

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

30.11.2023

Projekttitlel: Heat water storage pooling – Heat Pool

Projektnummer:871699

Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

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

Ausschreibung	5. Ausschreibung Energieforschung
Projektstart	01/09/2019
Projektende	31/08/2023
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	48 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Forschung Burgenland GmbH
AnsprechpartnerIn	Patricia Jasek
Postadresse	Campus 1, 7000 Eisenstadt
Telefon	+43 5/7705 - 5486
Fax	+43 3357 45370 1011
E-mail	patricia.jasek@forschung-burgenland.at
Website	www.forschung-burgenland.at

Heat Water Storage Pooling

HeatPool

AutorInnen:

Forschung Burgenland GmbH

Patricia Jasek

Markus Puchegger

Markus Schindler

4ward Energy Research GmbH

Thomas Nacht

Johanna Ganglbauer

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
2.1	Hintergrund	5
2.2	Aufgabenstellung	6
2.3	Schwerpunkte des Projektes	7
2.4	Einordnung in das Programm	8
2.5	Verwendete Methoden	8
2.6	Aufbau der Arbeit	9
3	Inhaltliche Darstellung	10
3.1	Stakeholdereinbindung	10
3.2	Grundlegende Recherchen und Untersuchungen	11
3.3	Entwicklung der grundlegenden Methoden und Algorithmen zur Steuerung der Flexibilitäten ..	11
3.3.1	Methoden zur Definition der freien Speicherkapazitäten für die Levels L ₂ und L ₃	11
3.3.2	Methode für die Prognose der Speichertemperatur	12
3.3.3	Methoden für das Level L ₁	13
3.4	Zusammenführung zu einem funktionierenden Gesamtsystem	14
3.4.1	Übergeordnete Strategie	14
3.4.2	Aufbau des Demonstrators	15
3.5	Demonstrationsphase	16
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	19
4.1	Stakeholdereinbindung	19
4.2	Grundlegenden Recherchen und Untersuchungen	22
4.2.1	Level L ₃	24
4.3	Entwicklung der grundlegenden Methoden und Algorithmen zur Steuerung der Flexibilitäten ..	25
4.3.1	Bewertung der Methoden für die Abschätzung der Speicherkapazitäten	25
4.3.2	Bewertung der Methoden für die Prognose der Speichertemperatur	25
4.3.3	Bewertung der entwickelten Methoden für den Level L ₁	26
4.4	Zusammenführung zu einem funktionierenden System	32
4.4.1	Übergeordnete Strategie	32
4.4.2	Vorbereitung des Demonstrators	35
4.5	Demonstrationsphase	40
5	Ausblick und Empfehlungen	45
6	Literaturverzeichnis	46
7	Anhang	Fehler! Textmarke nicht definiert.
8	Kontaktdaten	48

2 Einleitung

Das Forschungsprojekt *Heat Water Storage Pooling (HeatPool)* beschäftigte sich mit Erforschung und Erprobung des Einsatzes verteilter Flexibilitäten durch Wärmespeicher unterschiedlicher Größen. Diese werden im Kontext des Projektes als Levels bezeichnet. Level 1 (L₁) beschreibt dabei die Flexibilität des Nah- und Fernwärmenetzes, Level 2 (L₂) beschreibt Flexibilitäten in Mehrparteienwohnhäusern und Level 3 (L₃) die Flexibilitäten in Einfamilienhäusern.

2.1 Hintergrund

Der Energieversorger Burgenland Energie AG ist einer der größten Betreiber von Windkraftanlagen in Österreich und treibt damit die Energiewende in Österreich maßgeblich voran. Zum Zeitpunkt der Einreichung des Projektes verfügte die Energie Burgenland AG über 225 MW an installierter Windkraft, die auf dem liberalisierten Markt ohne Tarifförderung gehandelt wurden. Beim Handel mit volatilen Energieerzeugern kommt es stets zu Abweichungen zwischen den gehandelten Mengen und der tatsächlichen Erzeugung. Diese Energie wird auch als Ausgleichsenergie schlagend. Abbildung 1 zeigt die Abweichungen durch Prognosefehler, die während des Projekts Windvermarktung [1] aufgezeichnet wurden. Ausgleichsenergie kann zu erheblichen Kosten für den Betreiber bzw. die Betreiberin der Erzeugungsanlagen führen und wird mit einem steigenden Anteil erneuerbarer Energieträger im Gesamterzeugungsmix zunehmen an Relevanz gewinnen. Da Ausgleichsenergie aufgrund der Struktur der Regelergiekraftwerke in der Regel einen deutlich höheren CO₂-Fußabdruck pro MWh als der Strommix hat, ist es auch aus ökologischer Sicht wichtig, diesen Bedarf zu reduzieren.

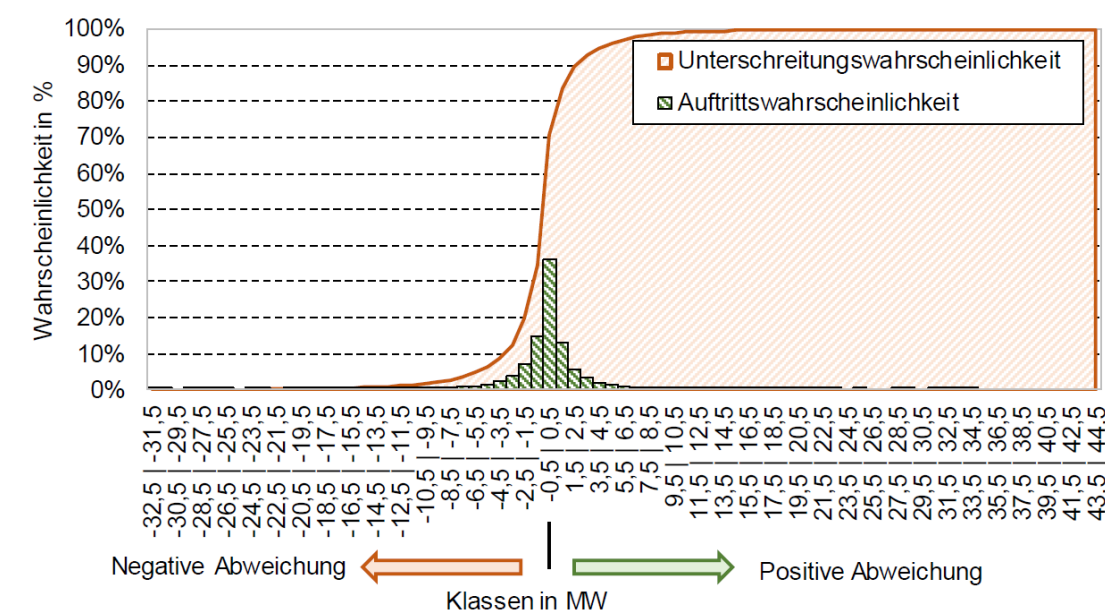


Abbildung 1: Ausgleichsenergie der Windkraftanlagen der Burgenland Energie [1]

Des Weiteren stellt die geographischen Clusterbildung von Windparks im nördlichen Teil des Burgenlandes eine Herausforderung dar, da die Erzeugung einen hohen Grad an Gleichzeitigkeit aufweist, was zu zwei wesentlichen Nachteilen führt. Der erste ist technischer Art, da die lokale Erzeugung oft die lokale Nachfrage übersteigt, was zu Belastungen des Übertragungsnetzes führen kann. Der zweite

Nachteil tritt auf den liberalisierten Märkten auf, wo hohe RES-Anteile zu niedrigen Preisen führen und sogar negative Marktpreise bewirken können [2], was zu einem unrentablen Betrieb von Windkraftanlagen führen kann bzw. wird.

Flexibilitäten wird ein großes Potenzial zur Bewältigung der aktuellen Herausforderungen im Energiesystem zugesprochen [3], so auch für diese Problemstellungen. Die Nutzung von Flexibilitäten im bestehenden Energiesystem muss allen Beteiligten, sowohl jenen die Flexibilität bieten als auch jenen, die sie nutzen, einen Vorteil bieten. Bestehende Tarif- und Geschäftsmodelle für Energie und Netze ermöglichen es nur sehr unzureichend, gepoolte Flexibilitäten mit kleiner und mittlerer Kapazität zu nutzen. Während große Leistungs- und Energieflexibilitäten direkt auf dem Regel- und Ausgleichsenergiemarkt sowie im Stromgroßhandel genutzt werden können, stehen in einigen Bereichen für kleinere Leistungen begrenzte Umsatzszenarien zur Verfügung (Senkung der leistungsbezogenen Netzentgelte für mittlere Verbraucher, Optimierung des Eigenverbrauchs aus dezentralen Erzeugungsanlagen insbesondere PV-Anlagen).

Aus diesem Grund und mangels Verfügbarkeit von Messdaten über die verfügbaren Kapazitäten bleibt die große Anzahl an Flexibilitäten im kleinen Leistungsbereich, die theoretisch genutzt werden könnten, in der Praxis ungenutzt. Dieser Situation möchte sich *HeatPool* annehmen und Anwendungsfälle für kleiner skalierte Flexibilitäten finden. Dabei ist ein breites Spektrum an Stakeholdern wie Versorgungsunternehmen, Stromnetzbetreibern und Stromnetzbetreiberinnen, Wärmenetzbetreiber und Wärmenetzbetreiberinnen, Betreiber und Betreiberinnen von Mehrparteienhäusern, Endkunden und Endkundinnen und deren jeweilige Ziele einzubeziehen. Wenn es um kleine und mittlere Flexibilitätskapazitäten geht, gibt es eine Verlagerung von hauptsächlich technischen Aspekten zu technosozioökonomischen Parametern. Die Nutzer und Nutzerinnen der Flexibilität rücken ins Rampenlicht. Es ist eine herausfordernde Aufgabe, die Nutzer und Nutzerinnen in den Energiewendeprozess einzubinden, was menschenzentrierte Design- oder Co-Gestaltungs-Prozesse besonders für Innovationen auf dem Energiemarkt benötigt

2.2 Aufgabenstellung

Das Hauptziel von *HeatPool* war die Untersuchung und Demonstration eines Ansatzes zur Linderung der Probleme, die sich aus der Volatilität/Unsicherheit der Stromerzeugung mittels Windkraft ergeben. Ziel war es, einen integrierten und ganzheitlichen Pooling-Ansatz für bestehende Wärmespeicher in verschiedenen Größen- und Anwendungsbereichen zu demonstrieren. In diesem Projekt, welches mit der Vorzeigeregion „Green Energy Lab“[4] assoziiert war, wurden diese Speicher aufgerüstet, um sie zur Optimierung des Energiesystems durch Kombination zu einer großen virtuellen Speichereinheit zu vereinigen.

Wie in Abbildung 2 ersichtlich, wurden vier Hauptaspekte auf allen drei Levels von Wärmespeichergrößen untersucht, um dieses Ziel zu erreichen:

(1) P2H-Anwendung:

Im Rahmen des Projekts sollte für jede Anwendung abhängig von der eingesetzten Wärmeeinwendung Heizstäben/Elektrodenkessel oder Wärmepumpen eine passende Strategie entwickelt werden.

(2) Stromquelle:

Eine weiteres Merkmal lag in der Unterscheidung des Zugangs zur erneuerbaren Stromquelle. Je nach Situation wurden sollten drei Optionen untersucht: Transport über das öffentliche Netz, direkte Verbindungsleitungen oder eine direkte Nutzung vor Ort.

(3) Kommunikation:

Abhängig von den Voraussetzungen sollte eine bidirektionale Kommunikation eingesetzt werden, während für die kleineren Speicher eine vereinfachte Form der Kommunikation angedacht wurde. Die beste technische und wirtschaftliche Kombination sollte dabei ermittelt werden.

(4) Anwendungsgebiet:

Es war zu berücksichtigen, ob die Flexibilität auf regionaler oder nationaler Ebene zur Verfügung stand.

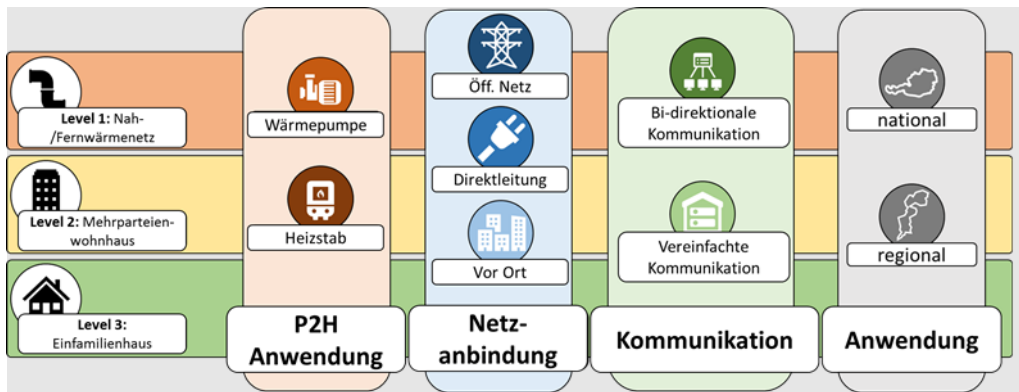


Abbildung 2: Adressierte Speichersituationen innerhalb des Projekts, um nationale und regionale Vorteile für das Energiesystem zu erzielen

2.3 Schwerpunkte des Projektes

Das Projekt *HeatPool* hatte die folgenden Schwerpunkte im Fokus:

- **Recherche der technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen** für den Einsatz von Flexibilitäten.
- **Erweiterung der Funktion der Energieleitwarte** der Burgenland Energie AG zur Einbindung von Flexibilitäten unterschiedlicher Größen-Levels
- Ausarbeitung von **Methoden und Algorithmen zur Beschaffung von Daten der Flexibilitäten**
- Erhebung und Validierung der **Anforderungen der Nutzer und Nutzerinnen der Flexibilitäten**
- **Etablierung einer funktionierenden Kommunikationsinfrastruktur** für den Datenaustausch zwischen dem Virtuellen Kraftwerk (VK) in der Windleitwarte und den dezentralen Wärmeflexibilitäten.
- **Entwicklung und Erprobung einer Pooling-Strategie**, welche für die Auswahl der zu steuernden Flexibilitäten verantwortlich ist.
- **Entwicklung geeigneter Geschäftsmodelle**, die den wirtschaftlichen Betrieb der Flexibilitäten für alle beteiligten Stakeholder ermöglicht.

2.4 Einordnung in das Programm

Das Forschungsprojekt *HeatPool* wurde bei der 5. Ausschreibung des Energieforschungsprogramms eingereicht. Das Projekt wurde als eine *Experimentelle Entwicklung* umgesetzt und ist dem Themenschwerpunkt 2 „Energiesysteme und Netze“ zuzuordnen.

Das Projekt orientiert sich an den Themen der Ausschreibung:

- *die gezielte (Weiter-)Entwicklung von Technologien und Komponenten sowie deren Systemintegration*
- *Innovationen im Sinne des gesellschaftlichen Nutzens einerseits durch die stärkere Berücksichtigung des Faktor Mensch als Anwender, Nutzer und Teil des Energiesystems und andererseits durch die Nutzung der Innovationskraft von Unternehmen, Forschungseinrichtungen sowie Bürgern im Sinne der gesellschaftlichen Ziele;*

Außerdem wurde das Projekt entwickelt, um die folgenden Ausschreibungsziele zu unterstützen:

- **Ziel 1: Grand Challenges:**
Energieforschung im Zentrum großer gesellschaftlicher Herausforderungen - Forschung, Technologieentwicklung und Innovation können maßgeblich zur Lösung der aktuellen großen gesellschaftlichen Herausforderungen beitragen: Klimaschutz und Ressourceneffizienz, wirtschaftliche Entwicklung und Wohlstand, sozialer Zusammenhalt, Sicherheit, Gesundheit und demografischer Wandel.
- **Ziel 3: Energieforschung und Innovation als Beschäftigungsmotor für den Standort Österreich:**
Eine erfolgreiche Standortentwicklung und die Erhöhung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit sind wichtige Ziele für die Wirtschaftsperspektive Österreichs.

2.5 Verwendete Methoden

Im Projekt kam durch die Kombination aus sozialwissenschaftlicher und technischer Expertise eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden zum Einsatz.

- Co-Creation Design (Bilaterale Abstimmungen, Workshops, Einzelgespräche, Umfragen)
- System- und Businessmodelldesign für die Bereitstellung der Flexibilitäten und zur Anreizschaffung bei Bereitstellern und Bereitstellerinnen sowie den Nutzern und Nutzerinnen der Flexibilitäten
- Recherchen hinsichtlich der Technologien der Flexibilitätsbereitstellungen der Möglichkeiten zur Steuerung und Anbindung dieser Flexibilitäten.
- Recherche von Datenaustauschprotokollen und Funktionen
- Erstellung von (Optimierungs-)Modellen für die Simulation und Bewertung des Flexibilitätseinsatzes
- Entwicklung von Regelungsalgorithmen zur Steuerung von Flexibilitäten
- Durchführung von Simulationen zur Bewertung der entwickelten Modelle und Algorithmen
- Erprobung der Regelungsalgorithmen in Testanwendungen unter Verwendung echter Messdaten
- Proof of Concept mittels der Einbindung echter Anlagen

2.6 Aufbau der Arbeit

Für die Erreichung der Projektziele wurde das Projekt in mehrere Phasen untergliedert, in denen sich auch die im Förderantrag definierten Arbeitspakete wiederfinden.

Begonnen wurde das Projekt mit **grundlegenden Recherchen und Untersuchungen**, die als Basis für die weiteren Entwicklungen herangezogen wurden. Diese erste Phase umfasste das Arbeitspaket 2 „Requirements Engineering“.

In der zweiten Projektphase wurde der Fokus auf die **Entwicklung der grundlegenden Methoden und Algorithmen zur Steuerung der Flexibilitäten** auf den unterschiedlichen Levels gerichtet. Hierbei wurden parallel zwei Arbeitspakete durchgeführt. In Arbeitspaket 3: „Konzeptentwicklung kleine Wärmespeichereinheiten“ wurden die „mittleren und kleinen“ Flexibilitäten (Level L₂ und L₃) adressiert. Hierfür wurde ein Algorithmus zur non- bzw. minimalinvasiven Abschätzung der verfügbaren Speicherkapazitäten in Python entwickelt, der über die entsprechenden Schnittstellen die Daten von Warmwasserspeichern auslesen und verarbeiten kann. Parallel dazu wurde in Arbeitspaket 4: „Konzeptentwicklung große Wärmespeichereinheiten“ das Thema der „großen“ Flexibilitäten (Level L₁) adressiert.

In der nächsten Projektphase wurde die **Erprobung des System und der Einzelkomponenten** durchgeführt und damit ein „Proof of Concept“ ermöglicht. Diese Phase beinhaltete das Arbeitspaket 5: „Optimierung des Zusammenspiels von Wärmespeichern und Energienetzen“ in dem die die einzelnen in Phase Zwei entwickelten Komponenten zusammengeführt und getestet wurden.

Abschließend wurde in der **Demonstrationsphase** bestmöglich versucht, die entwickelten Komponenten in einem „Proof of Concept“ zu erproben. Diese Phase ist dem Arbeitspaket 6: „Testphase und kontinuierliches Monitoring“ zuzuordnen.

Das gesamte Forschungsprojekt wurde von Maßnahmen einer **Nutzer- und Nutzerinnenbeteiligung** begleitet, um nicht nur auf technische und wirtschaftliche, sondern auch auf soziale Aspekte eingehen zu können. Die Arbeiten waren in erster Linie dem Arbeitspaket 2 „Requirements Engineering“ zuzuordnen. Sämtliche Projektphasen wurden von dem Arbeitspaket 1: „Projektmanagement“ sowie dem Arbeitspaket 7: „Begleitforschung und Dissemination“ begleitet.

3 Inhaltliche Darstellung

Die inhaltliche Darstellung behandelt die angewandten und entwickelten Methoden im *HeatPool*-Projekt und ist nach den unterschiedlichen Projektphasen gegliedert.

3.1 Stakeholdereinbindung

Für das Projekt *Heat-Pool* spielten Stakeholder eine entscheidende Rolle, da sie maßgeblichen Input für die zu entwickelnden Lösungen bereitstellten. Die Stakeholder wurden in die folgenden Gruppen unterteilt:

- **Bereitsteller und Bereitstellerinnen von Flexibilität:** Betreiber und Betreiberinnen von Fernwärmenetzen, Bewohner und Bewohnerinnen von Mehrparteien- und Einfamilienwohnhäusern.
- **Bedarfsträger und Bedarfsträgerinnen von Flexibilität:** Energieversorgungsunternehmen und Netzbetreiber und Netzbetreiberinnen
- **Technologieträger und Technologieträgerinnen** der Technologien Wärmespeicher, Wärmeerzeuger sowie Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) und virtueller Kraftwerke (VK)

Für die Einbindung der Stakeholder wurden mehrere Maßnahmen gesetzt. In einem ersten Schritt wurde die **Anforderungsanalyse mit Vertretern und Vertreterinnen aller Stakeholdergruppen** im Zuge eines Workshops durchgeführt.

Anschließend wurde eine **quantitative Umfrage mit den Bereitstellern und Bereitstellerinnen der Flexibilitäten auf Level L₃** durchgeführt, bei der 173 Personen teilgenommen haben. Es wurde die Motivation und Rahmenbedingungen für die Bereitstellung der Flexibilität abgefragt.

In einer weiteren Befragung wurden mit Anbietern und Anbieterinnen von Flexibilitäten eine **Umfrage zum Verständnis von Energiedatenvisualisierungen** durchgeführt. Für das Experiment wurden Probanden und Probandinnen über verschiedenste Kanäle sozialer Medien mittels Snowball-Sampling [5] rekrutiert. Die Probanden und Probandinnen wurden zufällig einer von drei Gruppen (A, B oder C) zugeteilt, wobei jeder Gruppe ein anderer Visualisierungstyp präsentiert wurde (Linien-, Säulen- oder Windrosendiagramm). Innerhalb der Gruppen wurden drei unterschiedliche Ebenen der Informationsdichte (1. Stromverbrauch, 2. Stromverbrauch und -erzeugung, 3. Stromverbrauch und Stromerzeugung und Netzeinspeisung) behandelt. Es nahmen 538 Probanden und Probandinnen an der Umfrage Teil.

Ebenso wurden die Bereitsteller und Bereitstellerinnen von Flexibilitäten auf Level L₁ im Rahmen eines **Online-Workshops zur Definition der Geschäftsmodelle für Fernwärmenetze** eingebunden. Die Business Model Canvas Methode [6] wurde als Instrument zur Geschäftsmodellentwicklung verwendet. Durch die Moderation der Forschung Burgenland und die Nutzung der Online-Plattform Miro fand der Prozess online statt.

3.2 Grundlegende Recherchen und Untersuchungen

Für die Definition der Flexibilitäten, die für das *HeatPool-System* zur Verfügung stehen, war es notwendig zuerst die technischen Rahmenbedingungen der Flexibilitäten auf den einzelnen in das System eingebundenen Levels L_1 bis L_3 zu erheben. Außerdem war es notwendig zu erheben, wodurch der Flexibilitätsbedarf im Detail entsteht. Dafür wurde eine **umfassende Recherche der technischen Gegebenheiten** durchgeführt.

3.3 Entwicklung der grundlegenden Methoden und Algorithmen zur Steuerung der Flexibilitäten

Die Recherche der technischen Gegebenheiten ergab einen **Bedarf an Modellen für die Definition der freien Speicherkapazitäten** auf den Levels L_2 und L_3 sowie einen Bedarf für die Entwicklung entsprechender Prognosemodelle für die Speicherkapazitäten. Außerdem wurde für Fernwärmenetze (Level L_1) ein **Prognose- und Optimierungsbedarf** festgestellt. Die dafür notwendigen Modelle und Tools wurden in Python programmiert.

3.3.1 Methoden zur Definition der freien Speicherkapazitäten für die Levels L_2 und L_3

Der Abruf der Flexibilitäten im *HeatPool-System* setzte voraus, dass Informationen über die aktuellen Speicherkapazitäten im System verfügbar sind. Dafür war es notwendig Methoden zur Ermittlung der freien Kapazitäten zu erarbeiten.

Konventionelle Boiler

Konventionelle Boiler sind in erster Linie für das Level L_3 von Relevanz. Die Bestimmung der Speichertemperatur stellte eine große Herausforderung dar, da ein direkter Eingriff in die Boiler nicht möglich war. Es war notwendig einen Algorithmus zu entwickeln, der nicht in die 2-Punkt-Regelung des Boilers eingreift und anhand einer Messung an der Frischwasserzufuhr erfolgt.

Die Temperatur an der Frischwassersäule ändert sich bei jeder Warmwasserentnahme abrupt und nähert sich nach Beendigung der Entnahme wieder der Umgebungstemperatur an. Ein beispielhaft gemessener Temperaturverlauf ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Information über den Volumenstrom ist zusätzlich erforderlich, um den Energiebedarf der Speicherladung zu ermitteln. Die Fläche unter dem Temperaturverlauf kann theoretisch die entnommene Warmwassermenge repräsentieren, wenn ein konstanter Volumenstrom angenommen wird. Die genaue Detektion erfordert eine gut positionierte, zur Umgebung nicht-isolierte zum Boiler hin jedoch gut-isolierte Messstelle und Berücksichtigung überlappender Entnahmevorgänge. Die in Abbildung 3 dargestellte Messung zeigt, dass der Messsensor zu nah am Boiler positioniert war, da es zu einer Beeinflussung des Temperatursensor während des Aufheizvorgangs des Boilers kam.

Aus der ermittelten entnommenen Warmwassermenge konnte auf die Speicherladung rückgeschlossen werden, sofern zum Startzeitpunkt der Messung die Speicherladung bekannt war. Für die Messung und Datenübertragung wurden Messgeräte des Unternehmens Shelly Cloud [7] genutzt. Der Einsatz des Messprinzips erforderte eine Kalibrierung des Systems, das in erster Linie dazu diente, den Multi-

plikationsfaktor A_i der Integrationsflächen aus Abbildung 3 zu definieren. Nach dem Einbau des Messsystems wurde das System für eine gewisse Kalibrierungszeit, deren Dauer die Qualität der Ergebnisse bestimmte, betrieben. Mittels Strommessklammern konnte der vom System bezogene Strom während der Kalibrierungszeit gemessen und unter Berücksichtigung der Verluste des Speichers die zugeführte thermische Energie in den Speicher ermittelt werden.

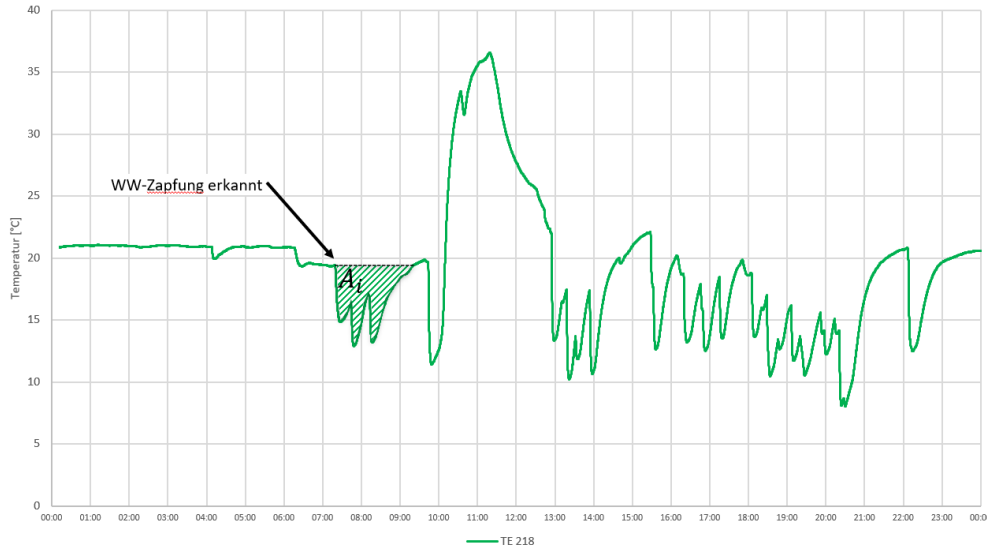


Abbildung 3: Messung der Frischwassertemperatur

Wärmepumpensysteme

Bei den Wärmespeichern auf Level L_2 wurden ausschließlich Wärmepumpensysteme berücksichtigt, die für einen Test vorgesehenen Heizhäuser in Mehrparteienwohnhäuser verfügten zum großen Teil über Smart Grid Ready (SG-Ready) Schnittstellen und darüber hinaus auch über eine parallele Messinfrastruktur, die durch den Projektpartner Burgenland Energie betrieben wurde. Aufgrund des komplexeren Aufbaus von Heizsystemen mit Wärmepumpen und der besseren Verfügbarkeit von Messdaten, sowie der Verfügbarkeit der SG-Ready Schnittstelle, stellt sich die Abschätzung der Speicherkapazität einfacher dar. Über die SG-Ready Schnittstelle lassen sich 4 Schaltzustände einstellen, wobei zwei Schaltzustände (Zustand 3 und 4) eine „Überladung“ des Speichers ermöglichen. Zur Bewertung der Speicherkapazität sieht das entwickelte Modell vor, dass der Unterschied der notwendigen Energiemenge für den normalen Betrieb (Zustand 2) und für die beiden Betriebszustände der Überladung die minimale freie Kapazität für das *HeatPool*-System festlegt. Dabei muss noch zwischen der Kapazität für Raumwärme und für Warmwasser unterschieden werden. Die Kombination der beiden ergibt die minimale freie Gesamtkapazität. Die aktuelle Speicherladung kann aus den Echtzeitdaten der nachgerüsteten Messinfrastruktur, so diese vorhanden ist, ermittelt werden. Die Speicherladung im Betriebszustand 3 oder 4 kann durch die hinterlegten Parameter bei der Definition der einzelnen Betriebszustände berechnet werden.

3.3.2 Methode für die Prognose der Speichertemperatur

Für die Prognose der Speichertemperatur kam ein autoregressiver Ansatz mit exogenen Einflussfaktoren (NARX-Modell), mit nicht-linearen Zusammenhang zwischen vergangenen Eingängen, vergangenen Ausgängen und dem prädictierten Ausgang zum Einsatz. Neben den kalendarischen

Einflussgrößen „Tag der Woche“ und „Stunde des Tages“ werden für die Vorhersage eine Erklärung der Amplitude in einem Zeitraum des Aufheizens sowie ein autoregressiver Teil des Modells herangezogen. Dieser prognostiziert die Speichertemperatur zu einem gewissen Zeitpunkt (t), indem frühere Werte in der Reihe bis zu den vergangenen 5 Stunden berücksichtigt werden.

Dabei spielte auch die Wärmelastprognose eine wesentliche Rolle, zur Anwendung kam anschließend ein neuronales Netz, das als vorwärts gerichtetes, vollständig verbundenes Perzeptron mit einer Eingangsschicht, einer Ausgangsschicht und einem Hidden-Layer realisiert wurde. Als Aktivierungsfunktion der Neuronen kommt in der Eingangs- und der Zwischenschicht die Rectified Linear Unit (ReLU) Funktion zum Einsatz. Die Ausgangsschicht verwendet die Sigmoidfunktion als Aktivierungsfunktion. Die Anpassung der Gewichte der einzelnen Neuronen erfolgt mittels Adam-Optimierungsalgorithmus [8]. Die Ausgangsschicht des KNN (k-nearest-neighbour-Algorithmus) liefert die Stundenwerte der Wärmelastprognose für die nächsten 24 Stunden durch eine Multi-step-Ahead-Prädiktion.

Validiert wurde das Model mittels Aufzeichnungen von Temperaturinformationen (gemessen innerhalb des Boilers) eines Haushaltes mit Eigenverbrauchsoptimierung der PV-Anlage. Die Daten wurden von 12.4.2021 bis 27.04.2021 erhoben. Messungen wurden alle 5 Minuten aufgezeichnet. Die Validierung erfolgt anhand des letzten Tages der Aufzeichnung über einen Prognosehorizont von 24 Stunden. Zur Messung der Performanz des Prognosemodells werden der mittlere quadratische Fehler (RMSE), der mittlere absolute Fehler (MAE) und der mittlere prozentuelle Fehler (MAPE) herangezogen [9].

3.3.3 Methoden für das Level L₁

Für die Implementierung des Regelalgorithmus und der Kommunikation auf Level L₁ war es nötig, dass ein Optimierungsmodell inklusive der Nebenbedingungen zur Beschreibung der technischen Komponenten des Fernwärmenetzes erstellt wird. Berücksichtigt wurden Biomasseanlagen, hier wurde für die Mindestlaufzeit die Big-M-Methode [10] verwendet, Wärmepumpen, hier wurde ein Ansatz mit einem Coefficient of Performance [11] abhängig von den Betriebstemperaturen von Wärmequelle und Wärmesenke verwendet, sowie die Technologien Speichersysteme, Boiler, Gaskessel, Elektrolyseur, Netzanschluss.

Das Optimierungsmodell für das Fernwärmenetz bedarf einer Wärmelastprognose für das gesamte Fernwärmenetz. Zur Anwendung kam dabei ein datengetriebener Ansatz. Dieser hat den Vorteil, dass er mit neuen Daten adaptiert werden kann [12]. Das entwickelte Modell basiert auf den beiden Faktoren Wetter und Verhalten [13], wobei die Faktoren Außentemperatur und Luftfeuchte die größte Relevanz haben [14]. Implementiert wurden drei stationäre Machine-Learning Algorithmen und ein autoregressives Modell:

- Multiple Lineare Regression (LR) [15]
- Random Forest (RF) [16] [17]
- k-Nearest Neighbor (k-NN) [18] [19]
- Nichtlineares Autoregressives Exogenes Modell (NARX) [20].

Zum Einsatz kam außerdem ein statischer Ensemble-Ansatz, der AI-Algorithmen und autoregressive Modelle kombiniert, um Flexibilität und Stabilität zu vereinen. Statische Ansätze weisen jedem Modell im Ensemble ein konstantes Gewicht zu. Das Mittelwert-Ensemble (MENS) ist der gängigste statische Ansatz. Die Implementierung erfolgt anhand von Wärmelasten von (Nah-)Wärmenetzen über ein bis

zwei Jahre in 15-minütigen Intervallen. Zur Evaluierung der Modelle wurden vier Ein-Wochen-Intervalle außerhalb der Trainingsdaten verwendet. Die Modellgüte wird durch Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE) und das Bestimmtheitsmaß der Modelle (R^2) bewertet.

Die Prognosemodelle wurden an zwei Standorten (Neusiedl und Oberwart) eingesetzt und anhand von Echtdateen validiert. Der Einsatz der Optimierungsmodelle erfolgte ebenfalls für diese beiden Netze.

3.4 Zusammenführung zu einem funktionierenden Gesamtsystem

Die einzelnen entwickelten Komponenten mussten zu einem gemeinsamen System zusammengeführt werden, dafür war es einerseits notwendig die einzelnen Komponenten für ihre Realanwendung aufzubereiten und andererseits eine übergeordnete Strategie für den Einsatz der Flexibilitäten zu realisieren.

3.4.1 Übergeordnete Strategie

Aufbauend auf den Strategien für die Flexibilitäten auf den einzelnen Levels wurden im Projekt zwei Varianten einer übergeordneten Strategie für den Einsatz des *HeatPool-Systems* entwickelt.

Variante 1 zielt darauf ab, die Speicher während Zeiten niedriger Strompreise zu laden, basierend auf DA-Spotpreisprognosen. Die Zielfunktion „Minimiere Wärmegestehungskosten“ wird verwendet, um unter Einhaltung der relevanten Nebenbedingungen die kostenminimale Wärmebereitstellung zu simulieren. Die Platzierung der DA-Angebote für die Einspeisung von erneuerbarem Strom aus Wind und PV berücksichtigt die um die vom Pool bezogenen Energiemengen reduzierten Gebote. Am Tag der Lieferung erfolgt der optimierte Speicherbetrieb basierend auf den DA-optimierten Preisen.

Es wurden zwei Subvarianten für Variante 1 entwickelt und analysiert. Variante 1a beinhaltet die reine DA-Preisoptimierung der Speicherbeladung, ohne Berücksichtigung der Produktion durch Wind und PV. Variante 1b erlaubt die DA-Preisoptimierung der Speicherbeladung nur bei vorhandener Produktion und ermöglicht die Nachladung mit Strom anderer Herkunft nur bei einem Speicherstand von weniger als 20% der Nennkapazität.

Variante 2 konzentriert sich auf die ursprüngliche Zielsetzung der Vermeidung von Ausgleichsenergiekosten. Sie nutzt keine Preissignale, sondern vergleicht nur die Prognosen für den DA-Handel (>24 h im Voraus) und die Produktion 1 Stunde im Voraus. Bei einer höheren 1-Stunden-Prognose wird die Differenz in den Speichern des *HeatPool-Systems* eingespeichert. Außerhalb dieser Zeiten deckt der Speicher die Wärmelast ab, so im Speicher noch genügend Energie vorhanden ist, andernfalls erfolgt die direkte Wärmebereitstellung ohne Speichernutzung.

Die entwickelten Varianten wurden in einem vereinfachten Simulationsmodell untersucht. Die folgenden Annahmen wurden für die Simulation getroffen:

- Der Coefficient of Performance (COP) der Wärmeerzeuger in L_2 und L_3 wurde durchgehend mit 3,5 angenommen, für L_1 wurde angenommen, dass es sich durchgehend um Warmwasserboiler handelt, die elektrische Energie im Verhältnis 1:1 in Wärme umwandeln.
- Der thermische Leistung der Wärmeerzeuger im Warmwasserpool entsprach dem geschätzten Potential für das Burgenland in den drei Speicherebenen ($82,5 \text{ MW}_{\text{th}}$).

- Das Speichervolumen entsprach ebenfalls dem geschätzten Potential an Speichervolumen (7.000 m³)
- Der mögliche Temperaturhub betrug für alle Speicher 30 K, dies ergab eine nutzbare Speicherkapazität von 244,42 MWh
- Die Simulation erfolgte anhand eines Einzonen- und Einspeichermodells
- Für die Wärmelast wurde ein Referenzlastgang verwendet. Dieser setzte sich aus dem gemessenen Lastgang eines Wärmenetzes und simulierten Lastgängen für Gebäude zusammen, der Wärmebedarf betrug 220 GWh
- Es wurde angenommen, dass der Wärmebedarf der Objekte nur über die betrachteten Wärmeerzeuger gedeckt werden, es erfolgt eine monovalente Betriebsweise
- Die Stromverwendung erfolgte ebenfalls primär für die Wärmeerzeugung, andere Stromverbraucher wurden in dieser Abschätzung nicht berücksichtigt.

Das Basisszenario, ohne Speichereffekte, wurde mit den Strategien Variante 1a, Variante 1b und Variante 2 verglichen. Die Ergebnisse, bezogen auf Stromkosten, Wärmepreis, Anteil des Windstroms an der Wärmeerzeugung und Ausgleichsenergiemengen, wurden im Kontext der Strompreisentwicklung in Österreich von 2019 bis 2022 erläutert. Abbildung 4 zeigt die Entwicklung des Börsenstrompreises in diesem Zeitraum, wobei die Preissenkung im ersten Coronajahr 2020 und die anschließenden deutlichen Preissteigerungen seit Herbst 2021 erkennbar sind.

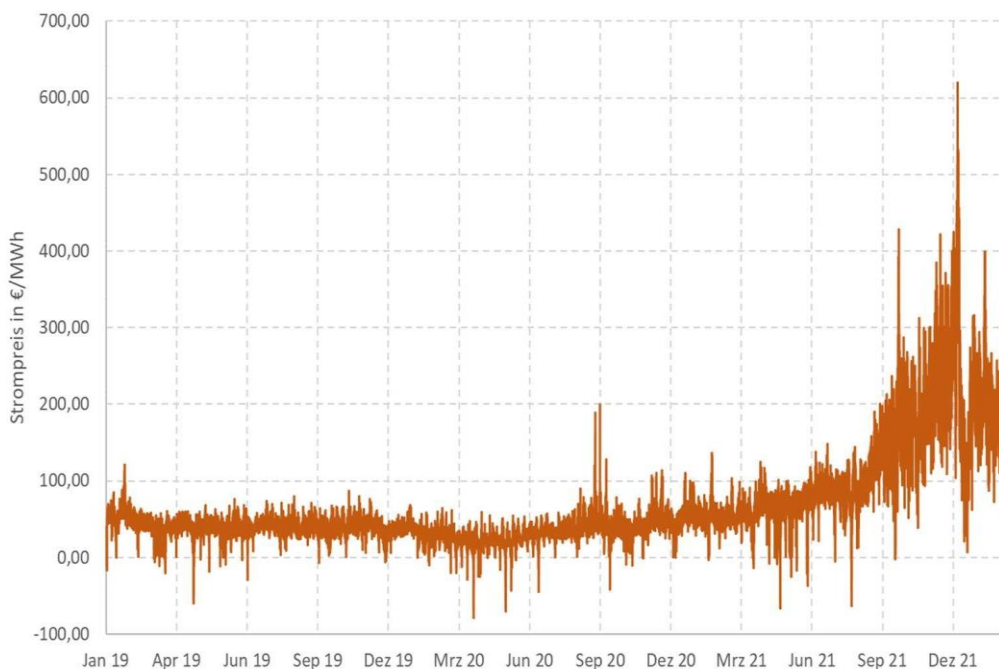


Abbildung 4: Strompreisentwicklung 2019 – 2022[21]

3.4.2 Aufbau des Demonstrators

Zur Realisierung der übergeordneten Strategie war es notwendig, die einzelnen entwickelten Komponenten an die bestehenden Systeme anzubinden und zu testen. Dafür war es notwendig, auf jedem der Levels L₁ bis L₃ die Demonstratoren vorzubereiten und die Kommunikationsanbindung an die einzelnen System durchzuführen.

Level L₁:

Zu Identifikation des Demonstrators auf Level L₁ wurden die vorhandenen Ergebnisse der Wärmenetz-Optimierungen herangezogen und bewertet. Aufbauend auf den Ergebnissen wurden umfassende Diskussionen mit den Wärmenetzbereiber:innen über die Einbindung in das *HeatPool*-System geführt. Anhand dieser Diskussionen und der technischen Parameter der Wärmenetze wurde ein Wärmenetz für die Betrachtung im Forschungsprojekt herangezogen.

Level L₂:

Für die Umsetzung der Flexibilitäten in Wohnhausanlagen wurde der Ansatz verfolgt, dass Gebäude, die von der Burgenland Energie betreut werden, identifiziert und die technischen Gegebenheiten vor Ort sondiert wurden. Aufbauend auf diesen Sondierungsergebnissen wurden jene Gebäude für die Demonstration herangezogen, bei denen eine Anbindung der Wärmepumpen über eine SG-Ready Schnittstelle grundsätzlich möglich schien. Für die Einbindung der Flexibilitäten in das virtuelle Kraftwerk war es notwendig, zuerst die Messsensoren an den Datenaustausch anzubinden. In einem nächsten Schritt war es notwendig, die Smart Grid Ready Schnittstellen für einen Datenempfang durch das virtuelle Kraftwerk vorzubereiten.

Level L₃:

Für den Demonstrationsbetrieb bei den kleinen Wärmespeichern wurden zwei Ansätze gewählt. Einerseits wurden eine Testanwendung bei der Pink GmbH weitergeführt und für die Demonstrationszwecke herangezogen. Andererseits wurden Kunden und Kundinnen der Burgenland Energie über mehrere Kanäle und mittels unterschiedlichster Maßnahmen, wie bspw. Anschreiben über Social Media Kanäle, Angebote über Gratisstrom, etc., adressiert.

Für die Teilnahme am Pilotbetrieb wurde auch eine Vorlage für eine vertragliche Vereinbarung mit den Kunden und Kundinnen vorbereitet. Diese enthielt neben Informationen zum Pilotbetrieb, den Anforderungen der eingesetzten Speicher auch eine Einverständniserklärung der Kunden und Kundinnen zur Teilnahme am Pilotbetrieb und der Weiterverarbeitung der Daten im Rahmen des Forschungsprojekts. Da für die Installation der einzelnen Komponenten (bspw. Shelly-Messgeräte) ein Eingriff in die elektrotechnische Installation notwendig war, musste ein Elektriker beauftragt werden, die Demonstrationsanlagen zu errichten. Eine von den Kunden selbst im Plug and Play Prinzip installierbare Lösung für Bestandsanlagen konnte im Projektverlauf nicht identifiziert werden.

3.5 Demonstrationsphase

Für die Demonstrationsphase des Projektes war geplant, die einzelnen Demonstrationsobjekte in das Virtuelle Kraftwerk einzubinden und die Ansteuerung der einzelnen Flexibilitäten gemäß der übergeordneten Regelstrategie zu erproben.

Während in der Vorbereitung der Demonstrationsphase auf allen drei Levels der Flexibilitätsbereitstellung Demonstrationsobjekte identifiziert wurden, konnten schlussendlich im tatsächlichen Demonstrationsbetrieb nicht alle geplanten Flexibilitäten adressiert werden. Trotz umfassender Maßnahmen zur Aktivierung und Einbindung der Flexibilitäten gelang es schlussendlich nur den Proof of Concept mit einer Anlage auf Level L₂ und drei Anlagen auf Level L₃ durchzuführen.

Für die Erprobung der Lösungen waren einige Schritte notwendig: Darunter fielen der Import der Stammdaten, die als Grundlage für die Zuordnung der verschiedenen Anlagen und Levels im System dienten. Die Stammdaten ermöglichten die Zuweisung der einzelnen Flexibilitäten zu einem Portfolio, was eine segmentierte Steuerung ermöglichte. Diese wiederum macht das gesamte System flexibler, da die Ansteuerung nach Level und Flexibilitätstyp ermöglicht wurde. Die Anbindung der Flexibilitäten wurde im Rahmen des **Go-Live-Prozesses** durchgeführt.

In dieser Phase wurden die generierten Fahrpläne in das virtuelle Kraftwerk importiert und den jeweiligen Portfolios bzw. Levels zugeordnet. Durch die spezielle Anbindung an eine MQTT-Schnittstelle werden die Fahrpläne ausgeführt, jedoch vorher mit den Randbedingungen, die einen reibungslosen Betrieb bei den Endverbrauchern und Endverbraucherinnen gewährleisten sollen, abgeglichen und dementsprechend erst dann die Speicherladung ausgelöst. Das bedeutet, dass der MQTT-Broker die Signale über den Start eines Fahrplans erhält und dann selbstständig eine Verteilung im Pool entsprechend der vorhandenen freien Speicherkapazität vornimmt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Energieerzeugung und -verteilung so effizient wie möglich erfolgt und den zuvor entwickelten Fahrplänen entspricht.

Während der Demonstrationsphase wurde die Einbindung der Flexibilitäten in das Virtuelle Kraftwerk erprobt und eine Validierung der Kommunikation und Steuerung durchgeführt. Im Testbetrieb wurde im Virtuellen Kraftwerk für die übergeordnete Steuerung eine Kombination der beiden Varianten 1b und 2 für die Fahrplangenerierung herangezogen. Die Aktivierung der Flexibilitäten auf den drei Levels wurde nur dann zugelassen, wenn ein bestimmter Schwellenwert für die aus Windenergie erzeugte Leistung erreicht wird. Der Auslöseschwellenwert wurde für alle Kategorien auf 5% der installierten Leistung des jeweiligen Portfolios / der Parkprognose für den Windpark Neusiedl festgelegt.

Der Prozess der Fahrplanerstellung gliederte sich in zwei Hauptkomponenten:

1. Day-Ahead Fahrpläne: Hierbei handelte es sich um Fahrpläne, die im Voraus für die kommenden 24 Stunden erstellt wurden. Diese berücksichtigten die erwarteten Windleistungsprognosen, Speichertemperaturen und Day-Ahead-Preise.
2. Intraday Anpassung: Diese Phase beinhaltete die kontinuierliche Überwachung und Anpassung der zuvor erstellten Fahrpläne während des laufenden Betriebs, um auf unvorhergesehene Änderungen und neue Informationen zu reagieren.

Dies gewährleistet eine umfassende und systematische Vorgehensweise, um die gesteckten Ziele der Fahrplanerstellung zu erreichen.

Demonstration auf Level L₁

Da eine direkte Anbindung der Flexibilitäten auf dem Level L₁ nicht möglich war, wurde stattdessen ein simulationstechnischer Ansatz gewählt, der unter Einbindung der Messgrößen und der vorhandenen Kommunikationsinfrastruktur erfolgt ist. Die Optimierung erfolgte anhand des für Wärmenetze entwickelten Modells und hatte die Minimierung der Gesamtkosten zum Ziel. Für die Optimierung wurden Daten eines ganzen Jahres herangezogen, die Abarbeitung des Modells erfolgte mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten, womit 35.040 Zeitschritte optimiert wurden. Diese umfangreiche Zeitspanne ermöglichte eine detaillierte Analyse der Auswirkungen und Effizienz der Strategie unter variierenden Bedingungen über einen langen Zeitraum.

Für den Einsatz der Flexibilität im Fernwärmenetz in Form einer Wärmepumpe wurde festgelegt, dass eine Einschaltung bei einem niedrigen Strompreis erfolgen sollte. Zusätzlich bestand auch die Option, die Wärmepumpe bei Erreichen einer Preisobergrenze „zwangsabzuschalten“. Eine dynamische Preisgestaltung für Ein- und Ausschaltung ermöglichte es, Energieverbrauch und -kosten zu optimieren.

Demonstration auf Level L₂

Während der Vorbereitung der Demonstrationsphase stellte es sich leider heraus, dass die SG-Ready Schnittstellen sich nicht ohne Weiteres in das *HeatPool*-System einbinden ließen, die Einbindung der Messsysteme hingegen stellte kein Problem dar. Aufgrund zeitlicher Engpässe und Ressourcenknappheit bei den ausführenden Konsortialmitgliedern gelang es nicht, die SG-Ready Schnittstellen für die Einbindung in das Virtuelle Kraftwerk vorzubereiten. Stattdessen wurde der Datenaustausch zwischen den Messsystemen vor Ort und dem Virtuellen Kraftwerk erprobt und festgestellt, ob eine ausreichende Datendichte, Datenqualität und Sicherheit der Datenübertragung erreicht wurde.

Demonstration auf Level L₃

Für die Anbindung auf Level L₃ wurden in der Demonstrationsphase weitere Maßnahmen zur Akquise weiterer Teilnehmer und Teilnehmerinnen gesetzt. Darüber hinaus wurde für die einzelnen Anlagen Tests durchgeführt, die einerseits darauf abzielten, die Kommunikation hinsichtlich der Datendichte und Übertragungsqualität zu überprüfen. Ein weiterer Aspekt des Demonstrationsbetriebes war es, zu überprüfen, wie resilient das System hinsichtlich des Einbaus der Komponenten sei. Aufgrund der Notwendigkeit der Einbindung eines Elektrikers als Installateur der Komponenten in Kombination mit der kurzen Demonstrationszeit machten es leider nicht möglich, technische Änderungen an den Systemen durchzuführen, sobald sie einmal installiert waren.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel werden die zentralen Ergebnisse der unterschiedlichen Phasen des Forschungsprojektes *HeatPool* dargestellt und Schlussfolgerungen daraus abgeleitet.

4.1 Stakeholdereinbindung

Anforderungsanalyse mit den Vertretern und Vertreterinnen aller Stakeholder

Schon in den Eingangsstatements zeigte sich, dass die **Versorgungssicherheit** zu einem der wichtigsten Punkte für die Stakeholder zählte. **Kosten, Rentabilität** und **Preisstabilität** waren weitere zentrale Aspekte mit einer hohen Relevanz für die Stakeholder. Aus der Sicht von Privatpersonen war es vor allem wichtig, dass die **Eigenverbrauchsoptimierung der eigenen PV-Anlage nicht negativ** durch den Flexibilitätsabruf **beeinflusst** werden. Wettervorhersagen, die im Rahmen der Flexibilitätsanbindung generiert werden, könnten für Privatpersonen in diesem Zuge einen attraktiven Mehrwert bilden. Eine klare Definition der freien Kapazität der Speicher und vertragliche Verpflichtungen für eine einzuhaltende Mindesttemperatur wurden für die Bereitstellung der Flexibilität vorausgesetzt.

Quantitative Umfrage „Privathaushalte“

Im Rahmen einer quantitativen Online-Umfrage bei Bewohnern und Bewohnerinnen von Privathaushalten wurden in einem zweiten Schritt deren Anforderungen und Motive sowie die Partizipationsbereitschaft hinsichtlich einer möglichen Systemlösung erhoben. Der Großteil der 173 teilnehmenden Personen war **männlich (71 %) und im Schnitt 53 Jahre alt**. Ein Drittel der befragten Personen gab außerdem als relevanten Bereich ihrer Ausbildung bzw. Berufstätigkeit das Gebiet Technik an.

Rund ein Drittel der befragten Personen heizte zum Zeitpunkt der Befragung mit Strom, dabei nutzten **20% eine Wärmepumpe** und **7% den Strom direkt zum Heizen**. Diese 27% wären potenzielle Teilnehmer und Teilnehmerinnen an der Demonstration des *HeatPool*-Projektes.

Die Erhebung der Motive für eine Teilnahme am Projekt ergab, dass der **Beitrag zum Umweltschutz** und die **Senkung der laufenden Stromkosten** von hoher Relevanz für die teilnehmenden Personen war. Weiters erfuhren die Themen **Unterstützung erneuerbarer Energien, Senkung des eigenen Stromverbrauchs** und „**der Region zu helfen, erneuerbare Energie zu verwerten**“ hohe Zustimmung. Die statistische Auswertung ergab, dass die wichtigsten Aspekte für die Teilnehmer und Teilnehmerinnen der Umfrage die Themen **Nachhaltigkeit, Energieeffizienz** und **Kosteneinsparungen** in dieser Reihenfolge waren.

Bei jenen Teilnehmern und Teilnehmerinnen, für die eine Teilnahme an der Demonstrationsphase des *HeatPool*-Projektes von Relevanz war, waren vor allem die Themen **Energiemanagement** und **Energiedatenvisualisierung** wichtig. Generell wurde eine hohe Partizipationsbereitschaft verzeichnet, 11 % der teilnehmenden Personen wiesen die notwendigen technischen Voraussetzungen auf.

Umfrage Energievisualisierung

Die Ergebnisse der Umfrage zur Datenvisualisierung in einem 3 (Visualisierungstyp) x 3 (Informationsdichte) Mixed-Design sind in Abbildung 5 dargestellt. Insgesamt haben sich 538 Probanden und Probandinnen am Online-Experiment beteiligt. Die Befragten waren im Durchschnitt 43,21 Jahre alt, 55,07% waren männlich und 44,77% weiblich.

Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

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

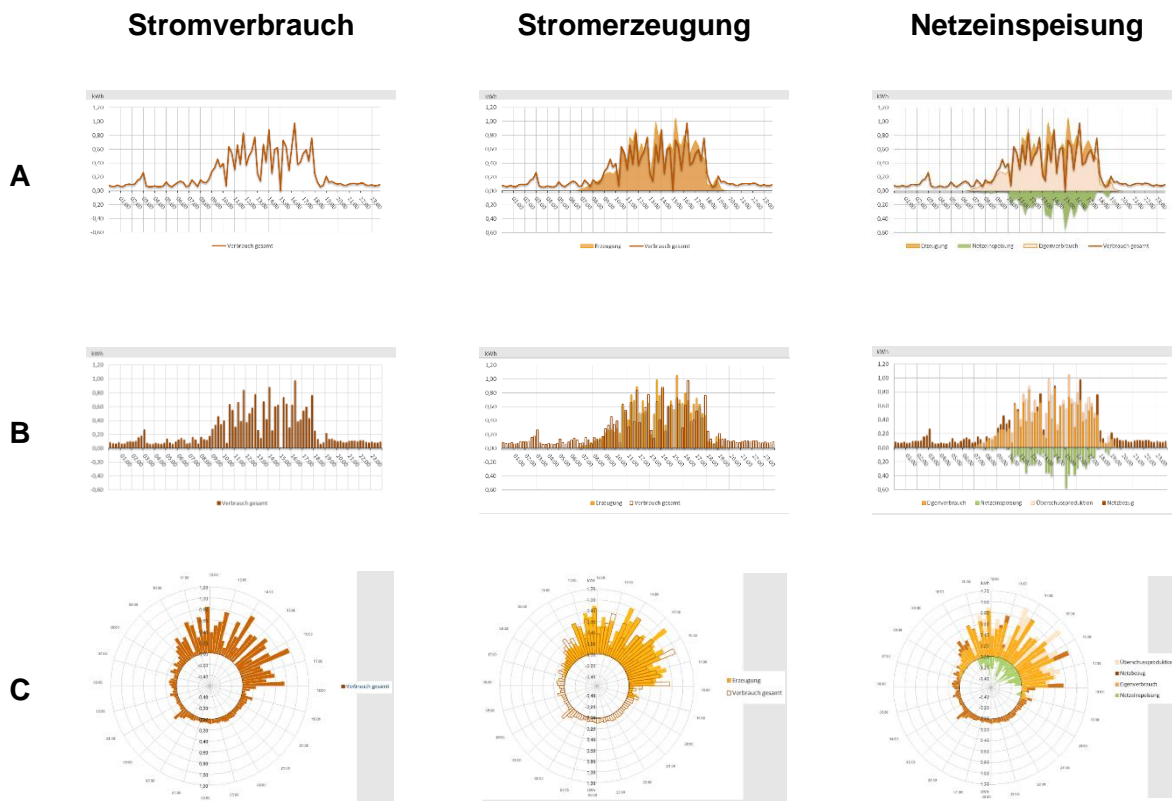


Abbildung 5: Visualisierungstypen und Ebenen der Informationsdichte

Die Online-Befragung ergab, dass Linien- und Säulendiagramme mit zunehmender Informationsdichte zu höherem Verständnis führen, womit die Ergebnisse aus der Literatur [22] [23] bestätigt werden konnten. Die Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass das für Energiedatenvisualisierungen eher als unüblich einzustufende Windrosendiagramm für Darstellungen mit geringer Komplexität noch gut verständlich zu sein scheint. Somit käme es als mögliche Alternative für den reinen Stromverbrauch in Frage. Jedoch büßt die Windrose im Vergleich zu Linien- und Säulendiagrammen mit zunehmender Informationsdichte an Verständlichkeit ein.

Hinsichtlich der Informationsdichte der Datenvisualisierung konnten merkbare Unterschiede festgestellt werden. Erstens war bei Betrachtung des bloßen Stromverbrauchs – relativ unabhängig vom Visualisierungstyp – vergleichsweise ein hohes Verständnis gegeben. Weiters konnte aus dem höheren Verständnis im Rahmen der Visualisierung von Stromverbrauch, -erzeugung und Netzeinspeisung ein gewisser Lerneffekt abgeleitet werden. Den Probanden und Probandinnen wurden die vergleichsweise komplexeste Visualisierung zuletzt gezeigt.

Allenfalls lieferten die Ergebnisse dieser Arbeit wertvolle Erkenntnisse, eine höhere Nutzer- und Nutzerinnenfreundlichkeit bei der Einbindung privater Haushalte in den *HeatPool* zu erreichen und so einen zusätzlichen Treiber zu einem nachhaltigen, effizienten Energieverhaltensverhalten zu schaffen.

Co-Creation Prozess mit Wärmenetzbetreibern und Wärmenetzbetreiberinnen

Aus dem Workshop mit den Betreibern und Betreiberinnen von Wärmenetzen resultierte ein Geschäftsmodell für die Nutzung der Flexibilitäten des *HeatPool-Systems* für Wärmenetze. Dessen Eckpunkte sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

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

(#)	Dimension	Element
1	Schlüsselpartner	Anbieter und Anbieterin IKT Anbieter und Anbieterin VPP Forschungseinrichtung Technologieanbieter und Technologieanbieterin mobile P2H-Anlagen Lieferanten und Lieferantin Wärmequellen (Niedertemperatur) Planer und Planerin Energiezentrale Energiegemeinschaft Vor Ort: Betriebsleiter und Betriebsleiterin
2	Kostenstruktur	Investition Mobile P2H-Anlage Anschaffung VPP IKT-Infrastruktur Einbindung der mobilen P2H-Anlage Betriebskosten Stromkosten Wartung und Instandhaltung
3	Schlüsselressourcen	Mobile P2H-Technologie IKT-Infrastruktur Technisches Know-How Personal (Installation, Verkauf, IKT-Anbindung, Betrieb und Wartung) VPP (E&M) User Interface Abrechnungssystem
4	Schlüsselaktivitäten	Wärmekonstellationen identifizieren (wirtschaftlich/technisch) Containerlösungen entwickeln/zukaufen Entwicklung von Steuerung- und Regelalgorithmen Entwicklung einer Prozesses zur Anbindung bzw. Ausscheidung von Anlagen Aufsetzen von Businessplänen Evolution des <i>HeatPool</i> -Algorithmus monitoren
5	Wertangebot	Niedrigere Wärmegestehungskosten Abnahme von Betriebsführung und Wartung Erhöhung der Resilienz Ersatz für Back-Up Kessel Finanzierungsmodell Ökologischer Mehrwert Optimierung der Wärmeerzeugung
6	Einnahmequellen	Contracting-Gebühren oder Energieverkauf Vermiedene Ausgleichsenergiekosten Vermeidung von CO2-Kosten
7	Kundenbeziehungen	Ansprache Abrechnungen Wartungen Laufender Datenaustausch
8	Kundensegmente	Nahwärmenetzbetreiber und Nahwärmenetzbetreiberinnen Industriebetriebe
9	Kanäle	Dachverbände Key Account Konferenzen und Veranstaltungen

Schlussfolgerung:

Die Stakeholder-Anforderungen wurden durch Eingangsstatements und eine quantitative Umfrage ermittelt. Die Versorgungssicherheit wurde als zentraler Punkt identifiziert, gefolgt von Kosten, Rentabilität und Preisstabilität. Privatpersonen legten Wert darauf, dass die Eigenverbrauchsoptimierung ihrer PV-Anlage nicht negativ beeinflusst wird. Wettervorhersagen durch Flexibilitätsanbindung wurden als attraktiver Mehrwert betrachtet. Klar definierte Speicherkapazität und vertragliche Mindesttemperaturverpflichtungen wurden für die Flexibilitätsbereitstellung gefordert.

In einer quantitativen Umfrage zur Motivation der Flexibilitätsbereitstellung mit 173 Teilnehmern und Teilnehmerinnen zeigte sich, dass rund ein Drittel der befragten Personen mit Strom (direkt oder mittels Wärmepumpen) heizte, wovon 27% potenzielle Teilnehmer und Teilnehmerinnen am *HeatPool*-Projekt wären. Motive für die Teilnahme waren Umweltschutz und Kostenersparnis. Die wichtigsten Themen für die Umfrageteilnehmer und -teilnehmerinnen waren Nachhaltigkeit, Energieeffizienz und Kosteneinsparungen. Energiemanagement und Energiedatenvisualisierung waren für potenzielle *HeatPool*-Teilnehmer und Teilnehmerinnen relevant, wobei eine hohe Partizipationsbereitschaft festgestellt wurde.

Eine Umfrage zur Energievisualisierung zeigte, dass Linien- und Säulendiagramme mit höherer Informationsdichte zu besserem Verständnis führen. Das Windrosendiagramm, obwohl unüblich, war bei geringer Komplexität gut verständlich. Die Ergebnisse könnten Hinweise darauf liefern, wie private Haushalte nutzerfreundlich in den *HeatPool* eingebunden werden können, um nachhaltiges und effizientes Energieverhalten zu fördern.

4.2 Grundlegende Recherchen und Untersuchungen

Das Ziel der grundlegenden Recherche war die Ausarbeitung der technischen Grundlagen für die Technologien auf den unterschiedlichen Levels des *HeatPool-Systems*.

Level L₁

Aus den Recherchen zeigte sich, dass auf Ebene der Fernwärmenetze für das Projekt *HeatPool* in erster Linie **sensible Wärmespeicher** und **Power2Heat-Anwendungen** von Relevanz sind. Wärmespeicher erfüllen dabei die folgenden Aufgaben in einem Wärmenetz:

- Reduktion von Wärmebedarfsspitzen
- Kleinere Auslegung von Wärmeerzeugungsanlage möglich
- Positiver Einfluss auf das Betriebsverhalten der Wärmeerzeugungsanlage
- Energiereserve für Störungen oder kurzzeitige Unterbrechungen
- Nutzung von Abwärme, die nicht gleichzeitig mit dem Wärmebedarf anfällt

Power2Heat Anwendungen sind Technologien, die mittels Verwendung von elektrischer Energie, thermische Energie erzeugen. Es gibt grundsätzlich zwei verschiedene physikalische Prinzipien. Die elektrische Direktheizung die elektrische Energie in einem Verhältnis von 1:1 in thermische Energie verwandelt und die Wärmepumpen, deren Umwandlungswirkungsgrad durch den COP bestimmt wird. Für Wärmepumpenanwendungen sind Wärmequellen notwendig, es kommen Umgebungsluft, oberflächennahe Geothermie, Gewässer, Abwasser, Abwasserreinigungsanlagen sowie Rauchgas über Rauchgaskondensationsanlagen in Frage. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Art, wie der Strom zur Power2Heat-Anlage gelangt, hierfür wurden die folgenden Möglichkeiten identifiziert: Direktleitung, Stromerzeugung vor Ort und Teilnahme an einer Energiegemeinschaft.

Auf **Level L₁** kann die aktuell vorhandene Flexibilität von Fernwärmenetzen im Normalfall anhand der aktuellen Speichertemperatur eines Pufferspeichers ermittelt werden. Bei Vernachlässigung des aktuellen Betriebs der zentralen wärmeerzeugenden Anlage oder Anlagen, möglicher Wetter- und Lastprognosen, kann der aktuelle Ladezustand des Speichers anhand der Speichertemperatur

ausgegeben werden. Im einfachsten Fall wird die Speicherbewirtschaftung bzw. der -zustand der nächsten Stunden in der internen Regelung des Fernwärmenetzes berechnet und kann dem *HeatPool*-System zur Verfügung gestellt werden.

Level L₂

Als Erzeugungstechnologie für die Mehrparteienwohnhäuser wurde im Projektkontext die Technologie der **Kompressionswärmepumpen** gewählt. Diese Technologie verwendet technische Arbeit, um thermische Energie aus einem Reservoir mit niedrigerer Temperatur in ein zu beheizendes System höherer Temperatur zu übertragen. Die Heizungssysteme sind in der Regel als zentrale Systeme ausgeführt und von der Warmwasseraufbereitung getrennt. Die Warmwasseraufbereitung kann dabei **zentral (a)**, **dezentral (b)** oder **gemischt (c)** erfolgen, siehe Abbildung 6.

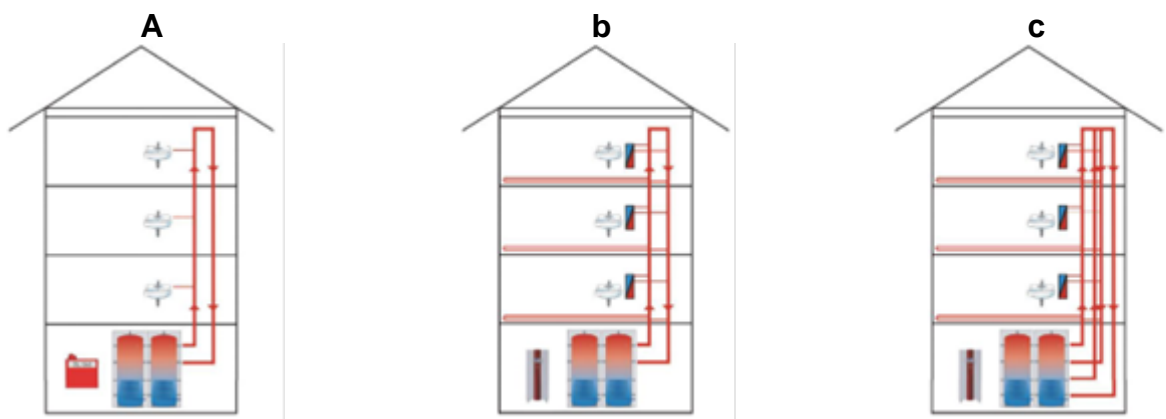


Abbildung 6: Arten der Warmwasseraufbereitung [24]

Hierbei ist besonderes Augenmerk auf gesundheitliche Aspekte zu legen. Im Falle eines zentralen Wärmesystems muss das System so gebaut und betrieben werden, dass die Bildung von Legionellen vermieden wird. Hierfür sind die entsprechenden Regeln der ÖNORM B 5019: 2020 03 01, ÖNORM B 5021: 2020 08 01 sowie ÖNORM B2531:2019 04 15 zu berücksichtigen. Vorschriften, welche für den *HeatPool*-Ansatz besonders wichtig sind, wie z.B. der Verbrühungsschutz, werden in ÖNORM B 5019: 2020 03 01 erwähnt. Bei der Regelung solcher Speicher, besonders bei dem Eingriff in die bestehende Regelung müssen diese Vorschriften unbedingt eingehalten werden.

Die Bereitstellung von Flexibilität und die damit notwendige Ansteuerung der Wärmepumpen gestaltet sich auf Level L₂ deutlich schwieriger als auf Level L₁. Das liegt in erster Linie an der schlechteren Datenverfügbarkeit und Kommunikationsmöglichkeit der technisch kleineren Systeme. Eine gute Möglichkeit mit dieser Problematik umzugehen sind smarte Lösungen für die Flexibilitätsbereitstellung. Wärmepumpen, die mit einem „Smart Grid Ready“-Label versehen sind, sind prinzipiell in der Lage über eine definierte Schnittstelle zwecks Lastmanagement zur Netzdienlichkeit angesprochen zu werden. Das Label wird für Deutschland, Österreich und die Schweiz vergeben und besitzt darüber hinaus keine Gültigkeit [25]. Derartige Wärmepumpen kennen drei Betriebszustände:

- Betriebszustand 1 | Blockierung
- Betriebszustand 2 | Normalbetrieb
- Betriebszustand 3 | Niedrigpreismodus
- Betriebszustand 4 | Überkapazitätsmodus

4.2.1 Level L₃

Auf Level L₃ werden dezentrale Kleinstspeicher in Einfamilienhäusern behandelt. Die Recherchen haben eine Relevanz von **elektrischen Speicher-Warmwasserbereitern** (drucklose wie druckfeste) sowie **Wärmepumpenanwendungen** nahegelegt. Durchfluss-Warmwasserbereiter wurden für die weitere Betrachtung nicht berücksichtigt.

Flexibilitätsbereitstellung:

Auf dem **Level L₃** stellt sich die Situation deutlich schwieriger als auf den anderen beiden Levels dar, da die Informations- und Datenlage hier eine deutlich andere ist. Als Beispiel sei hier ein konventioneller Elektrowarmwasserspeicher genannt. Der darin befindliche Heizstab hat normalerweise einen 2-Punkt-Regler der von einem Thermostat mit den notwendigen Informationen versorgt wird. Die Temperatur pendelt dann stets zwischen den beiden Betriebspunkten des 2-Punkt-Reglers. Bei diesen Speichern hat man demnach nicht die Möglichkeit den aktuellen Speicherstand abzufragen, wodurch die Verwendung eines statistischen Modells oder eines Modells zur Abschätzung des Speicherinhaltes notwendig ist. Auf Level L₂ kann die Situation aufgrund der größeren Dimensionen der Anlage eine andere sein und es können bereits entsprechende Messgeräte verfügbar sein.

Hinzu kommt, dass das Hauptproblem bei der Nutzung dezentraler Wärmepumpen auf Level L₃ darin besteht, dass es keine standardisierte Schnittstelle für unterschiedliche Hersteller von Wärmepumpen abseits der SG Ready Schnittstelle gibt.

Ein Lösungsansatz dafür wäre die Nutzung smarter Speichersysteme, die jedoch im Demonstrationsgebiet nicht zur Verfügung standen. Nicht-Smarter Lösungen hingegen verfügen nicht über die Möglichkeit zur Anbindung an ein übergeordnetes Mess- oder Kommunikationssystem und bedürfen alternativer Möglichkeiten zur Einbindung in das *HeatPool*-System.

Schlussfolgerung:

Die Recherche der technischen Rahmenbedingungen ergab, dass es auf allen Levels des *HeatPool*-Systems umfassende Möglichkeiten für die Bereitstellung von Flexibilitäten gibt. Generell bestehen die Flexibilitäten stets aus den folgenden notwendigen Komponenten: Wärmeerzeuger, Speicher, Messkomponenten, Regelungskomponenten und Schnittstellen für eine externe Anbindung. Während die Wärmeerzeuger und Speicher auf jedem der Levels L₁ bis L₃ zur Verfügung stehen, stellen die Mess- sowie Regelungskomponenten und die Schnittstellen für eine externe Anbindung auf Level L₂ und insbesondere auf Level L₃ eine große Herausforderung dar. Während es für Wärmepumpen oft die Möglichkeit der Nutzung einer SG-Ready Schnittstelle gibt, fällt diese Möglichkeit für Warmwasserboiler gänzlich weg. Ähnlich verhält es sich mit dem notwendigen Messkomponenten für die Ermittlung der freien Speicherkapazität, hier müssen insbesondere auf den Levels L₂ und L₃ Hilfsalgorithmen eingesetzt werden, da die notwendigen Messkomponenten für eine direkte Ermittlung der freien Speicherkapazität nicht zur Verfügung stehen.

wesentliche Auswirkungen auf den weiteren Simulationsverlauf und daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen des *HeatPool*-Systems haben. Insbesondere zeigt der in Abbildung 8 dargestellte Verlauf der prognostizierten Speichertemperatur eine signifikante Abweichung von der tatsächlichen Speichertemperatur.

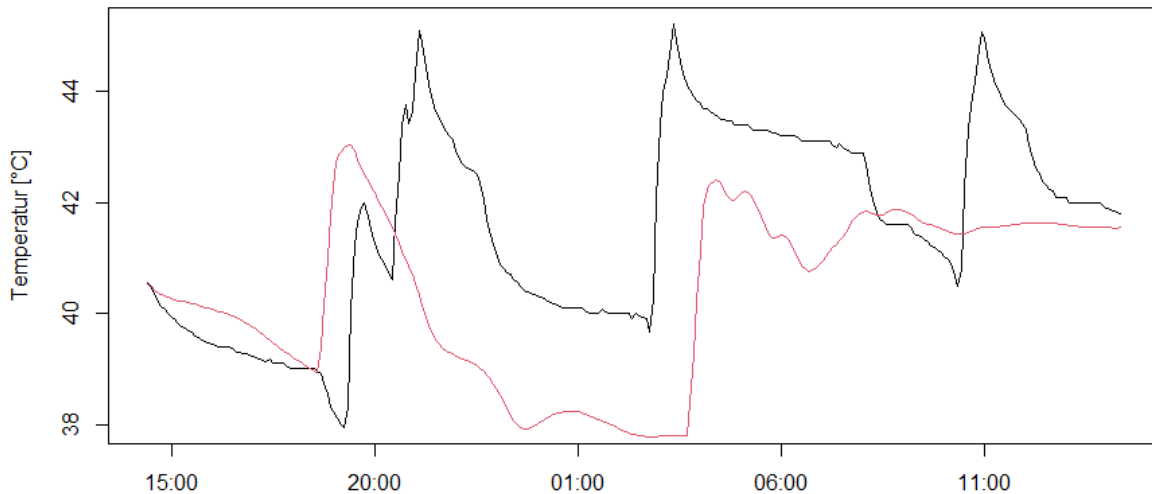


Abbildung 8: NARX-Modell zum Forecast der Speichertemperatur

Dabei ist jedoch stets die Situation der verfügbaren Daten gerade auf dem Level L_3 zu berücksichtigen. Dieses Modell liefert eine vielversprechende Basis für die Umsetzungsphase im *HeatPool*-System und weitere Entwicklungen nach Projektende. Durch den laufenden Betrieb ist davon auszugehen, dass die Datenlage zunehmend besser wird und damit wesentlich mehr Daten zur Verfügung stehen, um das Modell anzulernen und adäquate Vorhersagen treffen zu können.

4.3.3 Bewertung der entwickelten Methoden für den Level L_1

Die Methoden zur Optimierung von Fernwärmenetzen wurden anhand von zwei Fernwärmenetzen durchgeführt. Einerseits wurden Daten des Fernwärmenetzes in Neusiedl am See und andererseits Daten von dem Fernwärmenetz in Oberwart herangezogen.

Neusiedl am See:

Eingangs wurde die Bewertung der unterschiedlichen Methoden für die Prognose des Wärmelastgangs getestet. Dabei ergaben sich die Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse. **Als bestes Einzelmodell kann der Random Forest identifiziert werden.** Alle Modelle schnitten bei der Prognose der Herbstdaten am besten ab. Da die Leistung in diesem Wärmenetz im Sommer hochgradig volatil ist, wurden in dieser Jahreszeit die schwächsten Performanzen der Modelle erreicht. Die Kombination mittels MENS-Ansatz führte hier zu einer Verbesserung aller Bewertungsmaße außer dem R^2 -Wert, wo die Methode schlechter abschnitt als der Random Forest-Ansatz. Die evaluierten Modelle unterschätzten tendenziell die tatsächlichen Wärmelasten.

In Abbildung 9 sind beispielhafte Zeitverläufe für unterschiedliche Wochen des Jahres dargestellt. Die hellblaue Linie zeigt das Ergebnis der Prognosen, die schwarzen Linien die tatsächlich gemessenen Wärmelasten. Anhand der Sommer-Woche Mitte August kann gezeigt werden, dass das Ensemble die Volatilität des Systems nicht abbilden kann.

Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

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

Tabelle 1: Evaluierungsergebnisse für das Prognosemodell im Fall des Fernwärmenetzes in Neusiedl

Modell	Saison	RMSE	MAE	MAPE	R ²
LR	Gesamt	290.76	216.93	0.1348	0.8886
	Winter	418.75	332.79	0.1193	-
	Frühling	260.77	205.61	0.1296	-
	Sommer	187.10	131.11	0.1961	-
	Herbst	244.56	198.21	0.0943	-
RF	Gesamt	287.93	215.10	0.1279	0.8907
	Winter	398.98	322.01	0.1100	-
	Frühling	293.00	229.34	0.1355	-
	Sommer	174.28	119.72	0.1751	-
	Herbst	237.10	189.33	0.0910	-
k-NN	Gesamt	308.59	228.45	0.1416	0.8745
	Winter	446.72	354.32	0.1295	-
	Frühling	285.21	222.32	0.1368	-
	Sommer	187.69	131.36	0.2005	-
	Herbst	254.51	205.80	0.0998	-
NARX	Gesamt	297.92	222.01	0.1333	0.8830
	Winter	424.08	339.13	0.1174	-
	Frühling	283.21	219.88	0.1325	-
	Sommer	176.43	123.39	0.1844	-
	Herbst	252.66	205.66	0.0990	-
MENS	Gesamt	284.48	211.95	0.1290	0.8933
	Winter	403.66	322.72	0.1133	-
	Frühling	272.13	212.44	0.1282	-
	Sommer	176.14	121.74	0.1822	-
	Herbst	236.00	190.89	0.0923	-

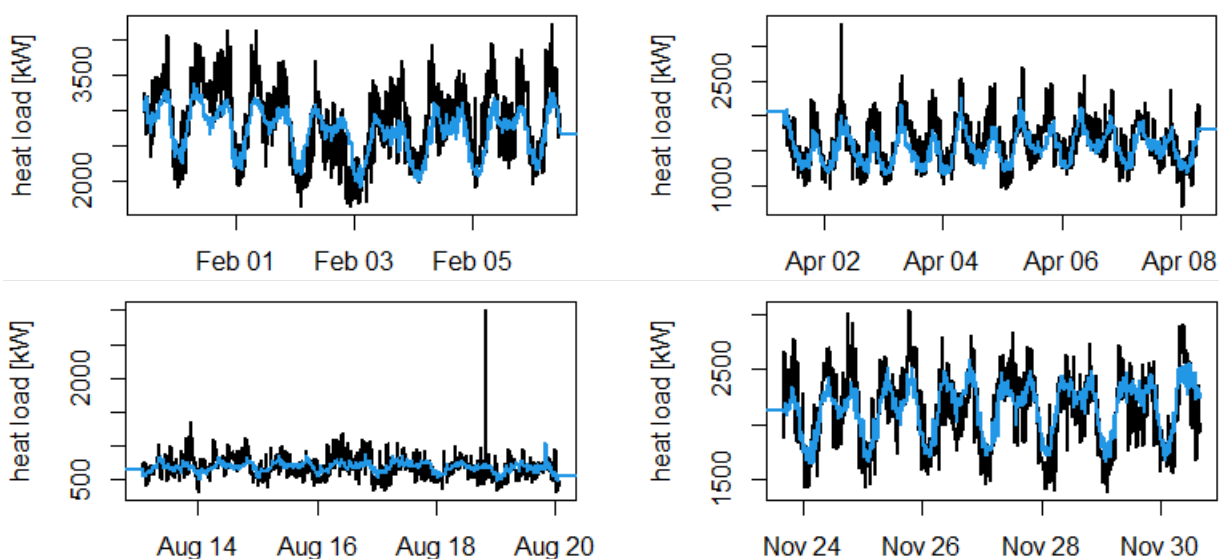


Abbildung 9: Vergleich zwischen Wärmelastwerten und Prognosewerten für 4 Testwochen

Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

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

Weiters wurde das Modell zur Optimierung des Fernwärmenetzes anhand der Daten von Neusiedl am See getestet. Genutzt wurden die Erzeugungszeitreihe des Windparks Neusiedl, der Fernwärmebedarf, sowie eine Zeitreihe mit Preisen hinterlegt [21]. Das Modell versuchte dabei das Fernwärmenetz kosteneffizient und mit erneuerbaren Energieträgern zu betreiben. Die Optimierung resultierte darin, dass ein Biomasse-Heizwerk die Wärmeerzeugung in den Wintermonaten übernahm (Abbildung 10), gestützt von der Erzeugung einer Wärmepumpe (Abbildung 11), die ausschließlich mit Windstrom betrieben wurde. Lediglich, wenn die Erzeugung dieser beiden Technologien in Kombination mit einem großen Pufferspeicher nicht ausreichte, wurde ein Gaskessel eingesetzt (Abbildung 12).

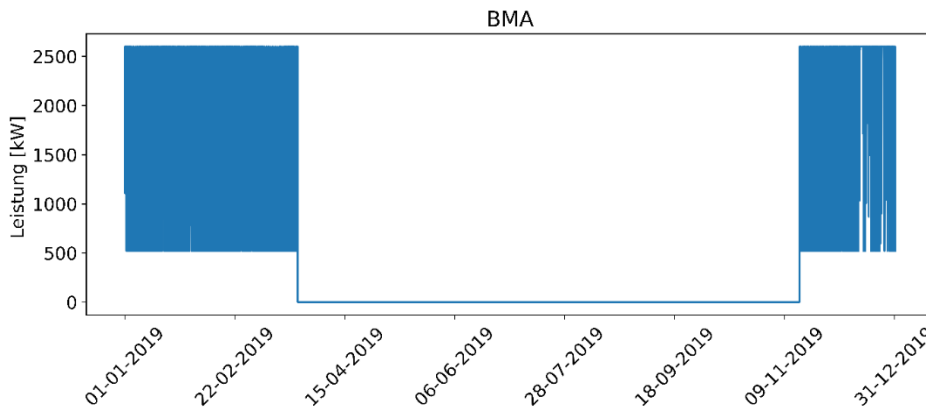


Abbildung 10: Optimiertes Erzeugungsprofil des Biomasse-Heizwerkes für das Wärmenetz Neusiedl

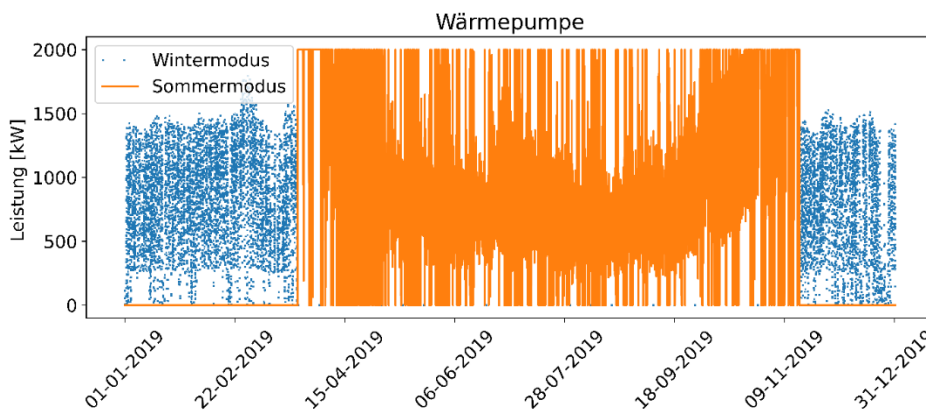


Abbildung 11: Optimiertes Erzeugungsprofil der Wärmepumpe für das Wärmenetz Neusiedl

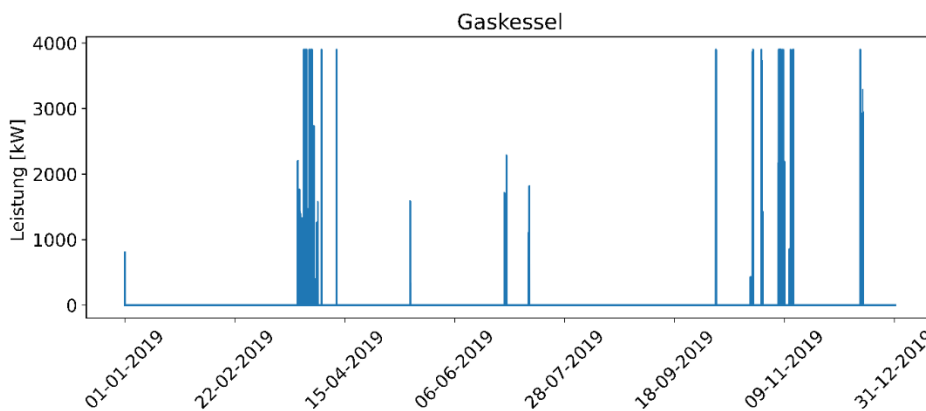


Abbildung 12: Optimiertes Erzeugungsprofil des Gaskessels für das Wärmenetz Neusiedl

Oberwart:

Die Anwendung des Prognosemodells für das Fernwärmenetz in Oberwart lieferte ähnliche Ergebnisse wie für Neusiedl am See. Erneut lieferte das Random Forest Modell die besten Ergebnisse zur Prognose des Wärmelastgangs. Im Unterschied zu Neusiedl wurde in Oberwart durch die Kombination mittels MENS-Ansatz keine Verbesserung gegenüber dem Einzelmodell erreicht. Wieder zeigte sich, dass der Einsatz des Modells in den Herbstmonaten sehr gute Ergebnisse lieferte, während die Prognose der Sommermonate aufgrund der hohen Volatilität sehr schwierig war. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 abgebildet. Wie auch in Neusiedl werden auch in Oberwart die Wärmelasten tendenziell unterschätzt.

Tabelle 2: Evaluierungsergebnisse für das Prognosemodell im Fall des Fernwärmenetzes in Oberwart

Modell	Saison	RMSE	MAE	MAPE	R ²
LR	Gesamt	320.19	242.40	0.1472	0.8777
	Winter	355.89	269.23	0.1073	-
	Frühling	366.16	293.13	0.1574	-
	Sommer	197.93	147.62	0.2245	-
	Herbst	331.21	258.75	0.1000	-
RF	Gesamt	293.89	218.74	0.1299	0.8970
	Winter	348.32	268.40	0.1064	-
	Frühling	337.95	267.00	0.1379	-
	Sommer	156.04	113.31	0.1899	-
	Herbst	292.16	225.65	0.0858	-
k-NN	Gesamt	343.27	261.64	0.1624	0.8595
	Winter	411.56	328.95	0.1304	-
	Frühling	391.16	315.02	0.1730	-
	Sommer	179.01	134.38	0.2417	-
	Herbst	341.47	267.60	0.1052	-
NARX	Gesamt	388.46	273.17	0.1464	0.8201
	Winter	560.83	434.43	0.1575	-
	Frühling	411.75	305.91	0.1478	-
	Sommer	162.60	117.16	0.1906	-
	Herbst	307.02	235.83	0.0907	-
MENS	Gesamt	300.50	222.16	0.1321	0.8923
	Winter	383.10	293.07	0.1129	-
	Frühling	326.35	256.66	0.1326	-
	Sommer	156.03	114.50	0.1973	-
	Herbst	289.20	224.14	0.0863	-

In Abbildung 13 sind beispielhafte Zeitverläufe für unterschiedliche Wochen des Jahres dargestellt. Die hellblaue Linie zeigt das Ergebnis der Prognosen, die schwarzen Linien die tatsächlich gemessenen Wärmelasten. Die Winterwoche (Ende Februar bis Anfang März) wurden die Lastspitzen nicht ausreichend gut getroffen, in der beispielhaften Frühlingswoche wurde zwar der grundsätzliche Wärmelastverlauf gut prognostiziert, jedoch wurden die Spitzen unterschätzt. Die Sommer-Woche Ende Juli zeigt, dass die Volatilität des Wärmeprofiles vom Ensemble nicht ganz erreicht wird. Zudem gab es einen verhältnismäßig extremen Wert am 23. Juli, der praktisch nicht in ein Sommer-Profil passt und daher

Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

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

vom Modell auch nicht erfasst werden konnte. Die Herbst-Woche Ende November deutete wiederum auf die Tendenzen zur Unterschätzung der Spitzenlasten hin. Abgesehen davon wurde der Lastverlauf relativ gut abgebildet.

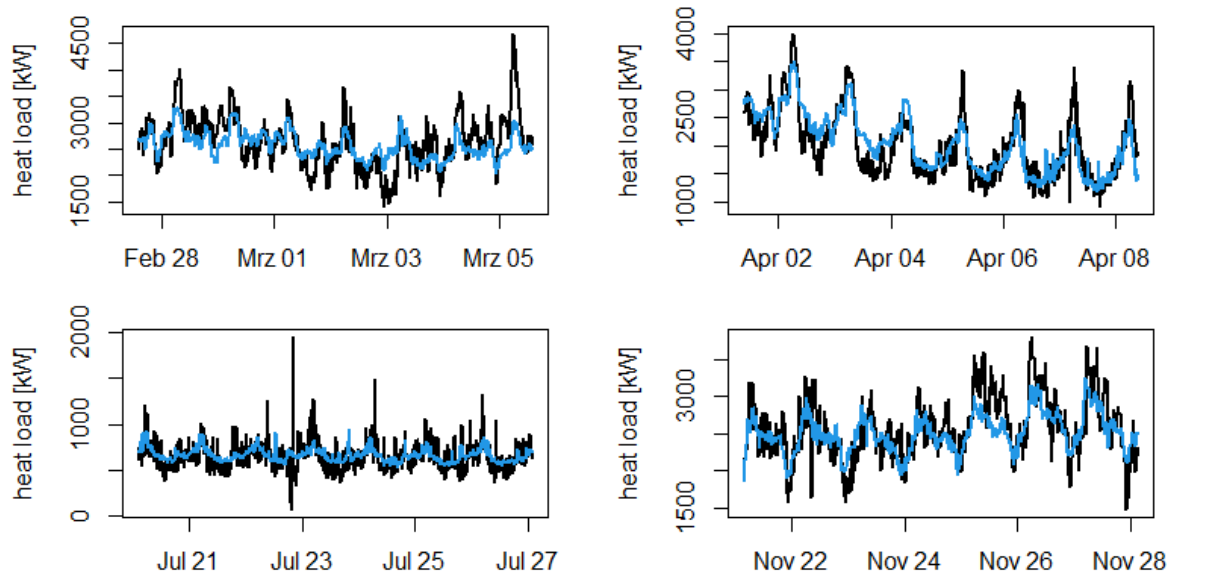


Abbildung 13: Vergleich zwischen Wärmelastwerten und Prognosewerten für 4 Testwochen

Weiters wurde das Modell zur Optimierung des Fernwärmenetzes anhand der Daten von Oberwart getestet. Die Optimierung resultierte darin, dass die Einspeisung des Biomasse-Heizwerks im Wesentlichen dem Fernwärmebedarfs der Stadt Oberwart entsprach, siehe Abbildung 14.

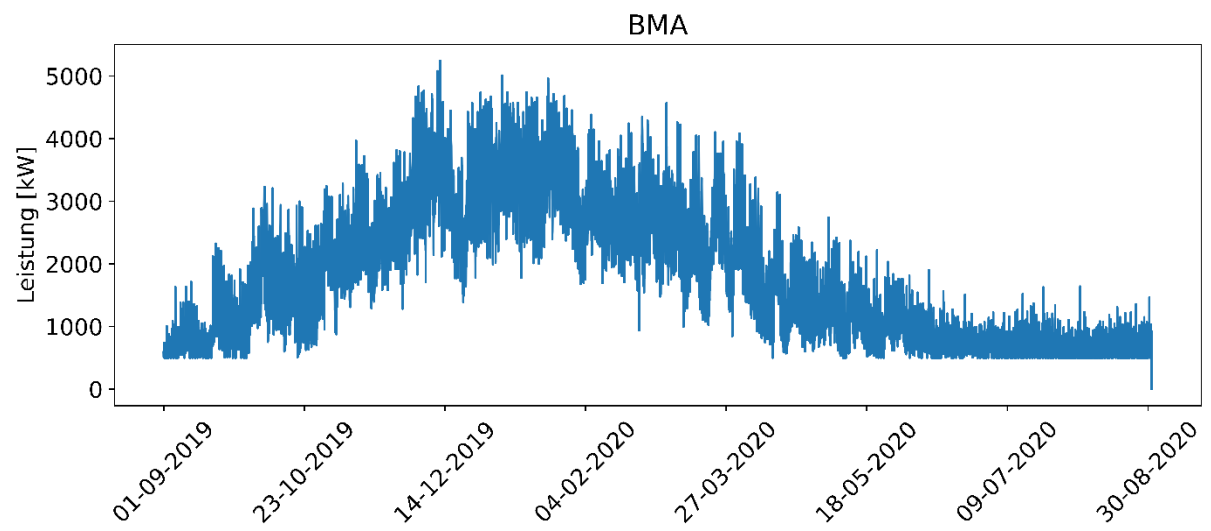


Abbildung 14: Thermische Leistung der BMA im Wärmenetz in Oberwart.

Im betrachteten Fall von Oberwart wurde die Biomasse-Anlage durch ein Power-to-Heat System (Elektroboiler) ergänzt. Diese Anlage kam laut der Optimierung nur sehr selten zum Einsatz, da das Modell die Betriebskosten minimierte. Durch die hohen Strompreise, siehe Abbildung 15, war der Einsatz des Elektroboilers sehr limitiert, wie in Abbildung 16 dargestellt. In den insgesamt 17 Betriebsstunden verteilt über den betrachteten Zeitraum von September 2019 bis August 2020 wurden damit aber in etwa 5.950 kWh Wärmeenergie erzeugt.

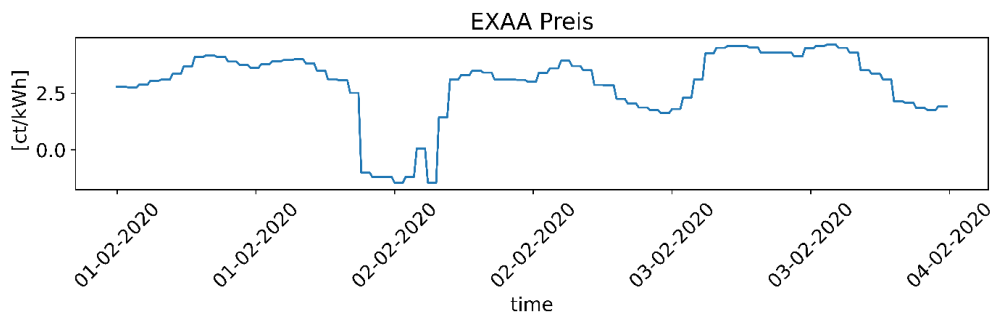


Abbildung 15: Verwendete EXAA-Preiszeitreihe für das betrachtete Energiesystem in Oberwart.

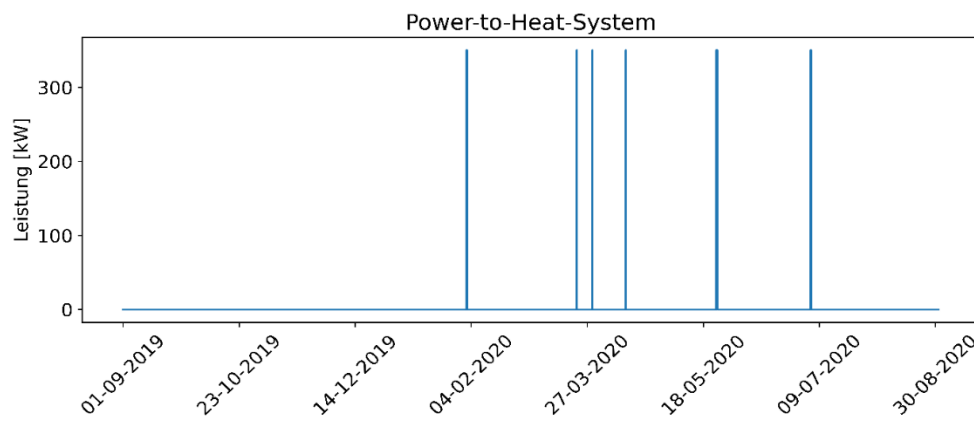


Abbildung 16: Einsatz des Elektroboilers im Fernwärmenetz Oberwart

Schlussfolgerung zu Kapitel 4.3:

Im Rahmen des Projektes *HeatPool* wurden wesentliche Erkenntnisse über den Einsatz von künstlicher Intelligenz zur Prognose von Temperaturdaten in Wärmespeichern und zur Prognose von Wärmelastgängen gesammelt. Die Prognose der Temperatur eines Wärmespeichers stellt eine große, Herausforderung dar, da gerade auf den Levels L_2 und L_3 die Mess- und Datenlage sehr schlecht ist und keine Detaildaten verfügbar sind. Die im Projekt entwickelte Methode unter Verwendung eines neuronalen Netzes war in der Lage, grundsätzliche Temperaturverläufe abzubilden, es entstanden aber dennoch teils substantielle Abweichungen. Hier gibt es einen entsprechenden Weiterentwicklungsbedarf.

Gerade auf Level L_3 stellt die schlechte Datenlage ein Problem dar, aus diesem Grund wurde eine nicht-invasive Methode für die Speichertemperaturermittlung entwickelt, die an einem Teststandort erprobt wurde. Die entwickelte Methode für Elektroboiler erfasst die Wasserentnahme und ermittelt über die Kaltwasserzufuhr und den gemessenen Strombedarf die im Speicher zugeführte Energiemenge.

Auf Level L_1 erzielten die Methoden für die Prognose des Wärmebedarfs in Wärmenetzen sehr gute Ergebnisse. Zum Einsatz kamen unterschiedliche Ansätze, wobei die Random Forest Methode, die besten Einzelergebnisse erzielte. Eine Kombination mehrerer Methoden war nur im Fall des Wärmenetzes Neusiedl von Vorteil, wenngleich die Wärmelast an sich tendenziell unterschätzt wird und gerade in den Sommermonaten die Prognose nicht in der Lage ist, die Volatilität des Bedarfs zu prognostizieren, wurde die Methode als ausreichend gut eingestuft.

4.4 Zusammenführung zu einem funktionierenden System

Die Ergebnisse der Bewertung der einzelnen Methoden boten die Grundlage für die Zusammenführung des Gesamtsystems. Die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Zusammenführung sind in diesem Kapitel zusammengefasst.

4.4.1 Übergeordnete Strategie

Die Realisierung des *HeatPool*-Systems wurde eine Simulation des übergeordneten Systems durchgeführt, anhand derer die wirtschaftlichen Vorteile des Flexibilitätseinsatzes dargestellt werden sollten. Wie in Kapitel 3.4.1 beschrieben, wurden zwei Varianten gerechnet. **Variante 1** zielt darauf ab, eine Optimierung anhand einer Day-Ahead Spotpreisprognose durchzuführen, wobei die Variante 1a die reine DA-Preisoptimierung ohne Berücksichtigung der Windproduktion darstellte. Bei der Variante 1b wurde ebenfalls eine DA-Preisoptimierung angewendet, jedoch erfolgte die Ladung der Speicher der Flexibilitäten nur bei vorhandener Windproduktion und ermöglichte die Nachladung bei einem Speicherstand von weniger als 20% der Nennkapazität. **Variante 2** konzentrierte sich auf die ursprüngliche Zielsetzung der Vermeidung von Ausgleichsenergiekosten.

Analysiert wurden die Stromkosten für die Wärmeerzeugung, wobei die Day Ahead-Preise die Grundlage für die Kostenbewertung bildeten. Berücksichtigt wurden die Jahre 2019 bis 2021 sowie die ersten beiden Monate von 2022. Dabei fällt der massive Preisanstieg Anfang 2022 auf. In Abbildung 17 sind die Stromkosten auf Basis der Day Ahead Preise dargestellt, dabei fällt auf, dass die **Variante 1a** in jedem Jahr die niedrigsten Kosten erzeugt, der Vergleich zum Basisszenario zeigt, dass eine Einsparung im Vergleich zu keiner Nutzung der Flexibilitäten gegeben ist.

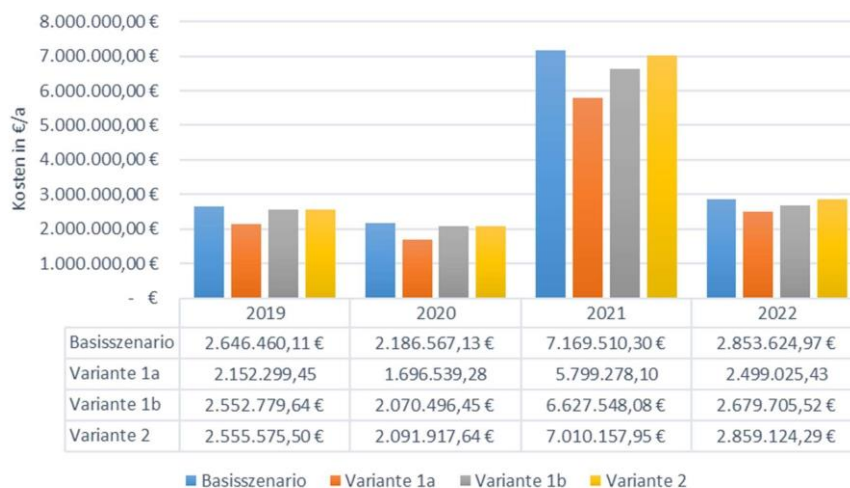


Abbildung 17: Stromkosten in den unterschiedlichen Varianten bei einem Stromeinkauf am DA-Markt

Die Kosten bezogen auf den Energieverbrauch für die Wärmeerzeugung sind in Abbildung 18 dargestellt. Aus der Grafik lassen sich die Trends der steigenden Strompreise ableiten, aber auch die vergleichsweise niedrigen Kosten der Variante 1a im Vergleich zu den anderen Varianten.

Werden für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit nicht die DA-Preise, sondern die Intraday-Preise herangezogen, ergibt sich ein ähnliches Bild, siehe Abbildung 19. Ein Unterschied ist, dass die Variante 2 in

Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

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

den Jahren 2019 und 2020 besser abschneidet als die Variante 1b, was bei Verwendung der DA-Preise nicht der Fall war.

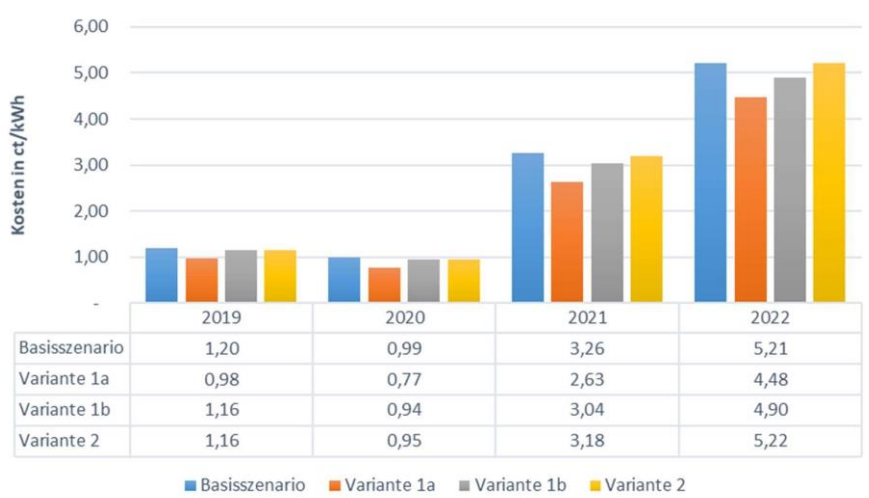


Abbildung 18: Resultierende Gestehungskosten zur Deckung des Wärmebedarfs

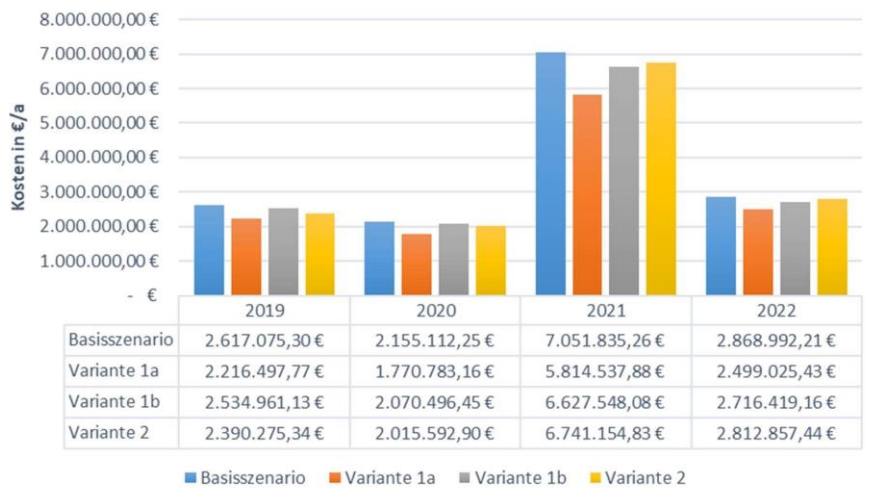


Abbildung 19: Stromkosten in den unterschiedlichen Varianten bei einem Stromeinkauf am ID-Markt

Bewertet wurde auch der Anteil des Windstroms, der für die Erzeugung der Wärme verwendet wurde, dieser ist in Abbildung 20 dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Variante 1b die höchsten Anteile an Winderzeugung erreicht. Die Verwertung von positiven Prognoseabweichungen (Variante 2) bringt hingegen teilweise sogar niedrigere Windenergieanteile hervor als die reine Day-Ahead Optimierung.

Neben der wirtschaftlichen Bewertung und der Bewertung der direkt genutzten Windkraft, war auch die Analyse der Reduktion an Ausgleichsenergie für das Projekt von großer Relevanz. In Abbildung 21 ist die vermiedene positive Abweichung zwischen der 24h Prognose und der 1h Prognose dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Variante 1a die Abweichungen erhöht, während die Variante 2, die speziell auf die Vermeidung von Abweichungen abzielt, diese deutlich verringert.

Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

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

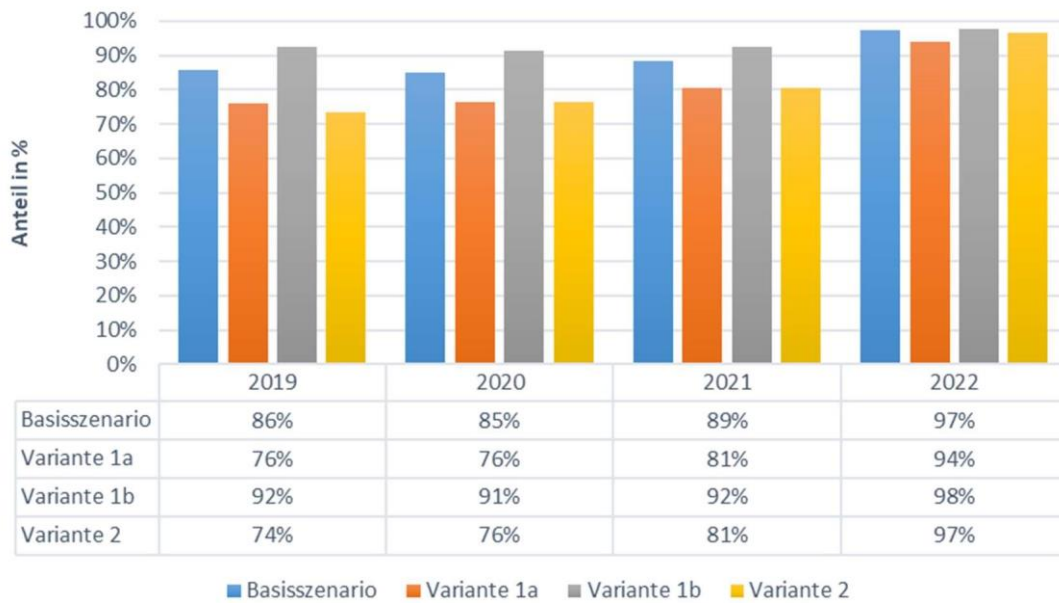


Abbildung 20: Anteil des Windstroms in der Wärmeerzeugung

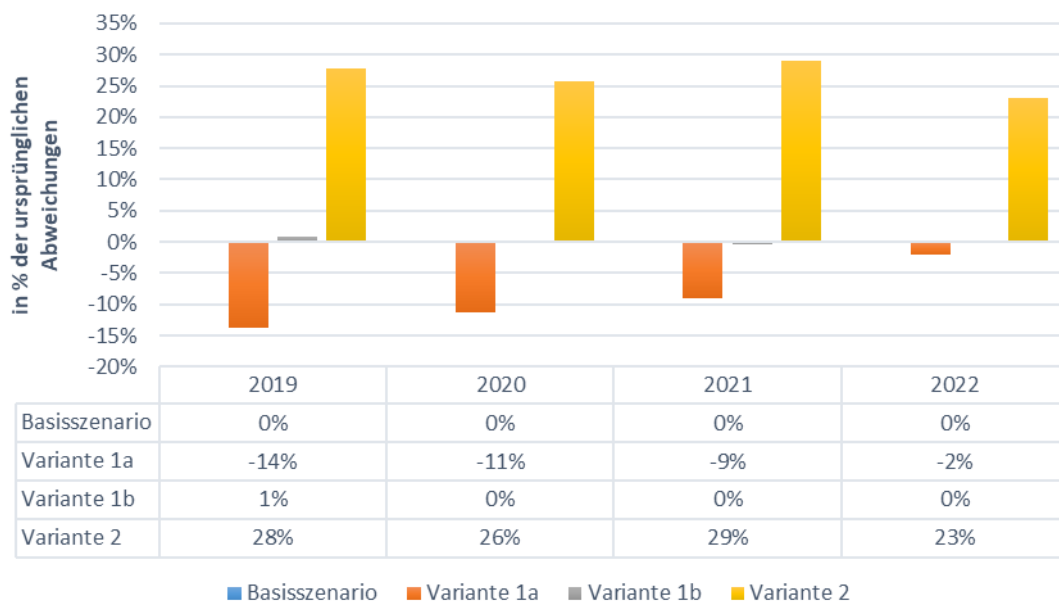


Abbildung 21: Vermiedene positive Abweichungen 24h/1h

Abschließend wurde noch ein Vergleich der bezogenen und gelieferten Ausgleichsenergie vor und nach Einsatz der *HeatPool*-Lösung angestellt. Dabei wurde festgestellt, dass jede der untersuchten Varianten zu einem Anstieg der Ausgleichsenergie führte. Diese Situation ist damit zu begründen, dass die definierten Varianten dem Ausgleichsenergiemanagement entgegenwirken. Bei einer Umsetzung des *HeatPool*-Systems wäre also eine Anpassung des Ausgleichsenergiemanagements notwendig. Darauf aufbauend wurde eine wirtschaftliche Analyse der Ausgleichsenergiefolgen durchgeführt. Dabei war zu berücksichtigen, dass wenn Ausgleichsenergie (AE) zu positiven Preisen bezogen wird, Kosten entstehen, wird AE bei negativen Preisen bezogen, entstehen Erträge. Umgekehrt verhält es sich bei AE-Einspeisung, hier entstehen Kosten negativen Preisen und Erträge bei positiven Preisen. Die

AE-Bilanz bildet die Summe aus Kosten und Erträgen. Ist die Bilanz negativ, überwiegen die AE-Kosten. Hierbei fällt auf, dass trotz höherer AE-Mengen die wirtschaftliche Bilanz der AE-Betrachtung für alle Varianten besser ausfällt als in der Basisvariante, wobei die Variante 2 hier am besten abschneidet, knapp gefolgt von Variante 1a.

4.4.2 Vorbereitung des Demonstrators

Datenanbindung an das Virtuelle Kraftwerk:

Der erste Schritt in der Vorbereitung des Demonstrators war die Anbindung der Flexibilitäten an das virtuelle Kraftwerk. Die Datenerfassung vor Ort wurde auf Level L₃ mittels Shelly Messsystemen realisiert. Für die Übertragung der Messdaten wurde ein MQTT-Broker eingerichtet, bei welchem das Shelly 1PM als Client eingerichtet wurde. Das Python-Skript, welches die Bewertung der Speicherkapazität durchführt und für die Ansteuerung der einzelnen Warmwasserspeicher verantwortlich ist, bezieht diese Daten und führt anhand der Daten die notwendigen Berechnungen durch. Des Weiteren kann das Python Skript ein Relais des Shelly 1PM ansteuern und damit eine Ladung des Speichers durchführen oder unterbinden. Das Python-Skript hat dabei eine Verbindung zum virtuellen Kraftwerk über eine OpenVPN-Verbindung mittels UPC UA. Der implementierte Datenaustausch ist in Abbildung 22 schematisch dargestellt.

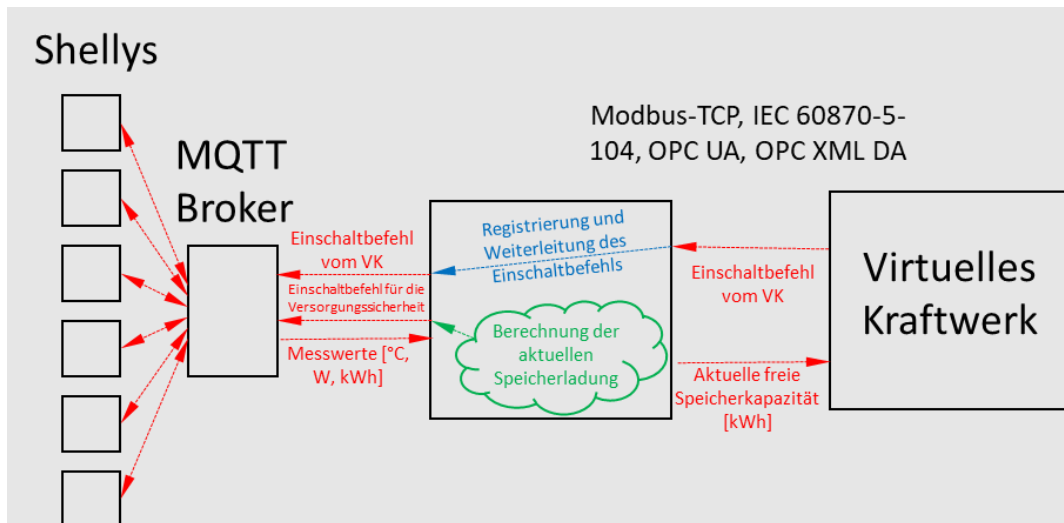


Abbildung 22: Ansteuerung der Shellys

Die umgesetzten Kommunikationskanäle für die beiden Levels L₃ und L₂ sind als Übersicht in der Abbildung 23 dargestellt.

Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

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

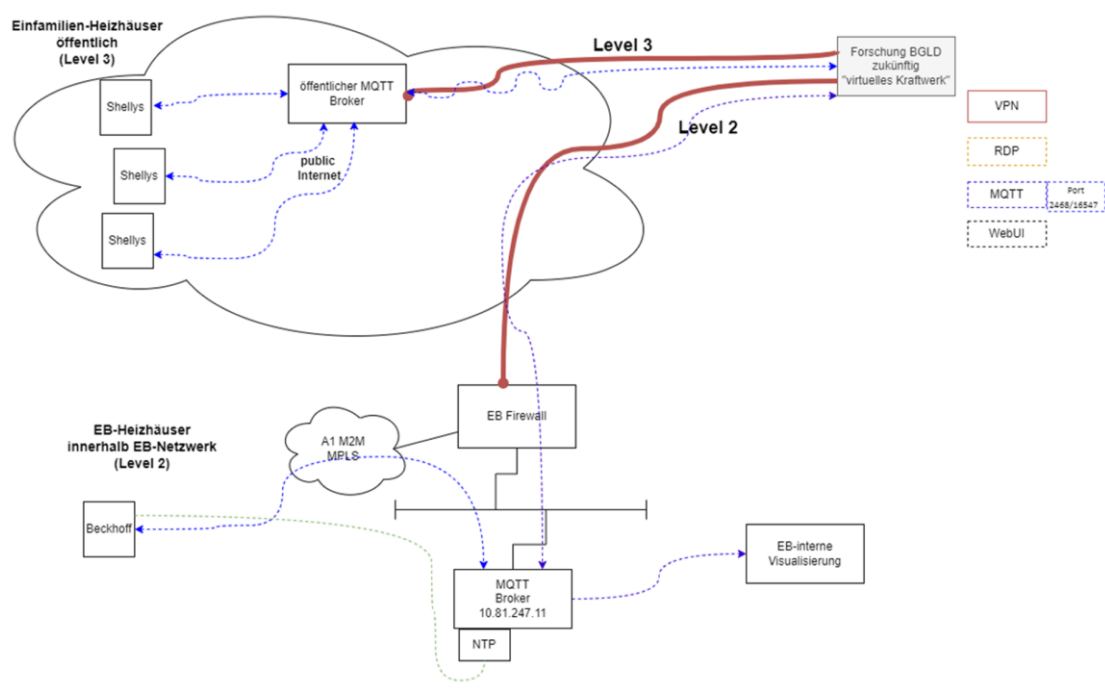


Abbildung 23: Einbindung von Level 2 und Level 3 über MQTT in das VK

Die Anbindung des Systems auf Level L₁ ist in Abbildung 24 dargestellt.

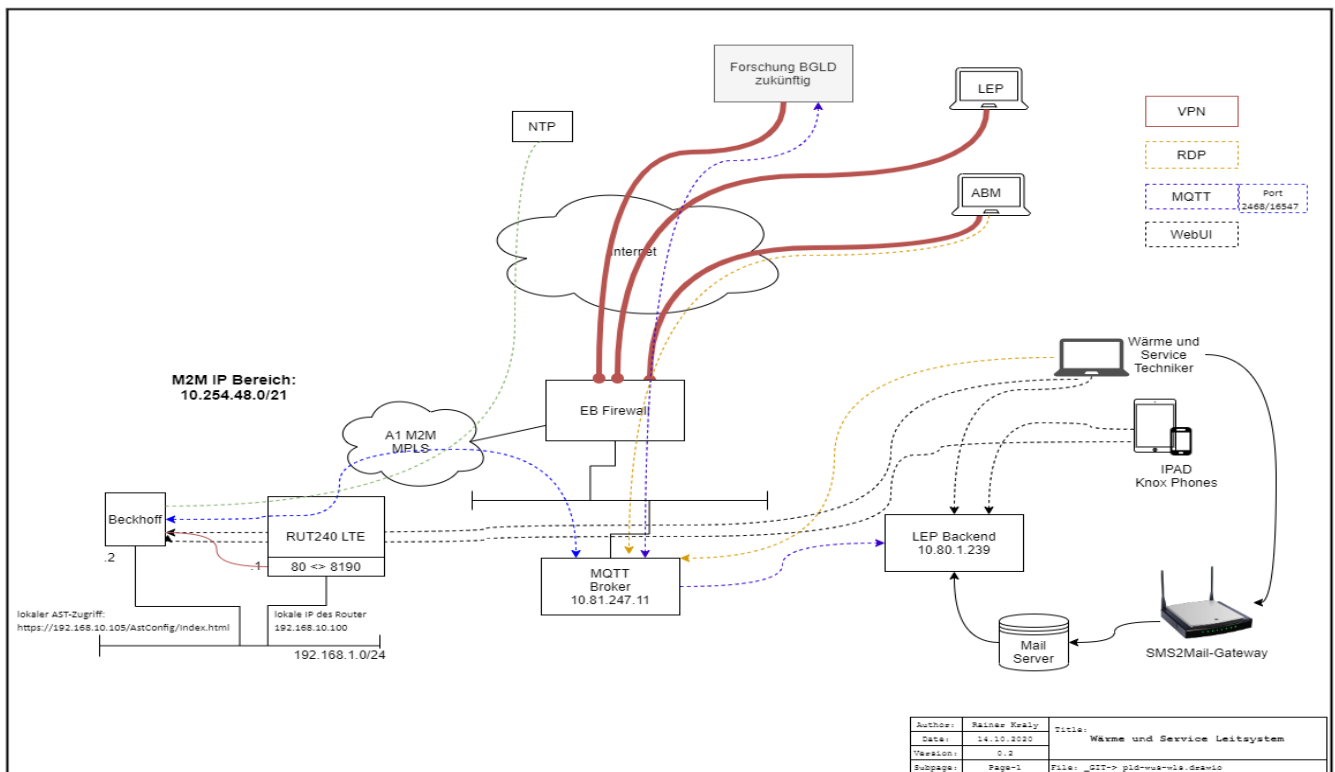


Abbildung 24: Datenflussdiagramm im Projekt "Heat water storage pooling" [Quelle: Burgenland Energie]

Das verwendete Optimierungsmodell, in Abbildung 24 als „Forschung BGLD zukünftig“ bezeichnet, nutzt aktuelle Winderzeugungs- und Fernwärmeprognosedaten, die von energy&meteo über eine API zur Verfügung gestellt wurden. Die Authentifizierung erfolgte durch OAuth 2.0 [26], wodurch ein Zugriffstoken bereitgestellt wird. Mit diesem Token und Benutzerdaten werden Datenanfragen über das API getätigt [27]. Die Abfrage erfolgt über eindeutige Identifikationsnummern (Entity IDs) für Anlagen, und es

ist möglich, mehrere Zeitreihen in einer Anfrage zu erhalten. In *HeatPool* werden wiederholte Abfragen für rollierende Optimierungsmodelle benötigt. *energy&meteo* ermöglicht bedingte Abfragen basierend auf HTTP ETag und dem If-None-Header [28], wodurch nur geänderte Daten übertragen werden, was Bandbreiteneinsparungen ermöglicht. Die Kommunikation zwischen Heizhaussteuerungsgeräten, dem Visualisierungsbackend und externen Teilnehmern und Teilnehmerinnen erfolgt über eine MQTT-Schnittstelle. Alle Teilnehmer und Teilnehmerinnen innerhalb der Firewall befinden sich in einem eigenen VPN-Netzwerk der Burgenland Energie. Der "Forschung BGLD zukünftig" kann über einen VPN-Tunnel auf den MQTT-Broker zugreifen und sich verifizieren. Die Optimierungsergebnisse werden einem virtuellen Kraftwerk zur Verfügung gestellt, um einen kostenminimierten Fahrplan für die Ansteuerung der Warmwasserboiler vorzuschlagen. Diese können übernommen oder angepasst werden.

Demonstrator Level L₁

Für die Umsetzung des Demonstrators wurde das Fernwärmekraftwerk Neusiedl ausgewählt. Der Demonstrator bot den Vorteil, dass eine Messung der Speicherstände mit mehreren Messsensoren und online möglich war, siehe Abbildung 25.

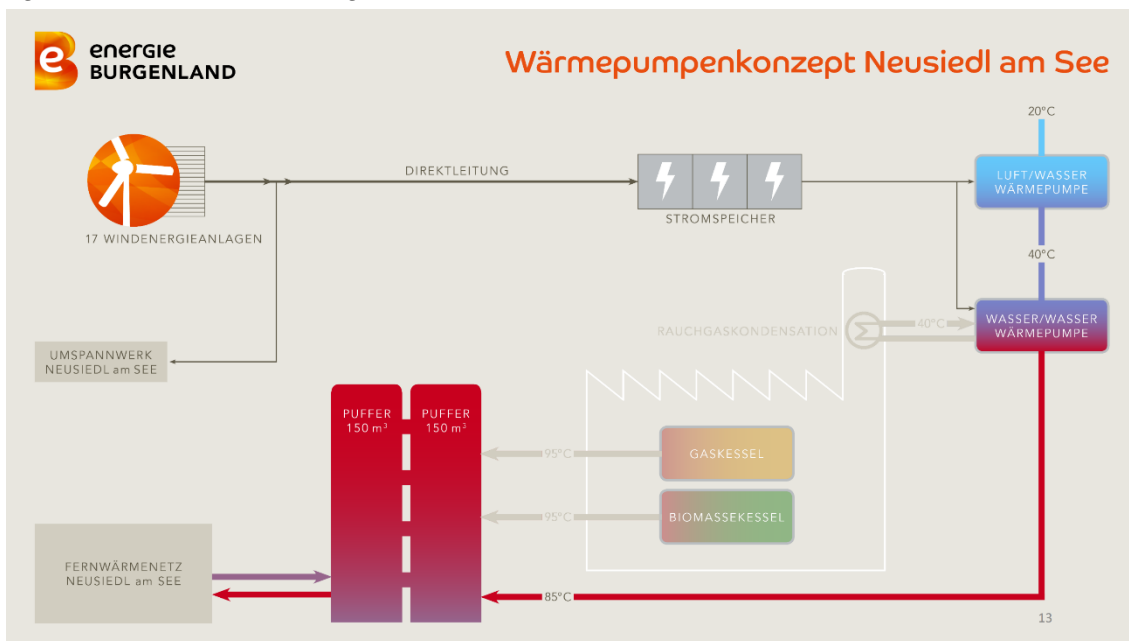


Abbildung 25: Wärmepumpenkonzept Neusiedl am See

Des Weiteren standen am Demonstrator Leistungsdaten von sowohl Wärme als auch Strom der Wärmepumpen, des Gaskessels sowie des Biomassekessels zur Verfügung. Für das Wärmenetz stand nur ein Wärmemengenzähler zur Verfügung, für die Netzpumpe lediglich ein Stromzähler.

Demonstrator Level L₂

Für die Umsetzung des *HeatPool*-Systems auf dem Level L₂ war es geplant, mehrere Wärmepumpen von Wohnungsanlagen der Oberwarter Siedlungsgenossenschaft im Burgenland anzusprechen. Die Wohnungsanlagen unterschieden sich maßgeblich hinsichtlich der technischen Ausgestaltung der „Heizräume“. Abbildung 26 bis Abbildung 28 zeigen den Aufbau der technischen Anlage 1, Anlage 2 sowie Anlage 3 der Oberwarter Siedlungsgenossenschaft, die für den Systemtest herangezogen wurden. Der Systemtest sah vor, die Kommunikation zu den Wärmepumpen zu erproben (das Anbindungssystem

Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

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

wurde in Abbildung 23 dargestellt), sowie den Algorithmus für die Bewertung der Speicherkapazität zu erproben

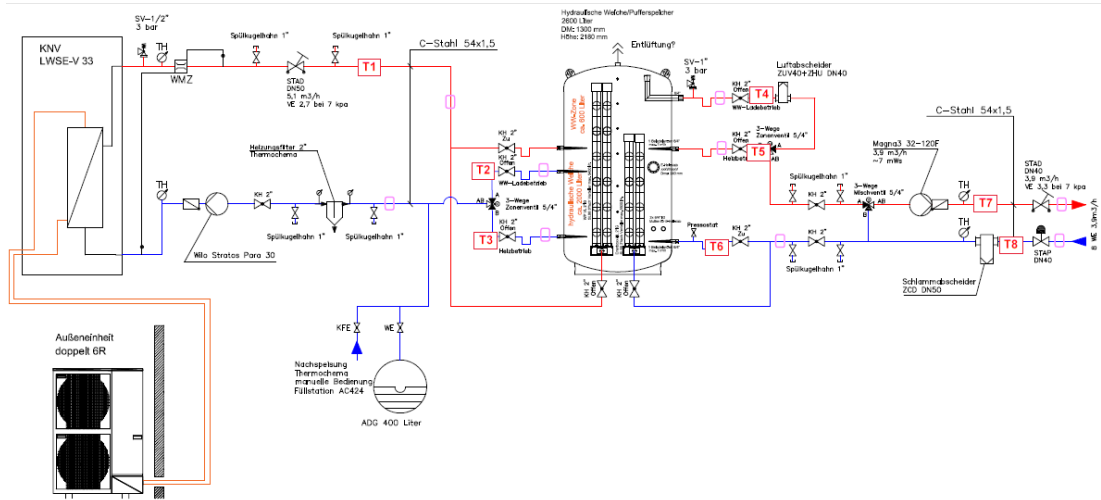


Abbildung 26: Technischer Aufbau der Anlage 1 für den Funktionstest der Flexibilitäten auf Level L2

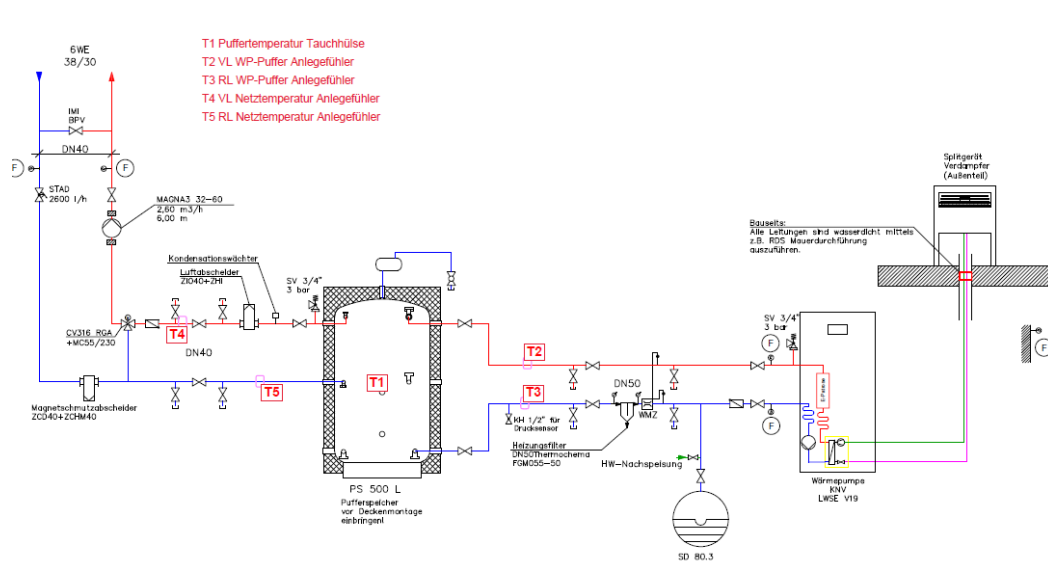


Abbildung 27: Technischer Aufbau der Anlage 2 für den Funktionstest der Flexibilität auf dem Level L2

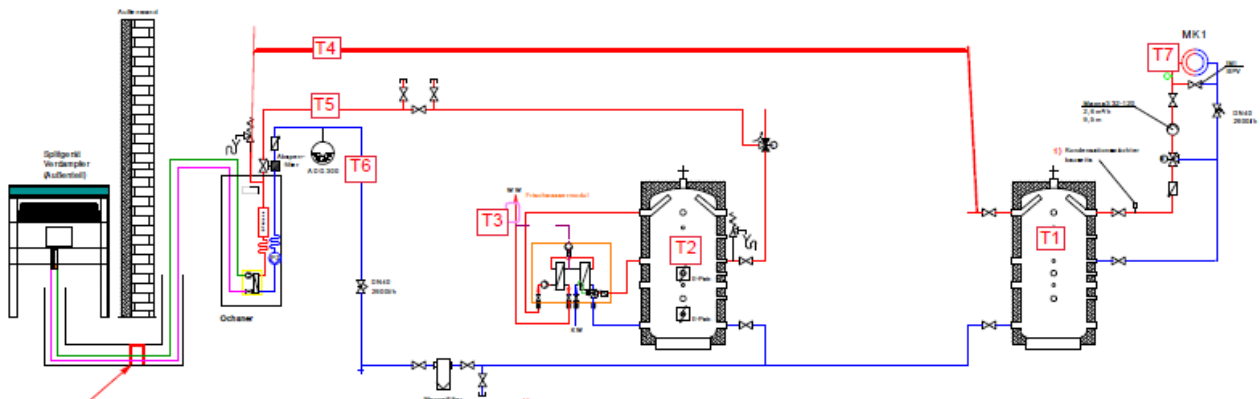


Abbildung 28: Technischer Aufbau der Anlage 3 für den Funktionstest der Flexibilität auf dem Level L2

Demonstrator Level L3

Das erste im Projekt getestete System war ein Speicher auf Level L₃. Dafür wurde beim Projektpartner PINK GmbH ein Testsystem aufgebaut und angesteuert, siehe Abbildung 29. Des Weiteren wurden zwei Haushalte an das System angebunden und getestet. Die geplante Anzahl von 30 Haushalten konnten aufgrund der Komplexität des Einbaus und des mangelnden Interesses an der tatsächlichen Umsetzung nicht erreicht werden.

Zur Erfassung und Kommunikation der Messdaten kam ein Shelly 1PM zum Einsatz, erfasst wurden die Umgebungstemperatur, die Kaltwassertemperatur sowie die von Shelly 1PM aufgenommene elektrische Leistung. Weiters wurden die Kaltwassertemperatur, die Warmwassertemperatur sowie die elektrische Leistung mit Referenzmesssystemen aufgezeichnet. Das Shelly 1PM besitzt darüber hinaus ein Relais, das das Schalten des Boilers ermöglicht. Im Betrieb der Testanwendung wurden drei unterschiedliche Betriebsmodi erprobt:

- **Initialisierungsbetrieb:** Beim Start des Algorithmus ist die aktuelle Speicherladung unbekannt. Das Relais (Shelly) bleibt zunächst stets geschlossen. Der Betrieb endet bei abrupem Leistungsabbruch, was die Vollladung anzeigt.
- **Kalibrierungsbetrieb:** Dieser zielt darauf ab, den Zusammenhang zwischen Warmwassertemperatur und entnommener Wärmemenge zu ermitteln. Nach Vollladung startet die erste Phase mit geöffnetem Relais und dimensionsloser Flächenberechnung. Bei Erreichen eines definierten Werts wird das Relais geschlossen. Die Phase endet mit der Vollladung und ermöglicht eine erste Abschätzung der Speicherkapazität. In der zweiten Phase wird die aktuelle Speichertemperatur berechnet, und das Relais wird bei Unterschreitung eines Grenzwerts geschlossen. Der Kalibrierzeitraum ist begrenzt.
- **Normalbetrieb:** Der Zusammenhang zwischen Flächenberechnung und Wärmemenge ist bekannt. Anhand der berechneten Speichertemperatur wird das Relais durch eine 2-Punkt-Regelung geschaltet. Ab dieser Phase steht die Flexibilität des Wärmespeichers dem *HeatPool* in vollem Umfang zur Verfügung.



Abbildung 29: Aufbau des Testsystems beim Projektpartner PINK GmbH

Um den Anforderungen der Nutzer und Nutzerinnen nach einem sicheren Betrieb der Warmwasserbereitung Folge zu leisten, wurde ein automatischer Reset des Systems etabliert, der bei Ausfällen Systems aktiviert wird. Es wurden zwei Arten von Ausfällen definiert, der Ausfall der Datenverbindung

und der Ausfall der Stromversorgung, die beide unterschiedliche Implikationen für die übermittelten Daten haben. In beiden Fällen wird der Algorithmus neu gestartet, wenn der Ausfall während der Initialisierung oder Kalibrierung stattfindet. Im Normalbetrieb wird der Speicher nach der Wiederinbetriebnahme sofort vollbeladen. Um Sicherzustellen, dass das System bei einer Unterbrechung der Datenverbindung für den Anwender bzw. die Anwenderin weiterhin ordnungsgemäß funktioniert, wird das Shelly 1PM-Relais standardmäßig geschlossen gehalten, außer das Python Skript schickt ein entsprechend anderes Signal.

Schlussfolgerung zu Kapitel 4.4:

Bei der Zusammenführung der einzelnen Komponenten zu einem funktionierenden System zeigten sich erste kapitale Probleme in der Umsetzung. Die Anbindung an die Komponenten auf den einzelnen Level L_1 bis L_3 war zwar technisch möglich und hat auch weitestgehend funktioniert, jedoch war diese mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Je Level musste eine individuelle Art der Anbindung gewählt werden und teilweise innerhalb eines Levels unterschiedliche Ansätze verfolgt werden. Auf den Levels L_1 und L_2 stellte die Auswahl der Demonstratoren an sich keine maßgebliche Herausforderung dar. Es konnten Demonstrationsobjekte identifiziert und adressiert werden, auch die Erhebung der Daten und Infrastruktur vor Ort erfolgte ohne Probleme, sodass die Grundlagen für die Demonstration geschaffen werden konnten.

Anders stellte sich die Situation auf Level L_3 dar. Von der anfänglichen Motivation möglicher Interessenten und Interessentinnen war zum Zeitpunkt der Umsetzung der Demonstratoren nicht mehr viel übrig. Trotz umfassender Maßnahmen des Konsortiums zur Aktivierung von Kunden und Kundinnen gelang es nicht die gewünschten 30 Haushalte für die Demonstration zu gewinnen. Stattdessen wurden nur 3 Haushalte für die Demonstrationsphase so weit vorbereitet, dass sie im Demonstrationsbetrieb erprobt werden können. Dadurch war zwar die Auswirkung des Flexibilitätsabrufs im Cluster auf Level L_3 deutlich reduziert, für einen „Proof of Concept“ war die Anzahl an Kunden und Kundinnen jedenfalls ausreichend.

Aus der Zusammenführung der Komponenten lässt sich damit schlussfolgern, dass die Umsetzung des *HeatPool*-Ansatzes auf allen drei Levels der Flexibilitätsbereitstellung umsetzen lässt. Die notwendigen Einzelkomponenten, sowie die übergreifende Kommunikationsarchitektur sind vorhanden. Auch die übergeordnete Regelstrategie wurde anhand eines vereinfachten Modells getestet. Die Variante des Flexibilitätseinsatzes zur Optimierung der DA-Preise unter ausschließlicher Verwendung von Windenergie hat sich hier als beste Option herausgestellt.

4.5 Demonstrationsphase

Demonstrationsbetrieb auf Level L_1 :

Ein Auszug der Optimierungsergebnisse für das Fernwärmenetz Neusiedl ist in Abbildung 30 dargestellt. Darin wird für die Monate Jänner bis März 2023 dargestellt, wie viel Energie aus Biomasse notwendig ist, um den Heizwärmebedarf zu decken. Die Ergebnisse zeigen, dass die Einbindung der Wärmepumpe als Flexibilität den Bedarf an Biomasse reduzieren. Unterschieden wird zwischen zwei Szenarien, in einem Szenario wird die Wärmepumpe nur aktiv eingeschaltet, im anderen Szenario wird die

Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

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

Wärmepumpe auch aktiv ausgeschaltet. Aufgrund der Einschaltkonditionen für die Wärmepumpe wird in beiden Szenarien teure Biomasse durch günstigen Strom in der Wärmeerzeugung ersetzt. Eine detaillierte Betrachtung einzelner Tage zeigt aber auch, dass es zu Situationen kommen kann, in denen der Biomasseverbrauch sogar höher ist als ohne den Einsatz der Wärmepumpen, wie in Abbildung 31 ersichtlich.

Aufgrund der verfügbaren Daten und unter Anwendung des Optimierungsmodells war es auch möglich, die detaillierten Verläufe der Leistungskurven von sowohl Biomasse-Heizwerk als auch Wärmepumpen darzustellen. In der Abbildung 32 und Abbildung 33 sind die Leistungsverläufe des Biomasse-Heizwerkes und der Wärmepumpen-Kaskaden für zwei unterschiedliche Tage dargestellt.

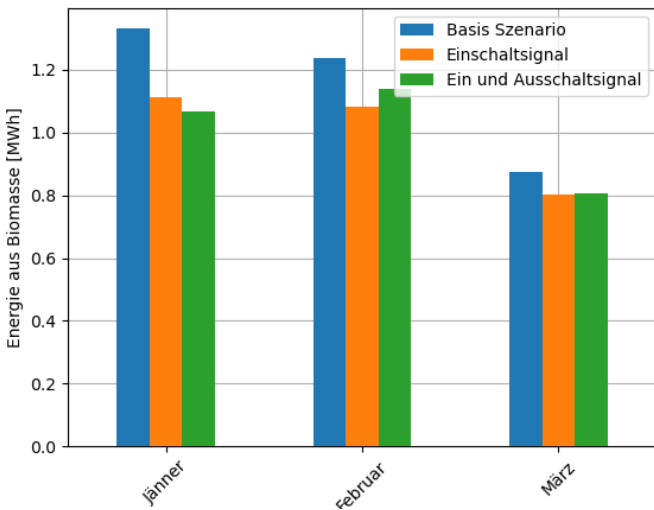


Abbildung 30: Erzeugte thermische Energie aus Biomasse, Monatsansicht Februar bis März 2023

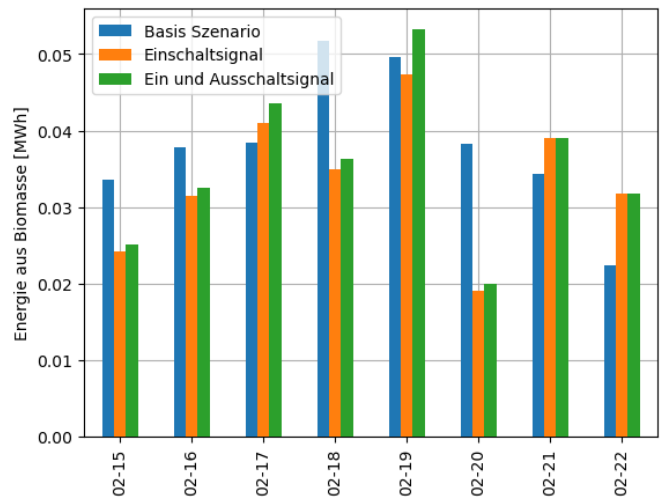


Abbildung 31: Erzeugte thermische Energie aus Biomasse, Tagesansicht Februar 2023

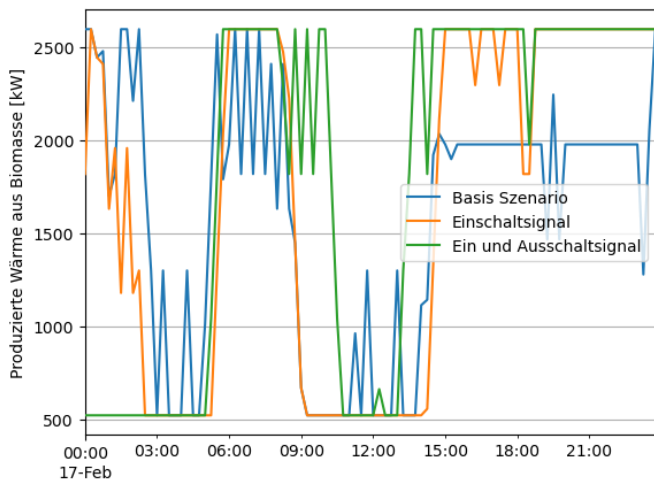


Abbildung 32: Detailanalyse der thermischen Leistung des Biomasse-Heizwerkes für den 17. Februar 2023

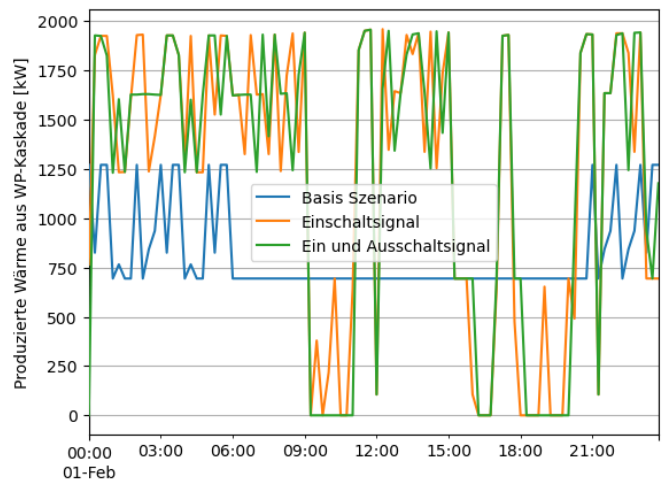


Abbildung 33: Detailanalyse der thermischen Leistung der WP-Kaskade für den 01. Februar 2023

Demonstrationsbetrieb auf Level L₂:

Die entwickelte Schnittstelle zwischen der Flexibilität auf Level L₂ und dem virtuellen Kraftwerk konnte erfolgreich getestet werden. Die Datenübertragung war sehr stabil und die gemessenen Temperaturwerte konnten über einen längeren Zeitraum ausgelesen und im virtuellen Kraftwerk verarbeitet werden.

Ein Auszug der Daten aus den drei Anlagen ist in den Abbildungen Abbildung 34 bis Abbildung 36 dargestellt.

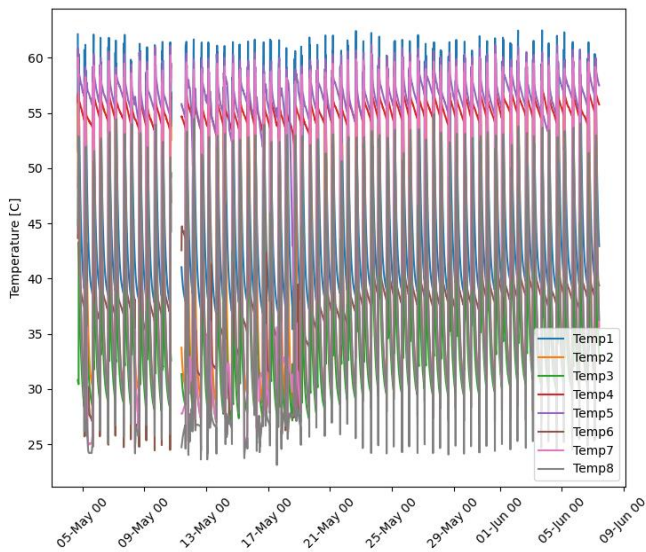


Abbildung 34: Temperaturmesswerte der Anlage 1

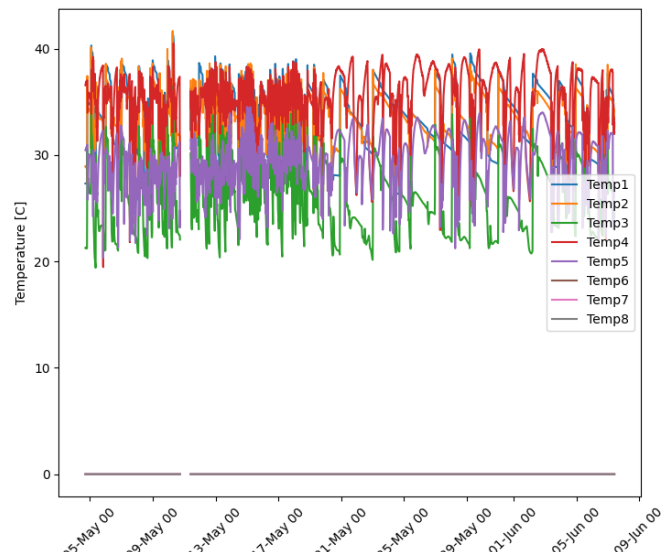


Abbildung 35: Temperaturmesswerte der Anlage 2

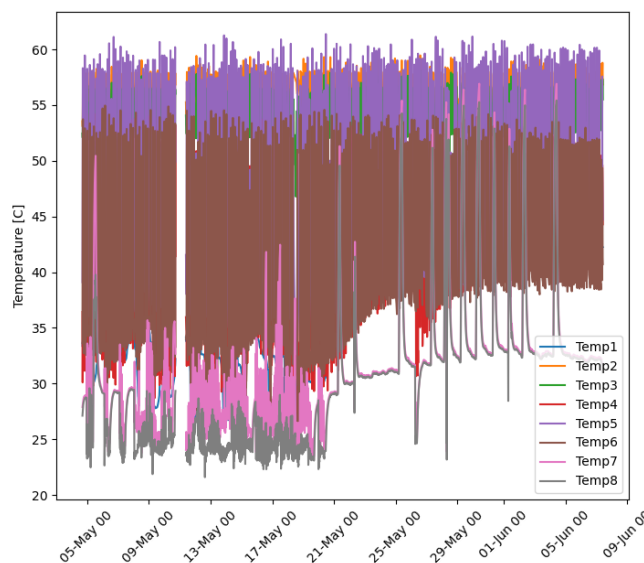


Abbildung 36: Temperaturmesswerte der Anlage 3

Trotz der sehr gut funktionierenden technischen Anbindung der Wärmepumpen an das virtuelle Kraftwerke konnten keine Steuersignale zwischen Virtuellem Kraftwerk und den Wärmepumpen ausgetauscht werden. Die Recherche zu den technischen Gegebenheiten der Wärmepumpen hatte zwar ergeben, dass diese sich über eine SG-Ready Schnittstelle ansteuern ließen, jedoch konnte diese Ansteuerung in der Praxis nicht ohne Weiteres realisiert werden. Es wäre notwendig gewesen, die einzelnen SG-Ready Schnittstellen der Anlagen zu konfigurieren und die Schnittstellen an das virtuelle Kraftwerk manuell einzurichten. Dieser Prozess konnte jedoch im Projektverlauf erst sehr spät gestartet werden und ist dann schlussendlich aufgrund mangelnder zeitlicher Ressourcen nicht möglich gewesen. Dennoch hat die Demonstration gezeigt, dass eine Anbindung der Technologien grundsätzlich möglich ist, und die Methoden für die Bewertung der verfügbaren Flexibilitäten verfügbar sind.

Demonstrationsbetrieb auf Level L₃:

Die entwickelte Schnittstelle zwischen den Flexibilitäten auf Level L₃ und dem Virtuellen Kraftwerk konnte ebenfalls erprobt werden, jedoch traten hier in der Kommunikation Probleme auf. Grundsätzlich konnte auf dem Level L₃ die bidirektionale Kommunikation erfolgreich getestet werden. Es wurden Messsignale empfangen, die Bewertung der Speicherkapazität durchgeführt und Schaltsignale an die Relais der bei den Boilern verbauten Shellys gesendet, auf die die Boiler auch reagierten. Dennoch kam es bei zwei der drei Demonstrationsstandorte zu regelmäßigen Unterbrechungen in der Datenübertragung. Der Algorithmus zur Bestimmung der freien Speicherkapazität der Flexibilitäten auf Level L₃ benötigt mindestens alle 120 Sekunden einen Input der Messgeräte, idealerweise wird alle 30 Sekunden ein Messwert übermittelt. Bei der Anlage 1 war die Signaldichte deutlich reduziert. Es wird vermutet, dass diese Situation auf Unterbrechungen des WLAN bei dem Kunden bzw. der Kundin zurückzuführen war. Abbildung 37 zeigt den Verlauf der Messwerte und die ermittelte freie Kapazität des Speichers. In den Abbildungen sind die großen Lücken in der Datenübertragung ersichtlich. Diese Anlage war für die finale Anbindung an das *HeatPool*-System demnach nicht nutzbar.

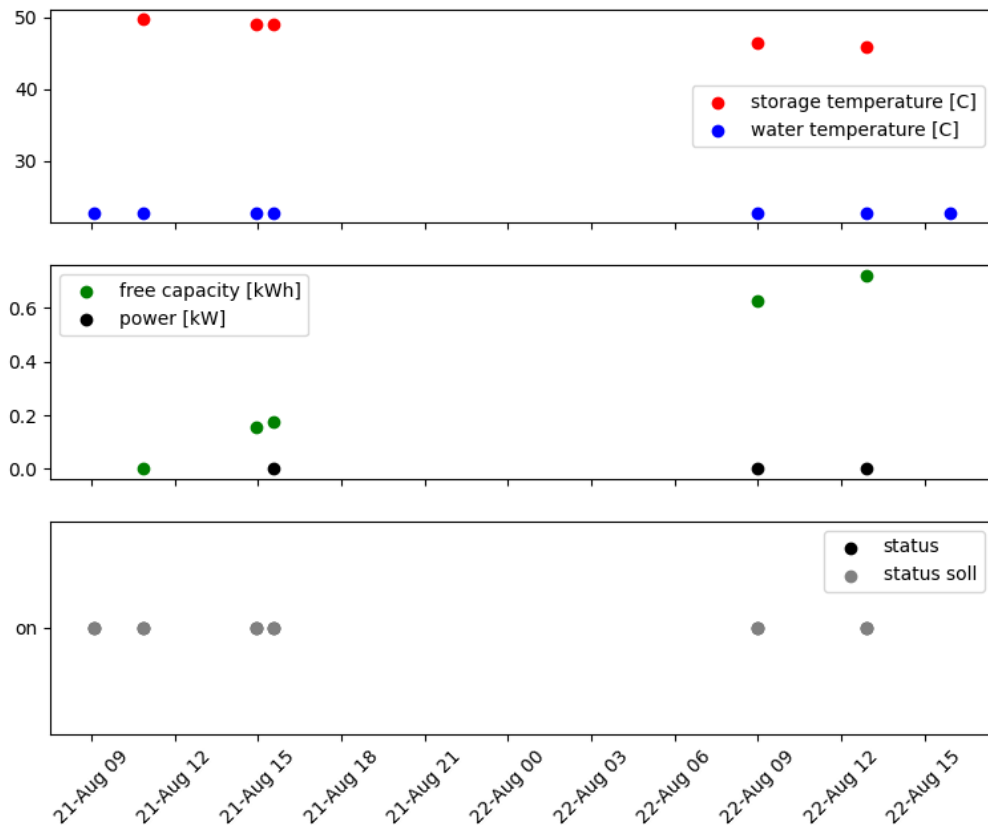


Abbildung 37: Darstellung der Signaldichte der Anlage 1 im Zeitraum von 21. August um 09:00 bis 22. August um 15:00: die Signaldichte ist zu klein, um die Speicher

Bei der Anlage 2 traten ähnliche Probleme, aber in entschärfter Form auf. Tagsüber wurde eine gute Signaldichte erreicht, wie in Abbildung 38 dargestellt. In der Nacht wurden jedoch keine Signale übermittelt, was daran liegen könnte, dass die Nutzerin bzw. der Nutzer über Nacht das Internet oder WLAN deaktiviert. Für die Kalibrierung des Systems wäre es jedoch notwendig, dass Daten über einen Zeitraum von 48 Stunden durchgehen übermittelt werden. Damit war es für diese Anwendung nicht möglich, die Kalibrierung durchzuführen. Was wiederum dazu führte, dass die finale Anbindung an das *HeatPool*-System nicht möglich war.

Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

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

Von einer Kontaktaufnahme mit den betroffenen Personen wurde Abstand genommen, weil das Nutzer- und Nutzerinnenverhalten bzw. die technischen Probleme über einen längeren Zeitraum verfolgt werden sollten, um die Anwendbarkeit der technischen Lösung in einem realen Umfeld zu erproben und aufzuzeigen, welche Probleme es in der Anwendung gibt.

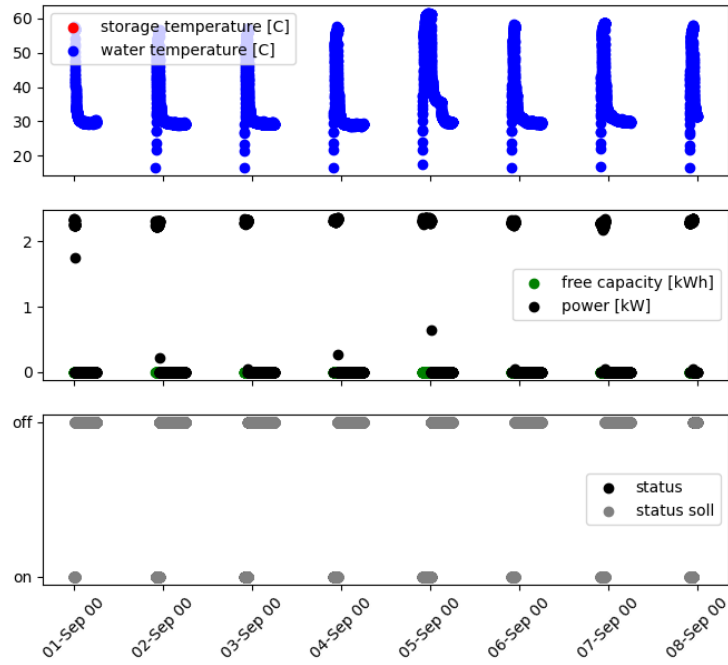


Abbildung 38: Darstellung der Signaldichte bei der Anlage 2 im Zeitraum von 1. September bis 8. September: Das WLAN des Nutzers, der Nutzerin wurde jede Nacht ausgeschaltet.

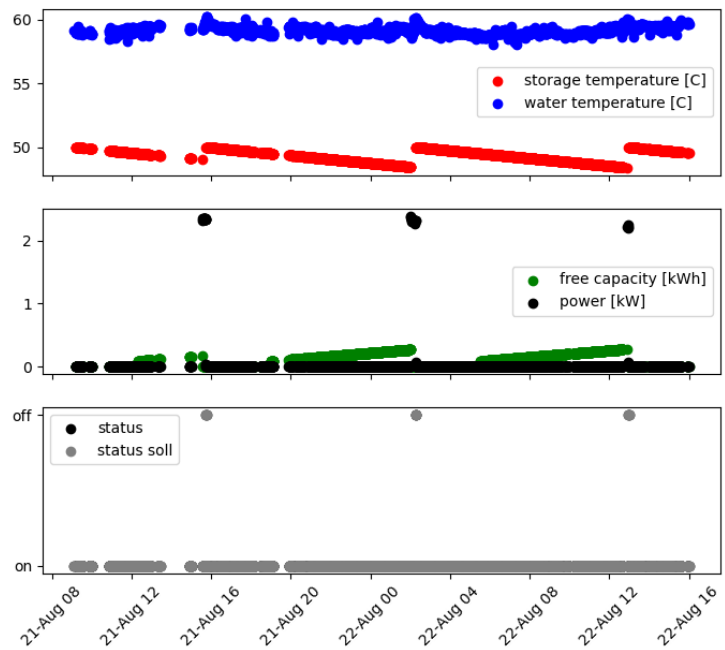


Abbildung 39: Darstellung der Signale von der Anlage 3 im Zeitraum von 21. August um 08:00 bis 22. August um 16:00. Die Kaltwassertemperatur schwankt um die 60 °C.

Auch bei der Anlage 3, die im Rahmen des Demonstrationsbetriebes getestet wurde, kam es zu Problemen. Die Signaldichte war sehr gut, die Daten wurden in der notwendigen Frequenz und mit einer

ausreichenden Verfügbarkeit übermittelt. Jedoch wurde bei der Auswertung der Daten festgestellt, dass der Messsensor zur Erfassung der Wasserentnahme zu nah am Boiler installiert worden ist. Dadurch kam es zu einer Erwärmung des Wassers an der Messstelle wegen der hohen Temperatur im Boiler.

In Abbildung 39 ist zu sehen, dass die Temperatur des angebrachten Sensors (blau in der obersten Reihe der Abbildung) immer um die 60 °C schwankt, was die Detektion einer Zapfung, und im Weiteren die Bestimmung der Temperatur im Speicher unmöglich macht.

Schlussfolgerung zu Kapitel 4.5

Die schlussendliche technische Umsetzung und der längerfristige Betrieb des *HeatPool*-Systems gestalteten sich deutlich schwieriger als gedacht. Auf Level L₁ konnten zwar technische Daten aus dem Betrieb des Wärmenetzes gewonnen werden, jedoch erfolgte die vollständige Einbindung in das Virtuelle Kraftwerk nicht, da es keine finale Zustimmung von den Netzbetreibern bzw. Netzbetreiberinnen für die Einbindung gab. Auf dem Level L₂ war die Datenanbindung an das virtuelle Kraftwerk kein Problem, von allen drei Versuchsanlagen wurden Daten in einer guten Dichte und mit hoher Zuverlässigkeit über die entwickelten Schnittstellen übertragen, jedoch konnten keine Steuersignale an die Flexibilitäten geschickt werden. Zwar verfügten die Wärmepumpen über SG-Ready Schnittstellen, jedoch wären diese jeweils individuell zu konfigurieren gewesen. Dieser Aufwand konnte aufgrund zeitlichem und personellem Ressourcenmangel nicht getätigt werden. Auf Level L₃ stellte die Anbindung an sich bereits Probleme dar, da bei zwei der drei Flexibilitäten die Datenübertragung regelmäßig unterbrochen wurde und deswegen kein Kalibrierungsbetrieb möglich war. Bei der dritten Anlage wurde der Messpunkt nicht ideal installiert, weshalb es zu Verfälschungen der Messwerte kam.

Generell kann das Fazit gezogen werden, dass die tatsächliche Umsetzung des Systems sich in der Praxis als ausgesprochen schwierig herausstellte. Die Hauptgründe waren mangelndes Umsetzungsinteresse bei den Betreibern und Betreiberinnen der Flexibilitäten, Kompatibilitätsprobleme bei Schnittstellen für die Ansteuerung von Flexibilitäten und Probleme bei der Datenübertragung durch die Unterbrechung der Internetanbindung bei den einzelnen Nutzern und Nutzerinnen und der falschen Installation der Komponenten vor Ort.

5 Ausblick und Empfehlungen

Die Ergebnisse des *HeatPool*-Projektes haben gezeigt, dass die technische Anbindung von Flexibilitäten auf unterschiedlichen Levels technisch möglich ist. Die Erkenntnisse aus dem Datenaustausch von vor Ort gemessenen Daten in einem zentralen System zur Steuerung der Komponenten ist ebenfalls möglich, was eine gute Basis für weitere Arbeiten in diesem Segment darstellt. Aufgrund der Rahmenbedingungen und der Verzögerungen im Projekt konnte die Demonstrationsphase nicht im vollen Ausmaß gestartet und umgesetzt werden.

Auf dem Level L₁ konnte ein Bedarf in der **Incentivierung von Netzbetreibern und Netzbetreiberinnen** festgestellt werden. Es wird notwendig sein, in zukünftigen Forschungsprojekten einen größeren Anreiz zu schaffen, damit Netzbetreibern und Netzbetreiberinnen von Fernwärmenetzen ein höheres Interesse an der Bereitstellung ihrer vorhandenen Flexibilitäten haben. Hier könnte ein zusätzlicher Aufwand in die

Entwicklung von Geschäfts- und Betriebsmodellen gesteckt werden. Die zunehmende Elektrifizierung der Wärmeerzeugung, vor allem bei Fernwärmenetzen bietet ein Potenzial für die **Weiterentwicklung von Methoden zur Bündelung und Nutzung** dieser Flexibilitäten. Der Proof of Concept in *HeatPool* hat gezeigt, dass die Datenanbindung dieser Flexibilitäten an eine zentrale Steuerung kein Problem darstellt, damit wäre hier ein erhebliches Potenzial gegeben.

Auf dem Level L₂ besteht ein erheblicher Forschungsbedarf in der **Standardisierung der technischen Anbindung zur Steuerung der Wärmepumpen**. Die Smart Grid Ready Schnittstelle bietet zwar die grundsätzliche Möglichkeit zur Steuerung, jedoch ist diese Ansteuerung aufgrund der unterschiedlichen technischen Umsetzungen bei den Anlagen und der Notwendigkeit der manuellen erstmaligen Aktivierung der SG-Ready Schnittstelle nicht ohne weiteres möglich. Die Entwicklung entsprechender **technischer Konzepte für den Einbau der Geräte** unter Berücksichtigung einer etwaigen Anbindung an ein übergeordnetes System ist zu bedenken.

Auf dem Level L₃ gibt es ein erhebliches Verbesserungspotenzial, einerseits gilt es ähnlich wie auf Level L₁ **Anreize für die Bereitstellung der eigenen Flexibilität** zu steigern. Dafür müssen entsprechende Beteiligungsmodelle entwickelt werden. Auch besteht ein Bedarf in der **Erforschung der Beweggründe und Motivationen von Personen an der Bereitstellung von Flexibilitäten**. Auf technischer Ebene wurde ein non-invasive Methode zur Abschätzung der freien Kapazität von Wärmespeichern entwickelt. Diese Methode weist ein hohes Potenzial auf, hat aber auch noch ein Weiterentwicklungspotenzial. Es Bedarf einer **Untersuchung hinsichtlich der Positionierung der Sensoren und des Kalibrierungsprozesses**, um die notwendige Zeit für eine Kalibrierung zu verkürzen. Weiters wäre zu empfehlen, dass die Anbindung der Mess- und Schaltgeräte nicht über das private Internet der Nutzer und Nutzerinnen erfolgt, da es hier regelmäßig zu Ausfällen kommen kann.

Hinsichtlich der übergeordneten Regelstrategie konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass der Einsatz der vorhandenen Flexibilitäten einen Mehrwert für das System bietet. Hier besteht jedoch noch ein Bedarf, dass die einzelnen entwickelten Lösungen auch hinsichtlich ihrer Skalierbarkeit untersucht werden.

6 Literaturverzeichnis

- [1] J. Paeck, T. Nacht, M. Schöny, und M. Tragner, „Vorstellung des Projektes Vorzeigeregion Energie – Windvermarktung“, in *Kurzfassungsband: Klimaziele 2050: Chancen für einen Paradigmenwechsel*, Wien, Österreich: Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe der TU Wien, Feb. 2017, S. 361.
- [2] B. Aust, „Erneuerbare Energien an Strombörsen, eine empirische Analyse deutscher und europäischer Spothandelsmärkte“, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, Germany, 2020. Zugegriffen: 30. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://tubaf.qucosa.de/landing-page/?tx_dlf\[id\]=https%3A%2F%2Ftubaf.qucosa.de%2Fapi%2Fqucosa%253A38668%2Fmets](https://tubaf.qucosa.de/landing-page/?tx_dlf[id]=https%3A%2F%2Ftubaf.qucosa.de%2Fapi%2Fqucosa%253A38668%2Fmets)
- [3] Bundesnetzagentur, „Flexibilität im Stromversorgungssystem“. März 2017. Zugegriffen: 27. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/NetzentwicklungUndSmartGrid/BNetzA_Flexibilitaetspapier.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- [4] Green Energy Lab, „Projekt Heatpool Green Energy Lab“. Zugegriffen: 30. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://greenenergylab.at/projects/heat-water-storage-pooling/>

- [5] M. Naderifar, H. Goli, und F. Ghaljaie, „Snowball Sampling: A Purposeful Method of Sampling in Qualitative Research“, *Strides Dev Med Educ*, Bd. 14, Nr. 3, Sep. 2017, doi: 10.5812/sdme.67670.
- [6] A. Wohllebe, „Geschäftsmodellanalyse mit dem Business Model Canvas“, in *Geschäftsmodelle systematisch analysieren*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022, S. 27–50. doi: 10.1007/978-3-658-36258-4_4.
- [7] Shelly, „Shelly Cloud“. Zugegriffen: 18. Dezember 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://my.shelly.cloud/#choose_lang
- [8] D. P. Kingma und J. Ba, „Adam: A Method for Stochastic Optimization“, 2014, doi: 10.48550/ARXIV.1412.6980.
- [9] C. J. Willmott und K. Matsuura, „Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance“, *Climate Research*, Bd. 30, Nr. 1, S. 79–82, 2005.
- [10] L. Zhang, Q. Zhang, H. Fan, H. Wu, und C. Xu, „Big-M based MILP method for SCUC considering allowable wind power output interval and its adjustable conservativeness“, *Global Energy Interconnection*, Bd. 4, Nr. 2, S. 193–203, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.gloi.2021.05.001.
- [11] H. Pieper, T. Ommen, J. Kjær Jensen, B. Elmegaard, und W. Brix Markussen, „Comparison of COP estimation methods for large-scale heat pumps used in energy planning“, *Energy*, Bd. 205, S. 117994, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117994.
- [12] A. Kusiak, M. Li, und Z. Zhang, „A data-driven approach for steam load prediction in buildings“, *Applied Energy*, Bd. 87, Nr. 3, S. 925–933, März 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.09.004.
- [13] L. Arvastson, „Stochastic Modeling and Operational Optimization in District Heating Systems“, thesis/docmono, Lund University, 2001. Zugegriffen: 30. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: <http://lup.lub.lu.se/record/20194>
- [14] H. Yang, S. Jin, S. Feng, B. Wang, F. Zhang, und J. Che, *Heat Load Forecasting of District Heating System Based on Numerical Weather Prediction Model*. 2016. doi: 10.2991/ifeea-15.2016.1.
- [15] N. R. Draper und H. Smith, *Applied Regression Analysis*, 1. Aufl. in Wiley Series in Probability and Statistics. Wiley, 1998. doi: 10.1002/9781118625590.
- [16] L. Breiman, „Random Forests“, *Machine Learning*, Bd. 45, Nr. 1, S. 5–32, Okt. 2001, doi: 10.1023/A:1010933404324.
- [17] G. Dudek, „Short-Term Load Forecasting Using Random Forests“, in *Intelligent Systems’2014*, D. Filev, J. Jabłkowski, J. Kacprzyk, M. Krawczak, I. Popchev, L. Rutkowski, V. Sgurev, E. Sotirova, P. Szykarczyk, und S. Zadrozny, Hrsg., in *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer International Publishing, 2015, S. 821–828. doi: 10.1007/978-3-319-11310-4_71.
- [18] F. H. Al-Qahtani und S. F. Crone, „Multivariate k-nearest neighbour regression for time series data — A novel algorithm for forecasting UK electricity demand“, in *The 2013 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Aug. 2013, S. 1–8. doi: 10.1109/IJCNN.2013.6706742.
- [19] S. Yakowitz, „Nearest neighbor method for time series analysis“, *Journal of Time Series Analysis*, Bd. 8, S. 235–247, Juni 2008, doi: 10.1111/j.1467-9892.1987.tb00435.x.
- [20] L. Ruiz, M. Cuéllar, M. Calvo-Flores, und M. del C. Pegalajar Jiménez, „An Application of Non-Linear Autoregressive Neural Networks to Predict Energy Consumption in Public Buildings“, *Energies*, Bd. 9, S. 684, Aug. 2016, doi: 10.3390/en9090684.
- [21] EXAA Abwicklungsstelle für Energieprodukte AG, „EXAA - Die Strombörse mit vier Auktionen in AT und DE“. Zugegriffen: 18. Dezember 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.exaa.at/>
- [22] A. Quispel und A. Maes, „Would you prefer pie or cupcakes? Preferences for data visualization designs of professionals and laypeople in graphic design“, *Journal of Visual Languages & Computing*, Bd. 25, Nr. 2, S. 107–116, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.jvlc.2013.11.007.
- [23] E. Costanza, S. Ramchurn, und N. Jennings, „Understanding domestic energy consumption through interactive visualisation: A field study“, *UbiComp’12 - Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing*, Sep. 2012, doi: 10.1145/2370216.2370251.
- [24] KaMo GmbH, „Wärmepumpen-Effizienz-Konzept.“ [Online]. Verfügbar unter: https://www.kamo.de/-/media/kamo/germany/04_unternehmen/download-und-services-pdfs/dezentrale-systeme/kamo_waermepumpen_effizienz_konzept.pdf?la=de-de&hash=A3BA79F5ACA5F3F85E4308FF52E40E26A306FCD3

- [25] Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. und BWP Marketing & Service GmbH, „SG Reay-Label“. [Online]. Verfügbar unter: www.waermepumpe.de
- [26] D. Hardt, *The OAuth 2.0 Authorization Framework*. 2012. Zugegriffen: 11. Dezember 2023. [Online]. Verfügbar unter: <http://archive.org/details/rfc6749>
- [27] M. Jones und D. Hardt, „The OAuth 2.0 Authorization Framework: Bearer Token Usage“, S. RFC6750, Okt. 2012, doi: 10.17487/rfc6750.
- [28] R. Fielding und J. F. Reschke, „RFC7232“, IETF HTTP Working Group Specifications. Zugegriffen: 11. Dezember 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://httpwg.org/specs/rfc7232.html>

7 Kontaktdaten

DI Patricia Jasek

Forschung Burgenland

Campus 1 , 7000 Eisenstadt, Phone: +43 5/7705 – 5486, E-Mail: patricia.jasek@forschung-burgenland.at, Web: www.forschung-burgenland.at, <https://www.forschung-burgenland.at/projekte/projekt/heat-water-storage-pooling/>)

Projektpartner/Forschungspartner:

Burgenland Energie

4ward Energy Research GmbH

energy & meteo systems

PINK