des BHKWs herauskristallisiert, bei dem das BHKW aufgrund des Anlaufs über den Asynchrongenerator kurzzeitig viel Wirk- und Blindleistung aus dem Netz bezieht. Es wurde untersucht, ob dadurch die Netzspannung kurzzeitig stark reduziert wird und das Netz in einen dynamischen Netzfehler durch einen Spannungseinbruch von <90% Restspannung gerät.

In der PowerFactory-Simulation zeigte sich, dass selbst bei synchronem Start aller BHKW im städtischen Verteilnetz keine Spannungseinbrüche unter 90% Restspannung auftraten, wie in Abbildung 64 dargestellt.

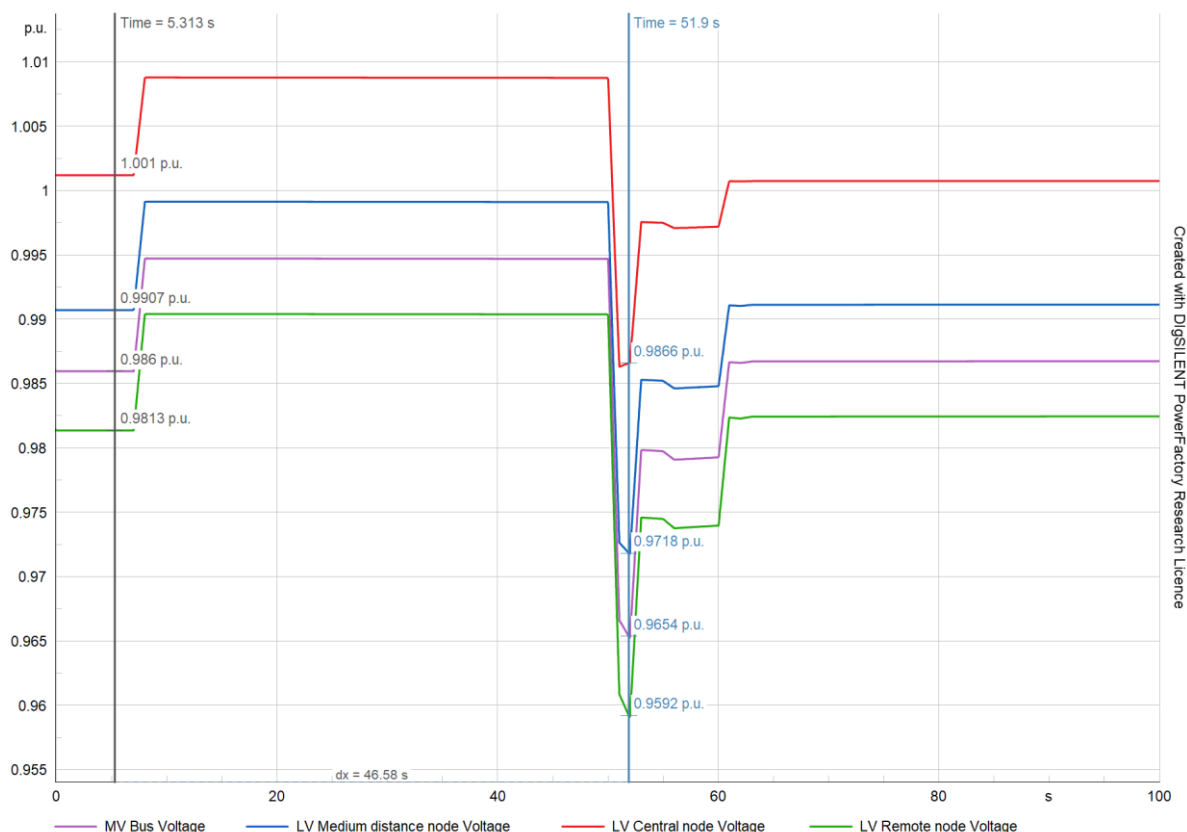


Abbildung 64: Verlauf der Spannungen im städtischen Simbench Netz

Im ländlichen Verteilnetz waren die Auswirkungen größer, und in weit von der Umspannstation entfernten Netzknoten war ein kurzzeitiger Spannungseinbruch in den Bereich des Netzfehlers möglich, wie Abbildung 65 zeigt.

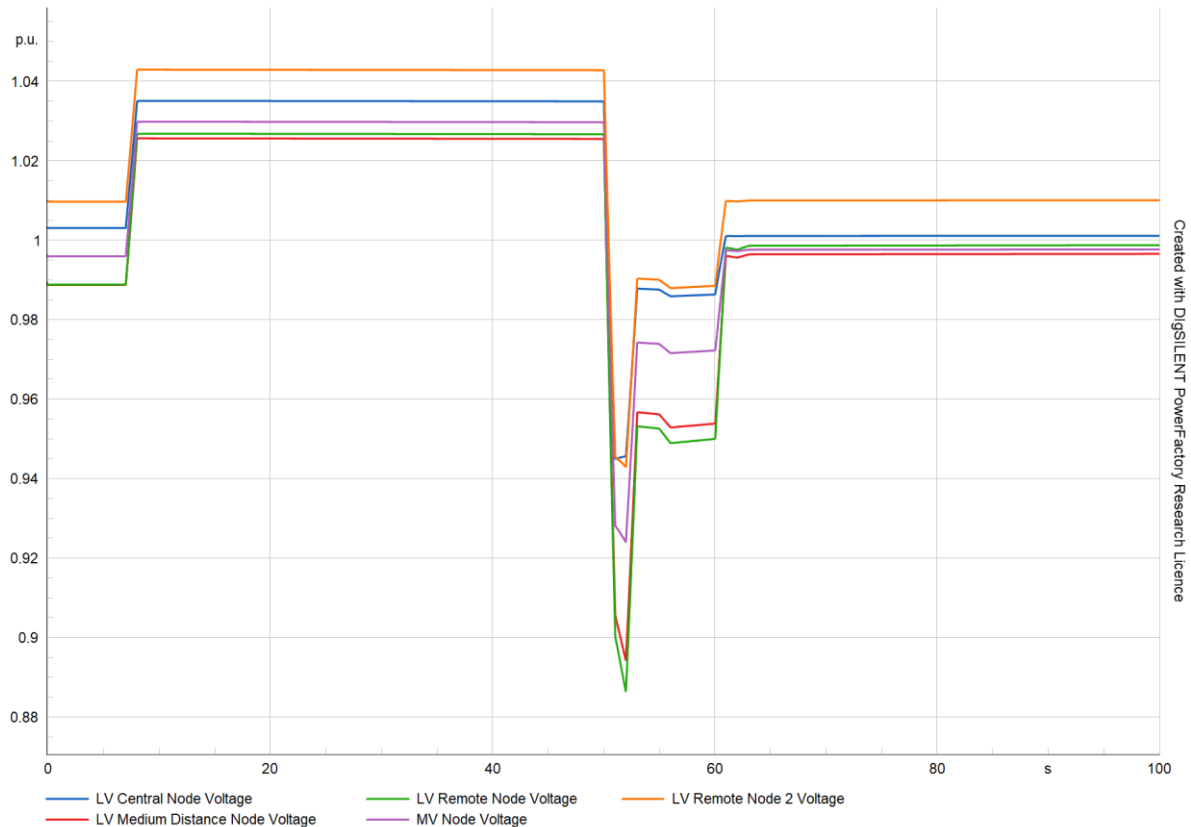


Abbildung 65: Verlauf der Spannungen im ländlichen Simbench Netz

Um diese Ergebnisse zu verfeinern und weitere Szenarien zu untersuchen, wurde eine zusätzliche Analyse mit dem Python-basierten Simulationstool Andes durchgeführt. Hierbei wurden hochaufgelöste Zeitreihen aus dem CoSES Labor verwendet, um detailliertere Effekte abzuschätzen.

Zusätzlich wurden der Aspekt in der dynamischen Open-Source Software Andes [43] analysiert. Hier wurden verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Durchdringungsraten von BHKW und Wärmepumpen in urbanen und ländlichen Netzen untersucht. Die Ergebnisse lassen sich am besten anhand von Heatmaps visualisieren, die den transienten Spannungseinbruch in Abhängigkeit von der BHKW- und Wärmepumpen-Durchdringung zeigen.

Abbildung 66 zeigt die Ergebnisse für das städtische Netz. Hier lässt sich erkennen, dass:

1. Erst bei sehr hohen BHKW-Durchdringungsraten >80% und an entlegenen Netzknuten kurzzeitige Spannungseinbrüche auftraten.
2. Die Wärmepumpen aufgrund des Anlaufs über einen Frequenzumrichter keinen Einfluss auf die transienten Spannungseinbrüche hatten.

Abbildung 67 stellt die Ergebnisse für das ländliche Netz dar. Hier zeigt sich:

1. Bereits bei mittleren BHKW-Durchdringungsraten (ab ca. 40%) kam es zu starken Spannungseinbrüchen.
2. Die Auswirkungen waren insgesamt stärker als im städtischen Netz

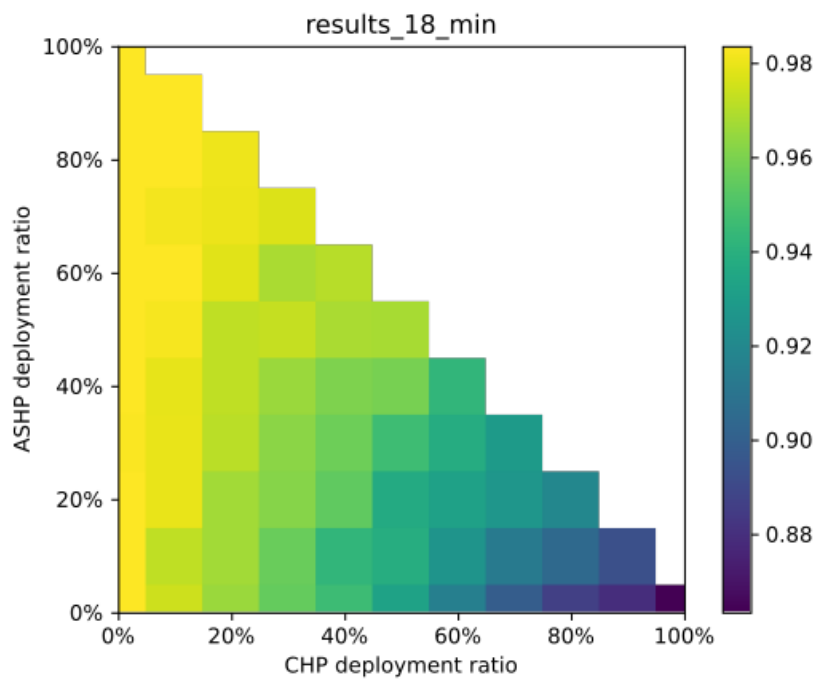


Abbildung 66: Heatmap des transienten Spannungsminimums eines weit vom Mittelspannungstransformator gelegenen Niederspannungsknoten im städtischen Netz

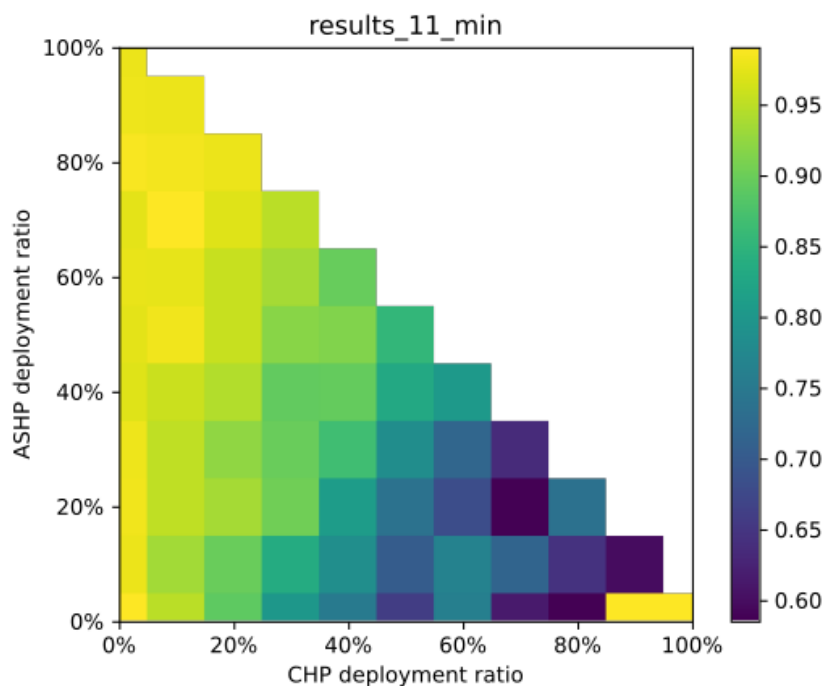


Abbildung 67: Heatmap des transienten Spannungsminimums eines mittelweit vom Mittelspannungstransformator gelegenen Niederspannungsknoten im ländlichen Netz

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass in den meisten realistischen Szenarien die Spannungsqualität nicht kritisch beeinträchtigt wird. Nur in extremen Fällen, insbesondere in

ländlichen Netzen mit hoher BHKW-Durchdringung und perfekt synchronisiertem Einschalten, könnten kurzzeitige Spannungseinbrüche auftreten.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wird die Entwicklung eines spezifischen Steuerungsalgorithmus zur Reduktion von Auswirkungen auf die Spannung des Verteilnetzes als nicht notwendig erachtet. In der Praxis sorgen natürliche Verzögerungen und Unterschiede im Schaltverhalten für eine ausreichende Desynchronisierung der Einschaltvorgänge.

2.6 E6 Energiewirtschaftliche Einordnung

Zur energiewirtschaftlichen Einordnung wurde die wirtschaftlich-strukturelle Machbarkeit als eine entscheidende Grundvoraussetzung analysiert. Die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit und der Marktsituation geben Aufschluss auf die Umsetzbarkeit solcher Netze in der aktuellen energiewirtschaftlichen Transformationsphase. Markthemmnisse wurden gesondert analysiert und bewertet. Im Fazit wird die energiewirtschaftliche Einordnung abgeschlossen.

2.6.1 Machbarkeit

Neben der gezeigten technischen Machbarkeit wurde die wirtschaftlich-strukturelle Machbarkeit untersucht. Die pure Verlegung der Wärmenetzleitungen ist durch herkömmliche Unternehmen ohne Mehraufwand bewerkstelligbar. Der komplexere Systemaufbau, insbesondere der Übergabestationen und deren Regler können v.a. durch den Skaleneffekt wirtschaftlich attraktiv hergestellt werden, was eine signifikante Mindeststückzahl erfordert.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Sicherstellung einer zuverlässigen und effizienten Energieversorgung was eine adäquate Betriebsführung und Wartung bzw. Entstörung erforderlich macht. Die Betriebsführung erfordert qualifiziertes Personal, das nicht nur über technisches Wissen, sondern auch über umfassende Kenntnisse des jeweiligen Systems vor Ort verfügt. Regelmäßige Wartungsintervalle sind entscheidend, um potenzielle Störungen frühzeitig zu identifizieren und so die Anlagenverfügbarkeit und die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Zudem ist moderne Fernüberwachung und Predictive Maintenance von großer Bedeutung, um Wartungsarbeiten bedarfsgerecht und kosteneffizient zu planen und zu organisieren.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind Unternehmen erforderlich, die sich auf diese stark digitalisierte Betriebsführung und Wartungsarbeiten spezialisieren. Unternehmen müssen bereit sein in entsprechende Technologien sowie in die Ausbildung ihres Personals zu investieren.

Zur Betriebsführung gehört auch die Abrechnung der Leistungen und die Verrechnung der entstandenen Kosten. Einer der zentralen Kostentreiber ist neben der Investition die Einkaufskosten der Energieträger. Für die Abrechnung der Kosten wurden 3 zentrale Modelle ausgearbeitet:

1. Externer Netzbetrieb: Eine Betriebsgesellschaft der Netzinfrastruktur kauft und verkauft die Energie zwischen Netz und den Gebäuden. Die Betriebsgesellschaft finanziert sich über die Differenz aus Einkaufs- und Verkaufspreis, was über den daraus resultierenden Markt und Wettbewerb mit z.B. lokaler Energieversorgung eine wirtschaftliche Energieversorgung erzwingt. Die Abrechnung der Energiekosten erfolgt

Gebäudescharf, wobei für die Abrechnung im Gebäude die Kosten des Einkaufs der Energieträger, sowie die Wärmeeinkaufs- abzüglich der Verkaufskosten zugrunde gelegt wird. Die Preisgestaltung im Netz muss durch einen entsprechenden realen Wärmemarkt vertraglich festgelegt werden.

2. Gemeinschaftliche Wärmeversorgung: Der Netzverbund wird als gemeinschaftliche Wärmeversorgung gemäß der Heizkostenverordnung (HeizkostenV) betrachtet und entsprechend abgerechnet. Aufgrund der Vermischung der Abrechnung innerhalb der einzelnen Gebäude und zwischen den Gebäuden und der damit einhergehenden Komplexität ist eine realistische Umsetzung dieser Abrechnung jedoch nur in kleinen und Kleinstnetzen möglich. Der Energiehandel zwischen den Gebäuden erfolgt daher rein virtuell.
3. Gewerbliche Wärmelieferung: Der Netzverbund wird wie unter Punkt 2 als gemeinschaftlich betrieben betrachtet. Die Abrechnung findet jedoch entsprechend §556c BGB als gewerbliche Wärmelieferung statt. Dies vereinfacht die Abrechnung, wobei am Grundprinzip einer genossenschaftlich orientierten Struktur ähnlich wie unter Punkt 2 festgehalten werden kann. So wären auch größere Netze umsetzbar, wobei die Vorgaben hinsichtlich Preisobergrenzen des §556c BGB im Zweifelsfall nachzuweisen wären.

Jeder Abrechnung liegt eine kosteneffiziente, MID-zertifizierte (vormals „geeichte“) Messung zugrunde. Die Projektpartner mit einem Zählerhersteller kommen zu dem Ergebnis, dass die gemeinsame Messung von Entnahme und Lieferung durch den Einsatz von Wärme-Kälte-Zählern realisiert werden kann, wobei die MID-Zertifizierung ggf. angepasst werden sollte. Ein Präzedenzfall oder adäquate Rechtsprechung konnte in diesem Kontext nicht gefunden werden. Trotz der Komplexität solcher Netzwerke könnte deren Abrechnung durch etablierte Messdienstleister erfolgen, die sich bereits heute zunehmend mit der komplexer werdenden Energieversorgung von Gebäuden und Liegenschaftskomplexen auseinandersetzen müssen.

2.6.2 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit von Prosumernetzen ist entscheidend für ihre erfolgreiche Implementierung und langfristige Rentabilität. Um die notwendigen Anfangsinvestitionen zu rechtfertigen und ein stabiles Betriebsmodell zu etablieren, sind neben den Investitionskosten auch die Betriebskosten sowie staatliche Förderungen und Anreize von Bedeutung. Im Rahmen des Projektes wurden in einer strukturierten Analyse unter ideellen Bedingungen die wichtigsten Kostentreiber „Investitionen“ und „Energiekosten“ analysiert, indem in einer Fallstudie exemplarisch ein konventionelles Netz einem Prosumernetz gegenübergestellt wurde. Die Untersuchungen wurden im Detail publiziert in der Masterarbeit „Planning, Dimensioning, and Economic Assessment of Bidirectional Thermal Networks with Prosumers“ [33] und im Paper „Dimensioning radial prosumer-based thermal networks“ [34]. Die wesentlichen Erkenntnisse sind folgende:

- Höhere Anfangsinvestitionen: Die Investitionskosten für PBNs sind aufgrund der komplexeren Infrastruktur, die mehr Aktoren und Regelkomponenten erfordert, etwa 17 % höher als für konventionelle Netzwerke. Auch die Betriebskosten sind etwa 25 % höher aufgrund des intensiveren Wartungsbedarfs und der höheren Anforderungen an die Steuerungstechnik.

- Sensitivitätsanalyse: PBNs reagieren weniger empfindlich auf Schwankungen des Zinssatzes im Vergleich zu CNs, da die Lebenszyklen der dezentralen Komponenten kürzer sind. Andererseits ist die Reaktion der PBNs auf die Länge des Netzes und die Energiekosten flexibler, was durch die Effizienzsteigerung und die Möglichkeit zur Nutzung von Abwärme kompensiert werden kann.
- Notwendigkeit zur Kostensenkung: Im Basisszenario müsste die PBN die nachfragebedingten Kosten um etwa 21 % senken, um wirtschaftlich konkurrenzfähig mit konventionellen Netzwerken zu sein. Erhöhte Energiepreise und mehr Volllaststunden könnten die wirtschaftliche Rentabilität der PBN jedoch begünstigen, indem die Effizienzpotenziale stärker ausgeschöpft werden.

Diese idealisierte wirtschaftliche Bewertung von PBNs zeigt, dass neben den technischen Herausforderungen auch die Kostenstruktur eine zentrale Rolle spielt. Insbesondere der höhere Anteil an dezentralen Akteuren und der Bedarf an intelligenter Steuerungstechnik erhöhen die Betriebskosten. Gleichzeitig bieten PBNs durch die Flexibilität und die Möglichkeit der Integration erneuerbarer Energien sowie von Abwärme langfristig ein großes Potenzial zur Effizienzsteigerung und Kostenreduktion.

Zukünftige Entwicklungen im Bereich der Energiepreise, die Verfügbarkeit von Förderungen sowie die Fortschritte bei den Steuerungsstrategien werden entscheidend für die Weiterentwicklung und den Erfolg von Prosumernetzen sein. Die Ergebnisse zeigen, dass politische Unterstützung und technologische Innovationen in diesen Bereichen einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und damit die Realisierbarkeit solcher Systeme haben können.

2.6.3 Marktsituation

Die energiewirtschaftliche Marktsituation befindet sich im Wandel, bedingt durch steigende Anforderungen an Nachhaltigkeit und Energieeffizienz, sowie der Bedarf digitaler Lösungen. Der progressiv vorangetriebene regulatorische Wandel führt zu neuen Herausforderungen und Unsicherheiten für energiewirtschaftliche Unternehmen. Viele Akteure stehen vor der Schwierigkeit, zahlreiche neue Technologien zu implementieren, was neben typischerweise hohen Investitionen, die Adaption an neue Arbeitsprozesse auch beispielsweise die damit einhergehende Ausbildung von Personal bedeutet. Damit verbunden sind aber auch erhöhte Risiken, was zu einem Trend führt, dass Investitionspotentiale durch bestehende oder rechtlich verankerte Innovationen als ausgeschöpft wahrgenommen werden.

Das zunehmende Bewusstsein für die Notwendigkeit fossile Brennstoffe zu reduzieren, treibt die Nachfrage nach alternativen Wärmeversorgungslösungen voran – wobei ein deutlicher Trend hin zu dezentralen Wärmepumpenlösungen und zentral betriebenen Wärmenetzen zu beobachten ist.

Im Zuge der jüngsten Gesetzesnovellierungen wurde im Rahmen der kurativen Steuerung durch den sogenannten „steuerbaren Netzanschluss“ die Rolle des Energiemanagement-Dienstleisters gesetzlich initiiert. Diese Regelung umfasst die Steuerung der Leistungsaufnahme und -abgabe am Hausanschluss, unabhängig davon, wie diese von Verbrauchern, Erzeugern, Speichern oder steuerbaren Verbrauchern anteilig entspringt. Der

Energiemanagement-Dienstleister übernimmt zudem eine zentrale Funktion in der präventiven Steuerung und Kostenoptimierung, indem er den Betrieb der Energieanlagen im Gebäude – also die Schnittstelle zwischen Versorger und Verbraucher – effizient steuert und optimiert.

Im Rahmen der Standortanalysen wurde festgestellt, dass gewerbliche Abwärme häufig ungenutzt der Umwelt zugeführt wird (Siehe beispielhaft Abbildung 68), was in spezifischen Fällen ein erhebliches ungenutztes Potential darstellt. Durch die Nutzung dieser Abwärme kann nicht nur die Energieeffizienz gesteigert, sondern vor allem auch die Brennstoffkosten erheblich gesenkt werden. An anderen Standorten sind teils bereits Wärmeleitungen vorhanden, was sich positiv auf die Minimierung der Investitionskosten auswirkt. Lokale, standortbezogene Sondereffekte, wie das Vorhandensein von gewerblicher Abwärme oder bereits erschlossene Wärmenetze, können somit die Wirtschaftlichkeit eines individuellen Projekts stark beeinflussen.



Abbildung 68: Abwärmefläche eines Spritzguss-Unternehmens im Mischgebiet

2.6.4 Markthemmnisse

Im Kontext der energiewirtschaftlichen Einordnung spielen Markthemmnisse eine wesentliche Rolle, da sie die Umsetzung und Weiterentwicklung innovativer Lösungen im Energiemarkt erschweren. Die Transformation des Marktes hin zu einer nachhaltigen und effizienten Energieversorgung wird durch verschiedene gesetzliche und strukturelle Hindernisse gebremst. Insbesondere veraltete oder unzureichend abgestimmte gesetzliche Regelungen erschweren

die effiziente Nutzung von Daten und Technologien und verhindern so die Optimierung von Energiesystemen und insbesondere Wärmenetzen. Diese regulatorischen Herausforderungen behindern die notwendige Flexibilität und sorgen für Unsicherheiten, die die Entwicklung alternativer innovativer Technologien hemmen.

Ein Beispiel für solch eine nicht optimale Gesetzgebung ist §6b der Heizkostenverordnung, der vorschreibt, dass Daten abrechnungsrelevanter Messgeräte aus Datenschutzgründen nur zur Abrechnung und Verbrauchsinformation genutzt werden dürfen – nicht aber zur Steuerung von Energieanlagen. Diese Einschränkung bedeutet, dass Anlagenbetreiber keine kostengünstigen präzisen Bedarfsdaten für die Steuerung von Anlagen – insb. Wärmenetzen - verwenden können, wodurch das Potenzial zur Energieeinsparung und zur effizienten Wärmenutzung eingeschränkt wird. Eine bedarfsorientierte Steuerung von Wärmenetzen ist damit nicht optimal möglich, was sich letztlich negativ auf die Betriebskosten und damit auf die Innovationsbereitschaft auswirkt.

Im Energiemarkt herrscht durch die Energiewende ein umfassender Umbruch, der sich in zahlreichen Gesetzesinitiativen und Normungsvorhaben widerspiegelt. Unternehmen stehen teils unter erheblichem Anpassungsdruck, so dass verfügbare Investitions- und Innovationspotenziale in vielen Bereichen bereits ausgeschöpft sind. Der bestehende Fachkräftemangel führt zur Notwendigkeit, die betriebliche Effizienz insbesondere durch Digitalisierung zu steigern. Diese Rahmenbedingungen schaffen eine gewisse Barriere für die Einführung neuer innovativer Technologien, da die wirtschaftlichen und personellen Ressourcen vieler Unternehmen bereits an ihre Grenzen stoßen.

2.6.5 Fazit

Das OSkit-Projekt hat verdeutlicht, dass bidirektionale Prosumer-Wärmenetz-Ausführungen ein erhebliches Potenzial zur Flexibilisierung und Effizienzsteigerung der Wärmeversorgung bieten. Die Untersuchungen im CoSES-Labor sowie die wirtschaftlichen Analysen haben jedoch auch gezeigt, dass erhebliche thermohydraulische, regelungstechnische und wirtschaftliche Herausforderungen bestehen, die für eine erfolgreiche Implementierung bewältigt werden müssen.

Die Implementierung und Regelung von Prosumer-Wärmenetzen erfordert eine ausgefeilte Steuerungsarchitektur, um die komplexen bidirektionalen Wärmeflüsse und die Synchronisation der dezentralen Akteure effizient zu managen. Die entwickelten und getesteten PID-Ansätze mit gewichteten Regelungsfunktionen zeigten sich wirksam, um nichtlineare Wechselwirkungen, wie Pump Blocking und Temperaturschwankungen, zu adressieren. Die zweistufige Regelarchitektur, die eine übergeordnete Management-Ebene und eine lokale Feldebene kombiniert, ermöglichte die optimale Nutzung der Synergieeffekte und Flexibilität der Netze. Dies bestätigt die technische Umsetzbarkeit der Systeme, insbesondere in kleineren Netzwerken mit 3–15 Teilnehmern.

Die wirtschaftlichen Betrachtungen zeigten, dass Prosumer-Wärmenetze initial höhere Investitions- und Betriebskosten verursachen, insbesondere durch die erforderliche Regelungs- und Messtechnik. Ihre Wirtschaftlichkeit hängt stark von Energiekosten, Netzlängen und Zinssätzen ab. Aktuell werden Prosumer-Wärmenetze jedoch nicht durch bestehende rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen begünstigt. Die derzeitigen Marktentwicklungen und Fördermechanismen sind eher auf konventionelle und zentralisierte

Wärmenetze ausgelegt, was die wirtschaftliche Realisierung und Skalierung von Prosumer-Wärmenetzen erschwert. Daher ist eine Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen und eine stärkere Förderung dezentraler Netzstrukturen notwendig, um solche innovativen Ansätze zu unterstützen.

Ein wichtiges Potenzial von Prosumer-Wärmenetzen liegt in ihrer Fähigkeit, das Stromnetz zu entlasten. Sie können thermische Speicher als träge Speichermedien für Überschussstrom nutzen, insbesondere bei hoher Stromproduktion aus erneuerbaren Quellen. Diese Eigenschaft macht sie zu einem möglichen wichtigen Baustein im Rahmen der Sektorkopplung, um erneuerbare Energien besser zu integrieren und die Netzstabilität zu gewährleisten. Auch wenn bisher keine signifikanten Einflüsse auf die Spannungshaltung durch Prosumer-Wärmenetze festgestellt wurden, zeigt ihre Nutzung als Flexibilitätsoption das Potenzial zur Optimierung des Gesamtsystems.

Obwohl Prosumer-Wärmenetze als spezifische Nischenlösung betrachtet werden, sind die Erkenntnisse aus diesem Projekt auch für andere Formen thermischer Netze von hoher Relevanz. Prosumer-Wärmenetze repräsentieren eine Extremform der Dezentralisierung. Die gewonnenen Erkenntnisse können jedoch auf Netzstrukturen mit geringerem Dezentralisierungsgrad übertragen werden, da die dezentrale Einspeisung in Wärmenetze im Zuge der Dekarbonisierung immer wichtiger wird. Die Transformation bestehender Netze wird vermehrt regenerative, verteilte Erzeugungsquellen integrieren müssen, da zentrale fossile Erzeuger ersetzt werden. Somit bieten die Ergebnisse wertvolle Hinweise zur Weiterentwicklung und Optimierung zukünftiger dezentraler Netzkonzepte, die auf flexiblen und effizienten Strukturen basieren.

Die Untersuchungen verdeutlichen, dass Prosumer-Wärmenetze unter spezifischen Rahmenbedingungen ein großes Potenzial besitzen, um zur Dekarbonisierung und Flexibilisierung der Wärmeversorgung beizutragen. Die gewonnenen Erkenntnisse sind von entscheidender Bedeutung, um innovative Netzformen zu entwickeln, die den Anforderungen an Klimaneutralität und Energieeffizienz gerecht werden. Sie liefern sowohl Forschern als auch Praktikern im Energiesektor wichtige Hinweise zur Überwindung technischer, wirtschaftlicher und regulatorischer Herausforderungen und legen eine solide Grundlage für die zukünftige Gestaltung nachhaltiger thermischer Netze.

2.7 Verwertung und Verbreitung

Zur Vernetzung mit der Fachöffentlichkeit wurde ein Auftaktworkshop mit internationaler Beteiligung abgehalten. Details sind im Abschnitt 5.5 beschrieben. Die Ergebnisse konnten in weiten Teilen bereits während der Projektlaufzeit in Form wissenschaftlicher Beiträge zu Journals und Konferenzen (siehe Abschnitt 5.1) veröffentlicht werden. Ebenso sind zwei Dissertationen aus diesem Projekt hervorgegangen (siehe Abschnitt 5.2). Die Ergebnisse wurden im Rahmen eines Abschlussevents vorgestellt und diskutiert (siehe Abschnitt 5.5).

Die Triowatt hat im Rahmen von Partnertagungen innerhalb der EAD-Gruppe und der bestehenden Entwicklungspartnerschaft das Projekt sowie dessen Einordnung in übergeordnete energiewirtschaftliche Entwicklungen und Trends vorgestellt und eingebunden. Darüber hinaus wurde das Projekt im Rahmen der Standortanalyse mit Interessierten aus Baugesellschaften und Privat-Investoren individuell diskutiert und kritisch hinterfragt.

2.8 Weiterführende Arbeiten

Aufbauend auf den erzielten Ergebnissen wird die TUM daran arbeiten, die entworfenen Modelle weiter zu nutzen, fortzuentwickeln und teilweise zusammenzuführen, bzw. in weitere Tools zu integrieren (ProHMo und ProsNet in Dymola und SimulationX).

Die gewonnenen Erkenntnisse aus diesem Projekt gehen in die universitäre Lehre ein. In den Vorlesungen „Grundlagen der Energiewirtschaft“ und „Energy Systems & Energy Economics“ werden neue Kapitel zu Prosumern und deren Beitrag zur Netzstabilität integriert.

Die Triowatt wird die gewonnenen Erkenntnisse in der Entwicklungspartnerschaft mit der EAD-Gruppe weiter ausbauen. Es zeigt sich der klare Trend, dass traditionelle Messdienste, ausgestattet mit der erforderlichen Technologie, ihre Messergebnisse nicht nur für Abrechnungszwecke nutzen können, sondern auch für die Steuerung und Optimierung der Energieeffizienz in Gebäuden gewinnbringend einsetzen sollten. In diesem Kontext – sowohl bei vernetzten als auch bei dezentral versorgten Immobilien – werden die Ergebnisse des Projektes weiterentwickelt und sollen in marktfähige Produkte überführt werden. Ziel ist es, insbesondere größere Immobilien als flexible Komponenten eines intelligenten, nachhaltigen Energiesystems zu etablieren.

Sowohl CoSES als auch Triowatt – ggf. auch zusammen - streben weiterführende, darauf aufbauende Forschungsprojekte an.

3 Verwendung der Zuwendung

3.1 TUM

Das bewilligte Budget von knapp 755.000 € wurde zu 90 % ausgeschöpft. Grund für die ggü. Der Planung geringeren Kosten waren im wesentlichen geringere Ausgaben für Gehälter, da eine Stelle für einen wissenschaftlichen Mitarbeiter längere Zeit nicht besetzt werden konnte. Die Gehälter für wissenschaftliche Mitarbeiter trugen zu 88% zu den Gesamtkosten bei, die für studentische Hilfskräfte zu 6%. Die Kosten für Softwarelizenzen und Wartungskosten für Simulationstools verursachten 2% der Projektkosten. Alle anderen Kostenpositionen lagen bei rund 1% oder darunter.

3.2 Triowatt

Insgesamt sind Projektkosten in Höhe von 434 367,25 € für Personal und 2 243,57 € für Material entstanden. Im Vergleich zum Antrag haben sich die Materialkosten zu Lasten der Personalkosten reduziert, da die eigentlich angedachte Controller-Hardware nicht wie vorgesehen eingesetzt werden konnte und so ein anderweitig kostenfrei gestelltes Gerät mit höherem Personaleinsatz aufgesetzt werden musste. 99,5 % der Kosten belaufen sich auf Personalkosten. Zum Berichtszeitpunkt wurden 64,6 % der Gesamtkosten, bzw. 90% der bewilligten Zuwendung ausbezahlt.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Angelehnt an das Pareto-Prinzip wird mit fortschreitender Energiewende die weitere Dekarbonisierung der Energiewirtschaft technologisch anspruchsvoller und bedarf weiterführender innovativer Lösungen. In diesem Kontext sind die gewonnenen Erkenntnisse von herausragender Bedeutung, denn sie geben klare Hinweise über mögliche Einsatzszenarien Prosumer-Wärmenetze. Darüber hinaus werden jedoch zahlreiche Grundlagen für weiterführende Teil-Dezentralisierung und Flexibilisierung von jeglichen Netzkonzepten erstellt.

Die im Projektplan des Antrags dargestellten Arbeiten waren notwendig um die dort gesetzten Ziele zu erreichen, was sich in den in Abschnitt 2 dargestellten Ergebnissen widerspiegelt. Ohne die Förderung wäre die Durchführung des Projekts nicht möglich gewesen.

Aus dem Projekt sind 15 Veröffentlichungen hervorgegangen, der Ingenieursnachwuchs konnte durch 15 studentische Arbeiten in das Projektgeschehen eingebunden werden (siehe unten). Über die Entwicklungspartnerschaft Triowatt - EAD-Gruppe wurden neben 4 beteiligten Ingenieuren auch einer der bedeutendsten Technologielieferanten für mittelständische Messdienste eng in die Projektarbeit mit eingebunden, und so der Wissenstransfer und Nutzen für mittelständische Messdienste gewährleistet. Es sind zwei Dissertationen entstanden, die den wissenschaftlichen Wert der geleisteten Arbeit unterstreichen. Dies geht über ein angemessenes Verhältnis zu den eingesetzten Mitteln hinaus.

5 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

5.1 Publikationen

Nachfolgend sind die aus dem Projekt hervorgegangenen Veröffentlichungen aufgeführt:

2021

- Sai Kiran Samboju, Vivek Tanjavooru, D. Zinsmeister, Vedran S Perić:
Modeling of Combined Heat and Power Generation Unit for Dynamic Analysis of Integrated Thermal-Electric Grids
Conference Paper, MSPES 21, 18.05.2021 – 21.05.2021
- Matthias Mayer, Anurag Mohapatra, Vedran S Perić:
IoT Integration for Combined Energy Systems at the CoSES Laboratory
Conference Paper, IEEE 7th World Forum on Internet of Things, 28.06.2021 – 01.07.2021
- Daniel Zinsmeister, Thomas Lickleder, Peter Tzscheuschler, Vedran S Perić:
A Comparison of Prosumer System Configurations in District Heating Networks
Conference Paper, 17th International Symposium on District Heating and Cooling, 06.09.2021 – 09.09.2021

2022

- Daniel Zinsmeister, Thomas Lickleder:
Characterization of a Combined Heat and Power Unit at the CoSES laboratory
Researchgate, <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.13461.19687> ; März 2021
- Daniel Zinsmeister, Vedran Perić:
Implementation of a Digital Twin of the CoSES District Heating Prosumer Laboratory
14th International Conference on Applied Energy; <https://doi.org/10.46855/energy-proceedings-10153>, 08. – 12. August 2022, Bochum / Online
- Thomas Lickleder, Daniel Zinsmeister, Vedran Peric.
A field-level control approach for bidirectional heat transfer stations in prosumer-based thermal networks: simulation and experimental evaluation
- 8th International Conference on Smart Energy Systems 13. – 14. September 2022, Aalborg

2023

- De la Cruz-Loredo, Iván; Zinsmeister, Daniel; Lickleder, Thomas; Ugalde-Loo, Carlos E.; Morales, Daniel A.; Bastida, Héctor; Perić, Vedran S.; Saleem, Arslan:
Experimental validation of a hybrid 1-D multi-node model of a hot water thermal energy storage tank
In Applied Energy, Volume 332; <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120556>; Februar 2023

- Daniel Zinsmeister, Thomas Lickleder, Stefan Adldinger, Franz Christange, Peter Tzscheuschler, Thomas Hamacher, Vedran S. Perić
A prosumer-based sector-coupled district heating and cooling laboratory architecture
In Smart Energy, Volume 9; <https://doi.org/10.1016/j.segy.2023.100095>; Februar 2023
- Fabian Speer, Thomas Lickleder, Daniel Zinsmeister, Vedran S. Perić
Dimensioning radial prosumer-based thermal networks
13. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien (IEWT 2023)
https://iewt2023.eeg.tuwien.ac.at/download/contribution/fullpaper/104/104_fullpaper_20230210_224423.pdf; Februar 2023
- Ulrich Ludolfinger, Daniel Zinsmeister, Vedran Perić, Thomas Hamacher, Sascha Hauke, Maren Martens
Recurrent Soft Actor Critic Reinforcement Learning for Demand Response Problems
IEEE PowerTech 2023; <https://doi.org/10.1109/PowerTech55446.2023.10202844>; Belgrad, 25. – 29. Juni 2023
- Orestis Angelidis, Daniel Zinsmeister, Anastasia Ioannou, Daniel Friedrich, Alan Thomson, Gioia Falcone:
5th Generation District Heating and Cooling Modelica Models for Prosumer Interaction Analysis
In Proceedings of the 15th International Modelica Conference 2023, Aachen, <https://doi.org/10.3384/ecp204607>, Oktober 2023

2024

- Thomas Lickleder, Daniel Zinsmeister, Lorenz Lukas, Fabian Speer, Thomas Hamacher, Vedran S. Perić:
Control of bidirectional prosumer substations in smart thermal grids: A weighted proportional-integral control approach
In Applied Energy, Volume 354, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122239>; Januar 2024
- Saltanat Kuntuarova, Thomas Lickleder, Thanh Huynh, Daniel Zinsmeister, Thomas Hamacher, Vedran Perić:
Design and simulation of district heating networks: A review of modeling approaches and tools
In Energy, Volume 305, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132189>; Oktober 2024
- Orestis Angelidis, Daniel Zinsmeister, Anastasia Ioannou, Daniel Friedrich, Alan Thomson, Ulrich Ganslmeier, Gioia Falcone:
Development and experimental validation of a hydraulic design and control philosophies for 5th generation district heating and cooling networks
In Energy, Volume 308, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132835>, November 2024
- Ulrich Ganslmeier, Lorenz Lukas, Thomas Hamacher, Thomas Lickleder:
Bidirectional Substation Control for Smart Thermal Grids: Experimental Evaluation of a Weighted Proportional-Integral Approach
Accepted for IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies

5.2 Dissertationen

- Daniel Zinsmeister, „*Prosumers in District Heating and Cooling: Design of a Simulation and Experiment Environment for Testing Control Strategies*“, kumulative Dissertation, mündliche Prüfung am 11.06.2024. [17]
- Thomas Lickleder, „*Technical Implementation and Operation of Prosumer-Based Smart District Heating Networks*“, kumulative Dissertation, mündliche Prüfung am 16.07.2024. [20]

5.3 Studentische Arbeiten

- Development of a Generalised Clearing Algorithm for a District Heating Market
Forschungspraxis, 2023; Betreuer: Daniel Zinsmeister
- Planning, Dimensioning, and Economic Assessment of Bidirectional Thermal Networks with Prosumers
Masterarbeit, 2023; Betreuer: Thomas Lickleder
- Formal stability analysis of a PID-based control system for bidirectional heat transfer station
Forschungspraxis, 2023; Betreuer: Thomas Lickleder
- Inbetriebnahme und Charakterisierung der Booster Wärmepumpe “WP Max-Grid HiQ F14” des Herstellers Ratiotherm im CoSES-Labor
Forschungspraxis, 2023; Betreuer: Daniel Zinsmeister
- Commissioning and Characterization of a Prototypical Bidirectional Heat Transfer Station
Bachelorarbeit, 2022; Betreuer: Thomas Lickleder
- Development of a Clearing Algorithm for a District Heating Market
Forschungspraxis, 2022; Betreuer: Daniel Zinsmeister
- Erweiterung des Optimierungstools “urbs” zur besseren Repräsentation von Wärmespeichern
Forschungspraxis, 2022; Betreuer: Daniel Zinsmeister
- Control of an Ambient Air Emulator for an Air Source Heat Pump
Bachelorarbeit, 2022; Betreuer: Daniel Zinsmeister
- Experimental Analysis of a Cold Prosumer in a District Cooling Network
Bachelorarbeit, 2022; Betreuer: Daniel Zinsmeister
- Validierung eines thermischen Speichermodells für den Einsatz in der Optimierung anhand von Messdaten
Seminararbeit, 2021; Betreuer: Daniel Zinsmeister
- Charakterisierung der Wärmeerzeuger im CoSES Labor
Ingenieurspraxis, 2021; Betreuer: Daniel Zinsmeister
- Improving the Dynamics of the District Heating Grid Emulator for the CoSES Laboratory
Bachelorarbeit, 2021; Betreuer: Daniel Zinsmeister
- Aufbau eines Prüfstands Luftwärmepumpe im CoSES Labor
Ingenieurspraxis, 2021; Betreuer: Daniel Zinsmeister
- Simulative analysis of different domestic hot water integration options
Forschungspraxis, 2021; Betreuer: Daniel Zinsmeister

- Putting into Service of a District Heating Grid Emulator for the CoSES Laboratory Masterarbeit, 2020; Betreuer: Daniel Zinsmeister
- Integration of CoSES Coupling Models in an Electric Power System Model Research Internship, 2023; Betreuer: Sebastian Eichhorn

5.4 Veröffentlichte Modelle

ProsNet: <https://github.com/thomaslicklederer/ProsNet>

Modelica-Bibliothek zur Modellierung von prosumerbasierten Wärmenetzen. Getestet mit der Dymola-Umgebung. Enthält auch den entwickelten PID-Regler mit gewichtender Fehlerfunktion und Simulationsmodelle zur Validierung.

ProHMo: https://gitlab.lrz.de/energy-management-technologies-public/coses_prohmo

ProHMo ist eine Bibliothek mit detaillierten Modellen des Heizungssystems von fünf Häusern, die mit Modelica in SimulationX erstellt wurden. Die Modelle repräsentieren das thermische System des Zentrums für kombinierte intelligente Energiesysteme (CoSES)-Labors an der TU München und sind durch Messungen aus dem Labor validiert. Die Bibliothek umfasst FMI-Modelle, die in andere Softwareumgebungen integriert werden können.

ProHMo als Benchmark Framework: <https://gitlab.lrz.de/energy-management-technologies-public/models-of-prohmo-benchmark-paper>

Modelle des ProHMo Benchmark Papers [31].

PBN_Dimensioning_Tool: https://github.com/FabianSpeer/PBN_Dimensioning_Tool

Dimensionierungstool in Excel für die Auslegung der Komponenten eines radialen prosumerbasierten Wärmenetzes basierend auf den maximalen Prosumerleistungen unter flexiblen Betriebszuständen des Netzes. Auslegung insbesondere der Rohrleitungen, Pumpen und Ventile.

StraTS-E: <https://gitlab.lrz.de/energy-management-technologies-public/strats-e>

StraTS-E ist ein Optimierungsmodell für den Einsatzplan von verteilten Energiesystemen mit verschiedenen Modellen für thermische Energiespeicher (TES). Die Struktur basiert auf urbs und ficus.

5.5 Öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen

OSkit wurde durch das Konsortium auf folgenden öffentlichkeitswirksamen Veranstaltungen vorgestellt, der aktuelle Stand des Forschungsprojektes wurde diskutiert und mit relevanten Stakeholdern vernetzt:

11th Energy Colloquium der Munich School of Engineering am 28./29. Juli 2021

Daniel Zinsmeister, Thomas Lickleder, Peter Tzscheuschler, Vedran S Perić:

OSkit – Optimized Sector Coupling in Districts through Intelligent Thermal Prosumer Networks

www.mse.tum.de/fileadmin/w00bvc/www/Veranstaltungen/Kolloquien/Kolloquium_2021/MSE_2021_BoA.pdf, S. 54

OSkit Auftakt Workshop (17.01.2022)

Im Rahmen der Auftaktveranstaltung mit 25 Teilnehmenden wurden neben der Vorstellung von OSkit und dem CoSES Labor insgesamt neun Vorträge, aufgeteilt in drei Blöcke präsentiert. Die Vorträge sind online verfügbar unter <https://syncandshare.lrz.de/getlink/fiPMkHzF7vQYAw6L4dTcYPyV>.

Zusammengefasst sind wichtigsten Erkenntnisse der Veranstaltung:

- Es existieren bereits erste bidirektionale Wärmeübergabestationen, Danfoss hat beispielsweise ein Produkt, welches Wärme aus der Kühlung von Supermärkten nutzen und bidirektional mit einem Wärmenetz austauschen kann.
- Die Verwendung von Prosumern in kleinen Wärmenetzen kristallisierte sich als Anwendungsfall heraus:
 - Erfahrungen der FFE zeigten, dass große Wärmenetzbetreiber die Einbindung von Prosumern mit Vorsicht betrachten, aus Bedenken um die Versorgungssicherheit und die Auslastung der Grundkraftwerke.
 - Der Business Case für prosumerbasierte Wärmenetze muss mit Bedacht gewählt werden.
 - Das Verhältnis zwischen Prosumern und reinen Verbrauchern wird eine wichtige Rolle spielen.
- Eine zentrale Versorgungseinheit wird zur Regelung und als Backup für die Versorgungssicherheit erforderlich sein (mathematisch betrachtet vielleicht nicht, in der Praxis vermutlich schon).
- Es gibt noch diverse offene Fragen in der Erforschung von Marktmechanismen zur Einbindung von Wärmeprosumern.
- Die Umsetzung in der Praxis birgt zahlreiche Herausforderungen:
 - Kommunikationsschnittstelle
 - Menschliche Einflussnahme, z.B. durch manuelles Deaktivieren einzelner Aktuatoren
 - Wärmeversorgung als kritisches System, dessen Ausfall nicht akzeptiert wird
 - Die Kommunikation erreicht schnell eine emotionale Ebene.

Konferenzen

Im Rahmen des Projektes wurden wissenschaftliche Erkenntnisse und zu gehörige Publikationen auf verschiedenen internationalen Konferenzen präsentiert und mit den anderen Teilnehmern diskutiert, um die Ergebnisse zu verbreiten, sowie Feedback und Input von anderen Wissenschaftlern aus dem Feld einzuholen. Teilgenommen wurde u.a. (teils mehrmals) an folgenden Konferenzen:

- Smart Energy Systems Conference⁷
- International Modelica Conference⁸
- District Heating and Cooling Conference⁹
- CISBAT Conference¹⁰
- Internationale Energiewirtschaftstagung¹¹
- Konferenz zur norddeutschen Wärmeforschung¹²

CoSES Retreat 2023 und 2024

Die alljährlichen CoSES-Retreats in der TUM Forschungsstation Berchtesgaden boten dem OSkit-Projektteam wertvolle Plattformen zur Präsentation und Diskussion der Projektergebnisse. Die intensiven interdisziplinären Sessions halfen dabei, technische und regelungstechnische Herausforderungen von Prosumer-Wärmenetzen zu adressieren und Lösungen aus den experimentellen Untersuchungen im CoSES-Labor zu validieren.

Das erhaltene Feedback und der Austausch mit Partnern und Experten trugen maßgeblich zur Optimierung der entwickelten Systeme bei. Zudem nutzte das Projektteam die Retreats zur Vernetzung und zur strategischen Planung, was die Integration der Erkenntnisse in zukünftige Forschungsaktivitäten sicherstellte und den Erfolg des Projekts weiter vorantrieb.

Abschlussevent

Im Rahmen eines Abschlussevents mit bis zu 20 Teilnehmenden wurden neben der Vorstellung von OSkit und dem CoSES Labor insgesamt neun Vorträge, aufgeteilt in drei Blöcke präsentiert und die Ergebnisse des Projektes diskutiert.

In Block 1 wurde die Projektidee eingeführt und das Konzept von Prosumern und Netzen erläutert. Der Fokus lag auf der Regelungsstruktur, die das Quartiersenergiemanagement und Gebäudeenergiemanagement inklusive Wärmespeicher und Machine-Learning Ansätzen abdeckt. Auf Feldebene werden unter anderem Booster-Wärmepumpen und ein PID-regeltes WÜ-System vorgestellt.

⁷ <https://smartenergysystems.eu/>

⁸ <https://2023.international.conference.modelica.org/>

⁹ <https://www.dhc2023.com.cn/>

¹⁰ <https://cisbat.epfl.ch/>

¹¹ <https://iewt2023.eeg.tuwien.ac.at/>

¹² <https://www.hawk.de/de/hochschule/fakultaeten-und-standorte/fakultaet-ressourcenmanagement/profil/nwf>

Block 2 behandelt Netzthemen, einschließlich Aufbau und Funktion von WÜ-Stationen und der Laborausstattungen wie den Stromnetz Emulator. Zudem wurden die experimentellen Versuche an Prosumersystemen und die Netzsimulationen erläutert.

In Block 3 wurden die analysierten Rückwirkungen auf das Stromsystem durch Sektorkopplung und Prosumerintegration präsentiert. Zudem wurde auf die wirtschaftlichen Aspekte, Regularien und die Marktsituation eingegangen. Abschließend wurde ein Gesamtfazit gezogen und ein Ausblick auf weiterführende Forschung gegeben.

6 References

- [1] Energiebunker Altona, *NEW 4.0*. [Online]. Available: <https://new4-0.erneuerbare-energien-hamburg.de/de/new-40-projekte/details/energiebunker-altona.html> (accessed: Jan. 24 2020).
- [2] Hamburg Energie, *Smart Heat Grid Hamburg*. [Online]. Available: <https://www.hamburgenergie.de/ueber-uns/unternehmen/forschungsprojekte/smart-heat-grid-hamburg> (accessed: Jan. 24 2020).
- [3] P. Lorenzen *et al.*, "Design of a Smart Thermal Grid in the Wilhelmsburg district of Hamburg: Challenges and approaches," *Energy Procedia*, vol. 149, pp. 499–508, 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.08.214.
- [4] HAW-Hamburg, *Competence Center für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz - Aktuelle Projekte*. [Online]. Available: <https://www.haw-hamburg.de/cc4e/c4dsi/projekte.html>
- [5] Klima-Log, *Flex-KWK in Oberhausen*. [Online]. Available: <http://www.klima-log.de/projekt.asp?InfoID=20552> (accessed: Jan. 24 2020).
- [6] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, *Wärmenetze 4.0*. [Online]. Available: http://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Waermenetze/waermenetze_node.html (accessed: Jan. 24 2020).
- [7] Enargus, *Durchführung einer Machbarkeitsstudie für die Realisierung eines Wärmenetzsystems der 4. Generation*. [Online]. Available: <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=w%c3%a4rmenetz&id=1201227&v=10>
- [8] Technische Universität Berlin, *Energienetz Berlin Adlershof*. [Online]. Available: <http://www.energienetz-berlin-adlershof.de/> (accessed: Jan. 24 2020).
- [9] O. Angelidis, D. Zinsmeister, A. Ioannou, D. Friedrich, A. Thomson, and G. Falcone, "5th Generation District Heating and Cooling Modelica Models for Prosumer Interaction Analysis," in *Proceedings of the 15th International Modelica Conference 2023, Aachen, October 9-11, 2023*, pp. 607–616.
- [10] O. Angelidis *et al.*, "Development and experimental validation of a hydraulic design and control philosophies for 5th generation district heating and cooling networks," *Energy*, vol. 308, p. 132835, 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.132835.
- [11] I. de La Cruz-Loredo *et al.*, "Experimental validation of a hybrid 1-D multi-node model of a hot water thermal energy storage tank," *Applied Energy*, vol. 332, p. 120556, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120556.
- [12] H. Lund *et al.*, "4th Generation District Heating (4GDH)," *Energy*, vol. 68, pp. 1–11, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089.
- [13] P. A. Østergaard *et al.*, "The four generations of district cooling - A categorization of the development in district cooling from origin to future prospect," *Energy*, vol. 253, p. 124098, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124098.
- [14] David Connolly *et al.*, "Smart Energy Systems: Holistic and Integrated Energy Systems for the era of 100% Renewable Energy," 2013. [Online]. Available: <https://vbn.aau.dk/en/publications/smart-energy-systems-holistic-and-integrated-energy-systems-for-t>
- [15] QM Fernwärme; Schweiz, *Planungshandbuch Fernwärme*, 1st ed. Ittigen, Bern: EnergieSchweiz Bundesamt für Energie, 2017.
- [16] S. Frederiksen and S. Werner, *District heating and cooling*. Lund: Studentlitteratur AB, 2013.

- [17] Daniel Zinsmeister, "Prosumers in District Heating and Cooling: Design of a Simulation and Experiment Environment for Testing Control Strategies," Dissertation, Technische Universität München, München, 2023.
- [18] T. Lickleder, D. Zinsmeister, L. Lukas, F. Speer, T. Hamacher, and V. S. Perić, "Control of bidirectional prosumer substations in smart thermal grids: A weighted proportional-integral control approach," *Applied Energy*, vol. 354, p. 122239, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122239.
- [19] D. Zinsmeister, T. Lickleder, F. Christange, P. Tzscheuschler, and V. S. Perić, "A comparison of prosumer system configurations in district heating networks," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 430–439, 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.08.085.
- [20] Thomas Lickleder, "Technical Implementation and Operation of Prosumer-Based Smart District Heating Networks," Dissertation, Technische Universität München, München, 2023.
- [21] T. Lickleder *et al.*, *A Digital Platform for Real-Time Multi-Energy Management in Districts Using Opc Ua: Conceptualization, Modeling, Software Implementation, and Laboratory Validation*, 2024.
- [22] T. Lickleder, T. Hamacher, M. Kramer, and V. S. Perić, "Thermohydraulic model of Smart Thermal Grids with bidirectional power flow between prosumers," *Energy*, vol. 230, p. 120825, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120825.
- [23] Daniel Zinsmeister, *StraTS-e*, 2024. [Online]. Available: <https://gitlab.lrz.de/energy-management-technologies-public/strats-e>
- [24] U. Ludolfinger, D. Zinsmeister, V. S. Perić, T. Hamacher, S. Hauke, and M. Martens, "Recurrent Soft Actor Critic Reinforcement Learning for Demand Response Problems," in *2023 IEEE Belgrade PowerTech*, Belgrade, Serbia, 2023, pp. 1–6.
- [25] Sarah Schmidt, "Formal stability analysis of a PID-based control system for bidirectional heat transfer stations," Forschungsbericht, Technische Universität München, München, 2023. [Online]. Available: <https://mediatum.ub.tum.de/1719249>
- [26] S. Kuntarova, T. Lickleder, T. Huynh, D. Zinsmeister, T. Hamacher, and V. Perić, "Design and simulation of district heating networks: A review of modeling approaches and tools," *Energy*, vol. 305, p. 132189, 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.132189.
- [27] T. Lickleder, J. Mayer, D. Bytschkow, V. Ahuir, D. Birkeneder, and A. Capone, "Multi-Energie Management und Aggregations-Plattform - MEMAP; Aggregationsplattform zur gebäudeübergreifenden Optimierung der Energieeffizienz : Schlussbericht : Berichtszeitraum: 01.06.2017 bis 30.09.2021," (in de), *Multi-Energie Management und Aggregations-Plattform - MEMAP; Aggregationsplattform zur gebäudeübergreifenden Optimierung der Energieeffizienz*, doi: 10.2314/KXP:1839282886.
- [28] I. Elizarov and T. Lickleder, "ProsNet – a Modelica library for prosumer-based heat networks: description and validation," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2042, no. 1, p. 12031, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2042/1/012031.
- [29] D. Zinsmeister and V. Peric, *Implementation of a Digital Twin of the CoSES District Heating Prosumer Laboratory*, 2022.
- [30] Daniel Zinsmeister and Orestis Angelidis, *CoSES_ProHMo*, 2023.
- [31] D. Zinsmeister, U. Ludolfinger, V. S. Perić, and C. Goebel, "A benchmarking framework for energy management systems with commercial hardware models," *Energy and Buildings*, vol. 321, p. 114648, 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114648.

- [32] D. Zinsmeister, P. Tzscheutschler, V. S. Perić, and C. Goebel, "Stratified thermal energy storage model with constant layer volume for predictive control — Formulation, comparison, and empirical validation," *Renewable Energy*, vol. 219, p. 119511, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.119511.
- [33] F. Speer, "Planning, Dimensioning, and Economic Assessment of Bidirectional Thermal Networks with Prosumers," Masterarbeit, Technische Universität München, 2023.
- [34] F. Speer, T. Lickleder, D. Zinsmeister, and V. Perić, "Dimensioning radial prosumer-based thermal networks," in *13. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien*. [Online]. Available: https://iewt2023.eeg.tuwien.ac.at/download/contribution/fullpaper/104/104_fullpaper_20230210_224423.pdf
- [35] T. Lickleder, D. Zinsmeister, I. Elizarov, V. Perić, and P. Tzscheutschler, "Characteristics and Challenges in Prosumer-Dominated Thermal Networks," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2042, no. 1, p. 12039, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2042/1/012039.
- [36] A. Mohapatra, T. Hamacher, and V. S. Peric, "PHIL Infrastructure in CoSES Microgrid Laboratory," in *2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, Novi Sad, Serbia, 2022, pp. 1–6.
- [37] D. Zinsmeister *et al.*, "A prosumer-based sector-coupled district heating and cooling laboratory architecture," *Smart Energy*, vol. 9, p. 100095, 2023, doi: 10.1016/j.segy.2023.100095.
- [38] Daniel Zinsmeister and Thomas Lickleder, "Characterization of a Combined Heat and Power Unit at the CoSES laboratory - Data," 2021.
- [39] Daniel Zinsmeister and Thomas Lickleder, "Characterization of a Thermal Storage at the CoSES laboratory," 2022.
- [40] B. Kumaran Nalini, Z. You, M. Zade, P. Tzscheutschler, and U. Wagner, "OpenTUMFlex: A flexibility quantification and pricing mechanism for prosumer participation in local flexibility markets," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 143, p. 108382, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108382.
- [41] J. Gasser, H. Cai, S. Karagiannopoulos, P. Heer, and G. Hug, "Predictive energy management of residential buildings while self-reporting flexibility envelope," *Applied Energy*, vol. 288, p. 116653, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116653.
- [42] S. Meinecke *et al.*, "SimBench—A Benchmark Dataset of Electric Power Systems to Compare Innovative Solutions Based on Power Flow Analysis," *Energies*, vol. 13, no. 12, p. 3290, 2020, doi: 10.3390/en13123290.
- [43] H. Cui, F. Li, and K. Tomsovic, "Hybrid Symbolic-Numeric Framework for Power System Modeling and Analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 2, pp. 1373–1384, 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3017019.

Erklärung zur Verwendung von Generativer KI und KI-gestützten Technologien im Schreibprozess

Während der Erstellung dieser Arbeit haben die Autoren ChatGPT von OpenAI und den DeepL Übersetzer von DeepL SE verwendet, um die Sprache und Lesbarkeit zu verbessern. Nach der Nutzung dieser Tools/Dienste haben die Autoren den Inhalt überprüft und bei Bedarf bearbeitet und übernehmen die volle Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung.